
BOLETIN ENERGETICO



Organización Latinoamericana
de Energía

OCTUBRE/DICIEMBRE/1980

EL DESARROLLO DE PEQUEÑAS CENTRALES HIDROELECTRICAS EN LATINOAMERICA Y EL CARIBE *olade* ANEXO I: SINTESIS DEL PROGRAMA REGIONAL DEL P.C.H. *olade* DISEÑO Y ESTANDARIZACION DE TURBINA MICHELL-BANKI *olade* HIDROLOGIA PARA PROYECTOS DE PEQUEÑAS CENTRALES HIDROELECTRICAS EN AUSENCIA DE DATOS *olade* REGULADOR DE VELOCIDAD ELECTRICO ELECTRONICO DE TURBINAS HIDRAULICAS PARA PEQUEÑAS CENTRALES HIDROELECTRICAS *olade* METODOLOGIA SINTETICA PARA EL CALCULO Y ESPECIFICACION PRELIMINAR DE MICROCENTRALES HIDROELECTRICAS

METODOLOGIA SINTETICA PARA EL CALCULO Y ESPECIFICACION PRELIMINAR DE MICROCENTRALES HIDROELECTRICAS

Ing. Enrique Indacochea R. de S.

ALCANCES

Consideramos que sería una pretensión excesiva considerar este documento como un manual en el sentido más amplio de la palabra, si entendemos que un manual debe tratar los diversos aspectos relacionados con el tema en forma amplia y con suficiente profundidad en cada caso. El autor ha pretendido más bien presentar un instrumento más sencillo, casi un formulario de aproximación al diseño de Microcentrales Hidroeléctricas, de ahí el carácter sintético hasta el exceso de la presentación del material. Obviamente esta aproximación nos obliga a dejar de lado algunos comentarios y recomendaciones de utilidad, así como cualquier demostración de las fórmulas que se emplean.

Este documento está dirigido especialmente hacia los ingenieros jóvenes o aquellos que no hayan tenido experiencia profesional en el campo de la hidroenergía, estando al alcance de los profesionales de cualquier especialidad de ingeniería siempre que su formación comprenda estudios fundamentales de hidráulica y energética.

No se pretenden dosis de originalidad en los planteamientos, justamente se ha hecho un esfuerzo en el sentido contrario, a fin de poder presentar soluciones prácticas para la aplicación de algunas tecnologías no convencionales aún no muy difundidas, como sería el empleo de tuberías de presión en materiales no metálicos.

Los principios fundamentales contenidos son aplicables a cualquier tipo o tamaño de central, sin embargo algunos aspectos metodológicos en cuanto a la simplificación de la ingeniería del proyecto y la aplicación de algunas tecnologías no convencionales, resultan particularmente relevantes para las potencias menores disminuyendo su aplicabilidad conforme se crece hacia potencias mayores, de ahí que adoptemos en el título el término "Microcentrales Hidroeléctricas" el cual, según el sistema de clasificación adoptado por OLADE, corresponde a las centrales de potencias inferiores a 50 kW, tal como se explica en el siguiente capítulo.

Por otra parte, pese a que la tecnología hidroenergética tiene un carácter universal, se ha querido acentuar aquellos elementos que a juicio del autor tienen mayor relevancia para Latinoamérica, en cuanto a la terminología empleada y sus equivalencias regionales, las tecnologías y equipos con mayores perspectivas de disponibilidad en la región y al acento sobre las aplicaciones en caídas medianas y elevadas.

Este documento se divide en dos partes; en la primera se presentan cuestiones de carácter general, en cuanto a clasificación y definiciones, métodos simplificados de evaluación de la demanda energética y evaluación de los recursos hídricos, así como procedimientos de cálculos básicos para especificar una central. En la segunda parte, se tratan en mayor detalle cuestiones relativas a las especificaciones de las obras civiles y la selección de equipamiento.

En la presente publicación, se presenta solamente la primera parte y los anexos, quedando para una próxima publicación la presentación de una segunda parte del trabajo, en la que se presentarán algunas consideraciones de carácter general para la especificación de las obras civiles y se tratará en mayor detalle la especificación y relación de cada uno de los equipos e instalaciones que integran una Microcentral Hidroeléctrica.

PRIMERA PARTE: EVALUACIONES GENERALES Y CALCULOS BASICOS

1. Clasificación y definiciones

1.1 Clasificación

Adoptamos el sistema propuesto por OLADE

a) Según potencias y saltos

- Los rangos de potencia y salto son indicativos solamente
- Los saltos bajos, medio y elevado corresponden aproximadamente al empleo típico de turbinas Axiales, Francis o Michell-Banki y Pelton respectivamente.
- La denominación "Pequeñas Centrales Hidroeléctricas" corresponde también al conjunto de centrales de potencias hasta de 5 000 kW.
- El presente documento está destinado a emplearse principalmente en Microcentrales Hidroeléctricas con caídas medianas y elevadas.

b) Según la captación

- A filo de agua (toma lateral desde cauce principal).
- Con embalse o represa.

c) Según su regulación

	Rango Potencia	S A L T O (mt)		
		BAJO	MEDIO	ELEVADO
Micro centrales Hidroeléctricas	Hasta 50	menos de 15	15-50	más de 50
Mini centrales Hidroeléctricas	50-500	menos de 20	20-100	más de 100
Pequeñas Centrales Hidroeléctricas	500-5 000	menos de 25	25-130	más de 130

CUADRO No. 1 RANGOS DE POTENCIA Y SALTO

- Regulable (control del caudal al ingreso de la turbina), a su vez puede ser manual o automático.
- De carga constante, sea por naturaleza propia de la carga o por la disipación del exceso de energía.

d) Según su vinculación con el sistema eléctrico

- Centrales aisladas.
- Centrales integradas a pequeños sistemas eléctricos.
- Centrales integradas a grandes redes zonales o nacionales.

e) Según su concepción tecnológica

- Es una clasificación indicativa referida a la naturaleza de los principales elementos tecnológicos de una central.
- Centrales con tecnologías convencionales. Comprenden obras civiles de calidad en la toma, canal y cámara de carga; desarenado en toma, tubería de acero, equipo electromecánico de alto costo y construido con los más exigentes criterios de materiales y procesos de fabricación, tableros ampliamente instrumentados.
- Centrales con tecnologías no convencionales. Frecuentemente emplean tomas y canales de riego existentes que son mejorados, cámara de carga instalada en línea sobre el canal e incluyendo el desarenador, equipos elec-

tromecánicos diseñados y construidos con tecnologías adecuadas al nivel de desarrollo industrial del país y considerando la disponibilidad de materiales nacionales, equipos estandarizados, tableros modulares y con un mínimo de instrumentación.

1.2. Definiciones

Se presenta un glosario explicado de los principales elementos de una central, señalando entre paréntesis términos alternativos empleados en algunos países de la región.

- a) Obra de toma. Puede incluir obras de embalse (presas, cortinas) del cauce principal, captación a filo de agua (captación lateral, toma de río). Frecuentemente se instalan presas sumergidas (soleras, barrajes) para elevar el nivel del agua al ingreso de la toma.
- b) Conducción. Puede tomar la forma de canal o túnel que porta el agua desde la toma hasta la cámara de carga, o más lejos cuando se utilizan canales de regadío.
- c) Cámara de carga (taza, tanque de carga, reservorio). Es-

estructura que recibe el agua del canal antes de su ingreso a la tubería de presión.

- d) Desarenador (separador de sólidos, sedimentador). Estructura civil para facilitar el asentamiento de las partículas sólidas suspendidas en el agua al reducir la velocidad de flujo. Puede instalarse en la toma o en la cámara de carga.
- e) Compuertas. Dispositivo para controlar el flujo en tomas, canales y cámaras de carga.
- f) Rejillas (mallas). Dispositivos para evitar el paso de sólidos, flotantes, o arrastrados por encima de determinada dimensión.
- g) Tubería de presión (tubo, ducto de presión). tubería que transporta el agua desde la cámara de carga hasta la turbina y que permite aprovechar la energía potencial del salto.
- h) Salto (salto bruto, caída). Altura vertical desde el nivel libre del agua en la cámara hasta el nivel de máximo aprovechamiento en la turbina.
- i) Válvula Principal. Elemento de aislamiento de la turbina con respecto a la tubería de presión. Normalmente no se usa para fines de regulación.
- j) Turbina. Motor hidráulico que aprovecha la energía hidráulica disponible y la convierte en energía mecánica.
- k) Transmisión turbina-generator. Sistema para transmitir la energía desde el eje de la turbina hasta el eje del generator; puede ser por acoplamiento directo o por medio de transmisión sea por fajas (bandas) en "V" o planas, engranajes o cadenas.
- l) Generator. Máquina eléctrica que convierte la energía mecánica en energía eléctrica; puede ser un alternador (generator sincrónico o síncrono) o un generator asíncrono (generator asíncrono, motor eléctrico invertido).
- ll) Tablero de control e instrumentación (tablero, sistema de control, tablero de mando).

m) Transformador.

n) Línea de transmisión. En pequeñas centrales hidroeléctricas se emplean bajas y medias tensiones para la transmisión desde la planta hasta el punto de consumo.

ñ) Línea de distribución (distribución). Se emplea para abastecer los sistemas domiciliarios a baja tensión.

1.3 Unidades

Empleamos principalmente las siguientes:

- Longitud y altura metros (m)
Excepto en lo referente a diámetros y espesores de pared de tubos donde se emplean las dimensiones en milímetros (mm); los valores nominales de tubería estándar también se expresan en pulgadas (").
- Velocidad metros/segundo (m/s)
- Caudal metros cúbicos/seg. (m³/s)
- Trabajo kilowatt-hora (kW-H)
- Potencia kilowatt (kW)

Excepto para indicadores de requerimientos de capacidad instalada *per cápita* que se expresan en Watt (W) y para la velocidad específica "de Potencia" N_s , donde los valores de la potencia se expresan en caballos de vapor (CV).

- Velocidad de giro. Revoluciones/minuto (R.P.M.)
- Esfuerzo. Kilogramo fuerza/milímetro cuadrado (kg-fmm²)
- Temperatura. Grados centígrados (°C)

En el Anexo II se muestran algunos factores de conversión de unidades.

2. Estimación de la demanda energética

La presente metodología no pretende analizar aspectos de factibilidad económica financiera de proyectos, sino sólo presentar aquellos elementos que permitan determinar característica técnicas y alternativas para orientar el análisis

preliminar de proyectos de Microcentrales Hidroeléctricas. Sin embargo no está de más mencionar que la profundidad y amplitud de los estudios que se considere realizar para cada proyecto específico, debe estar relacionada con la seguridad que se pretende dar a la inversión, en consecuencia debe existir una proporción adecuada entre los costos de estudios y la inversión total en el proyecto.

Para los fines indicados, el análisis de la demanda puede sustentarse en los siguientes aspectos:

- Un análisis socio-económico global, basado en información de campo y del que se desprendan perspectivas de desarrollo energético.
- Aplicación de indicadores para determinar los requerimientos de capacidad instalada.
- Aplicación de indicadores y tipificación de la demanda energética para evaluar los consumos probables de energía.

2.1. Análisis socio-económico

Objetivo: Determinar información básica sobre requerimientos y demanda energética.

Método: Encuesta directa (total o muestra suficientemente grande según tamaño de la población). Apreciación sobre perspectivas, proyecciones e identificación de proyectos de actividades productivas insumidoras de energía.

Alcances:

- Población. Número, tamaño de familias, distribución por actividades, niveles de ingreso, nivel cultural, etcétera. Tipificación de posibles niveles de satisfacción de necesidades energéticas. Información histórica sobre crecimiento (o estancamiento); migraciones. Previsiones de crecimiento (tasas), previsión de elevación de los índices de requerimientos energéticos (tasas).
- Actividades Económicas. Descripción de actividades productivas y de apoyo existentes; impacto económico. Potencial de la zona. Identificación de proyectos en actividades insumidoras de energía.

Requerimientos para el desarrollo de proyectos; plazos.

- Transportes y Comunicaciones. Sistemas de transporte (personal y carga); carreteras, correo, telecomunicaciones, etc.
- Servicios. Agua potable, desagüe, disponibilidades de energía; comercio.
- Educación. Escuelas y actividades culturales; necesidades educacionales y sus requerimientos energéticos específicos.
- Descripción física de la localidad. Ubicación geográfica, distancia, descripción física (calles, distancias, tipos de construcción, etc.)

2.2. Determinación aproximada de la capacidad instalada requerida

Para evaluaciones preliminares o cuando se tiene limitada información socio-económica sobre la población, especialmente en cuanto al tamaño promedio de las familias, es conveniente utilizar índices de requerimientos de capacidad instalada por habitante, cuya magnitud depende de:

- Nivel socio-económico y cultural de la población.
- Existencia de suministro eléctrico.
- Factor de carga; el efecto de cargas de punta elevadas tiende a incrementar los requerimientos de la capacidad instalada. Es importante considerar los niveles de simultaneidad en el consumo, principalmente entre el consumo doméstico y el de actividades productivas.
- Existencia de sistemas y educación para el uso racional de la energía.
- Tamaño promedio de las familias.

Los indicadores de requerimientos de capacidad instalada *per cápita* en el medio rural latinoamericano pueden variar ampliamente. Para el caso particular de poblaciones aisladas con bajo nivel de desarrollo socio-económico los requerimientos se sitúan entre 30 w/habitante (Ref. 1), hasta 100 W/habitante (Ref. 2). En estimativos sin mayor análisis es razonable asumir un valor de 50W/habitante.

Cuando se dispone de mayor información socio-económica es más racional utilizar indicadores por unidad familiar o residencia, ya que las necesidades energéticas a nivel do-

méstico están más vinculadas al número de viviendas que a la población en general.

Un valor mínimo sería del orden de 250 W/vivienda, pudiendo considerarse valores mayores del orden de 500 W/vivienda (Ref. 2.)

En la determinación de la capacidad instalada merecen estudiarse las previsiones de simultaneidad entre el consumo doméstico y el carácter productivo. Frecuentemente en las aplicaciones de Microcentrales Hidroeléctricas (menores a 50 kW) en poblaciones aisladas en Latinoamérica es probable una utilización vespertina de la energía eléctrica (6-12 horas) para fines domésticos y de iluminación pública; en este caso la capacidad instalada seleccionada para cubrir esas puntas generalmente deja un amplio margen de disponibilidad de planta para las actividades productivas existentes y nuevas actividades que se desarrollen para operar principalmente durante el día (agroindustria, servicios, etc.), o en la madrugada (panaderías).

2.3. Metodología analítica para determinar la capacidad instalada requerida y el consumo energético

En el número anterior se señalan algunos índices que permiten estimar los requerimientos de capacidad instalada en forma preliminar, sin embargo para definir estos requerimientos con mayor precisión conviene analizar en mayor detalle la estructura de la demanda que se señala a continuación y que se ilustra en el cuadro No. 2, cabe señalar que este método resulta aplicable para centrales aisladas que operan el sistema en forma discontinua.

El sistema consiste en analizar los requerimientos de energía en función de "periodos" discontinuos en los que se puede dividir un día típico de operación y para cada "sector" de consumo, determinando la "carga de punta" y un "factor de carga específico" para cada "periodo" y "sector", en la forma siguiente:

a) Carga de Punta (C_p) para cada "periodo" diario y "sector"; se establece identificando los requerimientos de capacidad instalada de consumo (C_i) que pudiera estar operando corregidos por un factor de simultaneidad (f) probable. Por seguridad y cuando se considera posible que la carga de punta equivalga a la capacidad instalada de consumo se asumirá $f_s = 1$. En general este factor será inferior a la unidad, salvo que los requeri-

mientos de arranque de motores eléctricos sean tales que obliguen a considerar valores superiores a la unidad.

$$C_p = f_s \times C_i$$

C_p en kW
 C_i en kW

b) Coeficiente de carga específico (f_c) para cada "periodo" diario y "sector", definido como la relación entre la "carga media" (C_m en kW) y la "carga de punta" (C_p).

Los "periodos" diarios son grupos de horas de un mismo día en que se espera que la central funcione continuamente, dependiendo de las características de la demanda prevista durante el día, por ejemplo en una central destinada exclusivamente a iluminación nocturna puede considerarse un "periodo" único de 6 p.m. hasta las 11 p.m. En línea de máxima señalamos tres periodos más o menos típicos de utilización de energía en una población aislada con una buena diversificación de la demanda:

- 1er. Periodo; pudiera definirse de 2 a.m. a 5 a.m. requerido por actividades tales como la panificación.
- 2do. Periodo; pudiera definirse de 7 a.m. a 5 p.m. caracterizado principalmente por la demanda de actividades productivas (agroindustria, servicios, etc.)
- 3er. Periodo; pudiera definirse de 6 p.m. a 11 p.m. caracterizado principalmente por los requerimientos de iluminación pública y consumo doméstico.

A su vez es necesario definir los sectores de consumo, que para fines del análisis de la demanda propuesta, se sugiere reducir a un mínimo desagregado en la forma siguiente:

- Iluminación Pública. Su factor de carga específico sería cercano a la unidad, reducido sólo por la incidencia de puntos de iluminación dañados pudiendo asumirse un valor de $f_c = 0.95$.
- Consumo doméstico. Se deben establecer las características de consumo según grupos típicos de la población, estableciendo la familia y residencia tipo para cada grupo. También debe considerarse si se piensa instalar dispositivos de iluminación del consumo que tienden a reducir las puntas.

En el caso de las poblaciones aisladas del medio rural con bajos niveles de ingreso, su consumo doméstico estará dado principalmente por los requerimientos de iluminación, con coeficientes de carga específicos bastante elevados (del orden del 800/0).

Para cada resistencia de tipo se debe estudiar su capacidad de consumo y los factores de carga específicos aplicables a fin de determinar por acumulación los requerimientos de capacidad instalada.

- Consumo productivo y de servicios. Dado que no es de esperar un gran número de unidades productivas y de servicios atendidas por una Microcentral, los requerimientos de capacidad instalada y consumos se pueden aproximar analizando los procesos productivos y requerimientos energéticos en cada caso.

Los requerimientos de energía para las actividades productivas y de servicios deben estudiarse considerando lo siguiente:

- Posibilidad de utilización de la disponibilidad de planta existente para fines productivos durante el día y la madrugada, perspectivas de expansión de la actividad productiva, excedentes diurnos de disponibilidad para eventual utilización doméstica.
- Limitaciones en el uso del agua durante el día debido a otras prioridades (agricultura principalmente), esto puede ser significativo en microcentrales que utilizan canales de riego existentes; considerar aspectos institucionales.
- El arranque de motores eléctricos puede duplicar transitoriamente los requerimientos de potencia de cada unidad (Ref. 2, Ref. 3). Un adecuado control para secuencias de arranque de motores en pequeñas poblaciones es viable, también se puede considerar el empleo de dispositivos de arranque con tensión reducida (costosos).
- Posibilidades de utilización directa de energía mecánica.

- c) Carga Media (C_m). Está dada por el producto de la carga de punta y el coeficiente de carga específico.

$$C_m = f_c \times C_p$$

- d) Consumo de energía (c). Para cada "periodo" y "sector" estará dado por el producto de la carga media y el número

de horas (h) correspondiente al periodo, en la siguiente forma:

$$c = C_m \times h$$

La suma de los consumos de cada periodo del día nos da el consumo diario de energía y la suma de los consumos de cada sector durante el día nos da el consumo diario del sector.

Para determinar el consumo anual se deben considerar eventuales elementos estacionales en el consumo diario y los periodos de parada previstos por razones de mantenimiento o limitaciones en el uso del agua.

- e) Determinación de la capacidad instalada.

Luego de sumar las cargas de punta de todos los sectores para cada periodo, se selecciona aquel periodo que requiere la mayor carga de punta como referencia para determinar los requerimientos de capacidad instalada.

La definición de la capacidad instalada debe tomar en cuenta tanto las pérdidas energéticas en la transmisión y distribución como por otra parte, una apreciación cualitativa sobre las posibilidades de coincidencia de las cargas de punta de los sectores en un mismo periodo, así como las limitaciones en cuanto a continuidad del servicio y cortes eléctricos.

Por otra parte debe considerarse también la proyección de la demanda futura tanto en función de crecimiento poblacional como de incremento de los índices unitarios de demanda, evaluando las ventajas y desventajas comparativas de contar con excedentes de capacidad instalada o requerir eventuales incrementos de capacidad instalada.

Es importante tomar en cuenta que en muchos países de latinoamérica no es necesario considerar índices de crecimiento en la población rural debido a intensos procesos de migración hacia las ciudades, lo cual sólo parcialmente sería atenuado con la disponibilidad de energía eléctrica.

3. Evaluación del medio físico y estimación del recurso aprovechable

Dado el marco de referencia de la presente metodología no pretendemos exhaustivar el análisis de métodos de eva-

CUADRO No. 2. DIAGRAMA DE ANALISIS DE CARGA Y CONSUMO
(EJEMPLO PRACTICO)

		Sector Iluminación Pública	Sector Consumo Doméstico	Sector Consumo Productivo y Servicios	TOTALES
Capacidad Instalada de Consumo Prevista (kW)		8	20	10	
PERIODO "1" 2 a.m. - 6 a.m. (4 horas)	Carga de Punta (kW)	—	—	2	2
	Coefficiente de carga especif.	—	—	0.8	
	Carga Media (kW)	—	—	1.6	
	Consumo de Energía (kW-h)	—	—	6.4	6.4
PERIODO "2" 7 a.m. - 5 p.m. (10 horas)	Carga de Punta (kW)	—	—	12(*)	12
	Coefficiente de carga especif.	—	—	0.7	
	Carga Media (kW)	—	—	8.4	
	Consumo de energía (kW-h)	—	—	84	84
PERIODO "3" 6 p.m. - 11 p.m. (5 horas)	Carga de Punta (kW)	7.2	18	—	25.2
	Coefficiente de carga especif.	0.95	0.8	—	
	Carga Media (kW)	6.84	14.4	—	
	Consumo de energía (kW-h)	34.2	72	—	106.2
Consumo Diario de Energía (kW-h)		34.2	72	90.4	196.6

* Considerando el arranque del motor eléctrico de mayor potencia.

En este caso se consideró una capacidad instalada de 26 kW (sin tomar en cuenta el crecimiento futuro de la demanda)

luación del medio físico sino solamente identificar aspectos a evaluarse y sus limitaciones, poniendo acento más bien en conocidos métodos para calcular los parámetros principales de proyectos específicos; es decir caudal disponible y salto aprovechable.

3.1 Requerimientos mínimos para el reconocimiento

Para proyectos específicos de microcentrales hidroeléctricas, se deben reducir al mínimo los estudios de reconocimiento del medio físico en razón de su elevado costo en relación con la inversión. Resulta más bien recomendable orientar los estudios del medio físico hacia la evaluación

de cuencas y subcuencas, en forma tal que no sólo se determine el potencial de una cuenca dada, sino que también se pueda aprovechar y generalizar la información obtenida para aplicarse en proyectos específicos, sin tener que realizar estas evaluaciones para cada proyecto.

El nivel de reconocimiento del medio físico de una cuenca puede comprender los siguientes aspectos:

- Hidrología
- Ecología
- Geología
- Geomorfología
- Geotecnia
- Disponibilidad de agregados

Los cuales al ser aplicados al estudio de cuencas y subcuencas para microcentrales hidroeléctricas deben considerarse lo siguiente:

a) Hidrología

Objeto. Estimar los caudales aprovechables para microcentrales, generalmente determinando caudales mínimos, caudales con una probabilidad de excedencia del orden del 95%.

Aspectos Metodológicos. La determinación del caudal mínimo generalmente se obtiene a partir de las curvas de caudal/duración, sin embargo frecuentemente se tienen dificultades para determinarlas por métodos directos, dado que muchas veces no se cuenta con registros hidrométricos, debiendo recurrirse a métodos indirectos mediante la determinación y aplicación de valores índices.

También es posible establecer criterios de similitud constante entre las subcuencas y las cuencas principales, que permitan la generalización de la información hidrológica más probablemente disponible para las cuencas mayores, principalmente para las curvas de precipitación/duración y caudal/duración.

La información pluviométrica disponible debe ser completada estableciendo ecuaciones de regresión con los datos existentes, igualmente se debe proceder con la información hidrométrica disponible generalmente aplicando criterios de interpolación para completar los registros de caudales. También es posible la utilización de modelos hidrológicos cuando no se tienen series hidrológicas representativas en las subcuencas, simulando series de escurrimiento para el área de drenaje considerada. Un modelo interesante que requeriría alguna adaptación para ser aplicado en América Latina es el sistema SNSF-Noruego en el que la transferencia a través de cada subcuenca es simulada por un sistema de tanques (Ref. 4D).

En última instancia el caudal mínimo mensual o aquél que exceda el 95% del tiempo, considerando el empleo predominante de microcentrales a "filo de agua", puede definirse como un porcentaje del caudal promedio multianual. Se pueden establecer ecuaciones que relacionen el caudal medio anual con el rendimiento hídrico medio anual ($m^3/S/km^2$) y la correspondiente área de drenaje de la cuenca, lo que conjuntamente con las curvas de duración deter-

minadas indirectamente, puede llegar a determinar expresiones lineales para el cálculo de los caudales mínimos mensuales.

Los caudales diarios pueden variar considerablemente, siendo los valores mínimos diarios generalmente inferiores a los mínimos mensuales; sin embargo su predicción es muy incierta, lo cual resultaría en un problema aparentemente difícil de salvar, considerando que en el caso de las microcentrales "a filo de agua" la acumulación es prácticamente despreciable. A pesar de esta dificultad, el problema es poco relevante en razón de que la ocurrencia de caudales mínimos diarios inferiores a los mensuales sólo afectaría transitoriamente la operación de la planta.

Idealmente sería conveniente contar con aforos sobre el cauce de donde se derivarían las aguas por un periodo mínimo de tres años, sin embargo esto sólo resulta práctico para conjuntos de proyectos en una cuenca dada y no para una microcentral específica.

También la información referencial suministrada por la población local, debidamente interpretada, puede contribuir a estimar caudales históricos, principalmente para las crecidas. Los caudales máximos constituyen una útil referencia para el diseño de las obras civiles, sobre todo en cuanto a su protección.

b) Ecología

Objeto. Describir el medio en el que se desarrollarán las plantas a fin de ver su influencia en las características de los proyectos, formas constructivas, materiales y equipos a emplearse; su efecto sobre las expectativas de conservación y recíprocamente el efecto de la instalación de microcentrales en la ecología de la cuenca o subcuenca.

Aspectos Metodológicos. Este tipo de estudio es apropiado sólo para la evaluación de cuencas y no de proyectos específicos por las razones señaladas anteriormente, en este último caso sólo se requieren comentarios generales sobre los aspectos ecológicos.

Comprende los siguientes aspectos:

- Clima
- Zonas biológicas
- Suelos (desde el punto de vista de su utilización por el hombre)
- Vegetación

- Fauna
- Aguas y Biología Acuática

c) Geología

Objeto. Determinar las características básicas y composición del suelo y subsuelo de la cuenca con la finalidad de establecer bases de orientación general para la construcción, principalmente en los aspectos estructurales y sísmicos.

Aspectos Metodológicos. Conviene realizar estudios aplicables a cuencas y subcuencas más que a proyectos específicos. Los aspectos de estudio más relevantes son:

- Litología (formaciones geológicas, aplicando métodos de estratigrafía)
- Geología Estructural (fallas, orientación, actividad volcánica)
- Sismología (registros, probabilidad de sismos y su magnitud)

d) Geomorfología

Objeto. Estudiar la conformación de la superficie del terreno y su evaluación para determinar principalmente la acumulación y depósito de sedimentos en los cursos de agua, considerando su aplicación en la erosión del equipamiento y en la consecuente necesidad de un adecuado diseño de los sistemas de desarenado y selección de materiales para las turbinas (principalmente rodetes y sistemas de inyección). También permite orientar la selección final de la ubicación de las obras en cuanto a posibles deslizamientos y aluviones.

Aspectos Metodológicos. Identificación de estructuras a partir de mapas geomorfológicos principalmente en cuanto a escarpes, vertientes y fondo del valle (cauce del río); aplicables al estudio global de cuencas y subcuencas.

e) Geotecnia

Objeto. Estudio de los suelos en cuanto a sus características, propiedades mecánicas, estabilidad y niveles freáticos, principalmente para orientar la construcción de las obras hidráulicas.

Aspectos Metodológicos. La aplicación de estudios geotécnicos a nivel de cuencas y subcuencas es limitada dada

la enorme diversidad de variaciones puntuales, en consecuencia en este caso está restringida a aspectos descriptivos derivados de los estudios geológicos.

El estudio geotécnico es particularmente relevante para el estudio de suelos en posibles ubicaciones específicas de las obras civiles, a fin de orientar la selección de las ubicaciones definitivas y definir requerimientos de diseño.

La amplitud de su empleo está ligada a la magnitud del proyecto específico tanto en cuanto a los costos de estudio como a los riesgos de la obra en sí. En el caso de Microcentrales Hidroeléctricas los estudios geotécnicos generalmente deben reducirse a un mínimo dado por apreciaciones cualitativas, principalmente mediante excavaciones y sondeos, determinación aproximada de la capacidad portante del suelo y estimación de factores de seguridad para el diseño de la toma, cámara de carga, algunos anclajes de tubería y cimentación del equipo principal.

f) Disponibilidad de agregados

Objeto. Estudiar la existencia de materiales adecuados para agregados (piedra, grava, arena, etcétera), factor importante para reducir los costos de las obras y asegurar adecuada selección de materiales, diseños de obras y métodos constructivos.

Aspectos Metodológicos. Estudio diferenciado de la existencia y características de los principales tipos de materiales requeridos (material granular, materiales de enrocado, material de cantera, etcétera).

3.2 Mediciones de caudal

Se describen tres procedimientos:

- Medición aproximada por medio de flotador.
- Medición por medio de vertedero rectangular.
- Medición por medio de vertedero triangular.

a) Medición aproximada por medio de flotador

Este método permite una rápida y sencilla medición aproximada del caudal de agua que se desplaza en una conducción a pelo libre. Cuando se realizan las mediciones cuidadosamente, el error es del orden de más o menos 20%, en consecuencia, debe emplearse sólo para una primera estimación de caudales.

PRINCIPIO:

Se basa en que el caudal es el producto de la velocidad media de flujo por la sección de la parte sumergida del canal considerando las siguientes hipótesis:

- Que la velocidad superficial debidamente corregida con un factor que depende del material de las paredes del canal y la relación sección/perímetro mojado, equivale a la velocidad media del agua.
- Que la sección media del canal es el promedio de dos o tres secciones medidas del tramo del canal empleado para medir la velocidad.

INSTRUMENTOS Y MATERIALES:

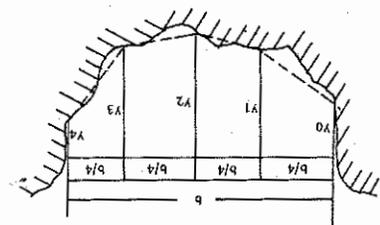
- 1 Cronómetro.
- 1 Cinta de 1-3 m de longitud con graduaciones en mm, (para medir el ancho del canal).
- 1 Regla de plástico de 30-100 cm de longitud graduada en mm (para medir la profundidad del canal).
- 1 Cinta de 10-3 m (para medir la longitud del tramo de canal seleccionado).
- 1 Flotador (puede ser una botella pequeña llena con 1/3 de agua, un trozo de madera, etcétera (para determinar la velocidad del agua).

PROCEDIMIENTO:

1. Seleccionar un tramo del canal aguas arriba del punto de utilización del agua, pero aguas abajo del último punto de derivación de agua para otros fines. El tramo seleccionado debe ser bastante recto y de sección relativamente uniforme en toda su longitud. Se recomienda una longitud (x) del orden de 10m.
2. Luego de medir y marcar el tramo seleccionado, lanzar el flotador antes del punto inicial y tomar el tiempo (t) en segundos que demora en recorrer la longitud seleccionada. Repetir varias veces la prueba, observando si el flotador en algún punto toca el fondo o los bordes para descartar la prueba. Si las pruebas son dispersas sobre un rango pequeño, promediar el tiempo. Si hay una agrupación superior y otra inferior, promediar la inferior, dado que la superior pudiera haber estado sometida a retardo.
3. Calcular la Velocidad Superficial:

$$V = \frac{x}{t} \text{ (m/seg)}$$

4. Seleccionar 2 ó 3 secciones que caractericen el canal y dividir el ancho de cada sección del canal en cuatro partes. Para cada sección, medir la profundidad inicial en el primer cuarto, al centro, en el tercer cuarto y la profundidad del lado opuesto.



5. Calcular cada sección por el método de los trapecios:

$$S = \frac{b}{4} \left[\frac{y_0}{2} + y_1 + y_2 + y_3 + \frac{y_4}{2} \right] \text{ (m}^2\text{)}$$

6. Calcular el Ratio Sección/Perímetro mojado para cada sección:

$$\frac{S}{P} = \frac{\left(\frac{b}{4}\right) \left[\frac{y_0}{2} + y_1 + y_2 + y_3 + \frac{y_4}{2} \right]}{y_0 + \sqrt{(y_0 - y_1)^2 + \left(\frac{b}{4}\right)^2} + \sqrt{(y_1 - y_2)^2 + \left(\frac{b}{4}\right)^2} + \sqrt{(y_2 - y_3)^2 + \left(\frac{b}{4}\right)^2} + \sqrt{(y_3 - y_4)^2 + \left(\frac{b}{4}\right)^2} + y_4} \text{ m}^2/\text{m}$$

7. Determinar el factor de corrección (k) de velocidad promedio gráficamente por medio de la Figura 1, o empleando la siguiente ecuación empírica:

$$k = A \left[L_n \left(\frac{S}{P} \right) \right] + B$$

	A	B
CANAL DE BARRO	0.0905	0.782
CANAL DE PEDRUSCOS	0.0362	0.847
CANAL DE CONCRETO	0.0150	0.893

Es conveniente calcular el valor del factor k para cada sección, sin embargo, cuando la diferencia entre el valor mayor y menor de S/P de dos secciones, sea inferior a 0.1, basta con promediar los valores de S/P de todas las secciones consideradas y determinar un solo valor del factor de corrección k.

8. Calcular el caudal

$$Q = V k S = V \left[\frac{k_1 S_1 + k_2 S_2 + \dots + k_n S_n}{n} \right] \text{ m}^3/\text{s}$$

donde n = número de secciones consideradas generalmente 2 ó 3.

Si se ha determinado un solo valor del coeficiente k para todas las secciones, la fórmula queda simplificada en la siguiente forma:

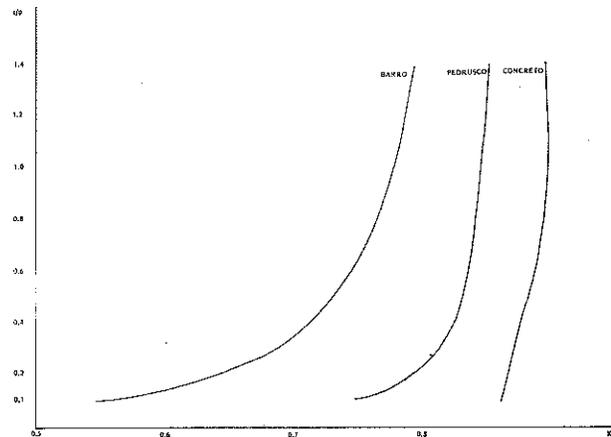
$$Q = V k \left[\frac{S_1 + S_2 + \dots + S_n}{n} \right] \text{ m}^3/\text{s}$$

b) Medición de caudal por medio de vertedero rectangular

El vertedero rectangular consiste en una placa, generalmente de madera, montada sobre el cauce de una corriente de agua, la cual tiene una incisión rectangular con un borde biselado, para lo cual se prefiere montar una lámina delgada de acero inoxidable que haga las veces de borde biselado.

El vertedero debe ser dispuesto en forma tal, que debajo del chorro que se encuentre en un espacio de aire "a" y que el ancho "b" de la incisión rectangular, sea menor que el ancho del cauce "B" (Figura 2), a fin de evitar distorsión en los resultados por la presencia de torbellinos.

Conviene instalar el vertedero en un tramo recto y de sección relativamente uniforme. Dos metros aguas arriba del vertedero (mínimo un metro) se debe clavar una estaca de madera sobre el fondo, cuya parte superior quede a nivel con el borde horizontal del vertedero, o si no instalar directamente un jalón medido en lugar de la estaca, cuyas medidas sobresalgan sobre el nivel del agua y el cero se en-



Coeficiente de correlación de velocidad (K)

cúntre a nivel con el mencionado borde horizontal del vertedero.

El caudal se calcula en la siguiente forma:

$$Q = \frac{2}{3} n b h \sqrt{2gh}$$

donde:

Q es el caudal en m^3/s .

b es la altura del pelo libre del agua sobre el borde del vertedero en m.

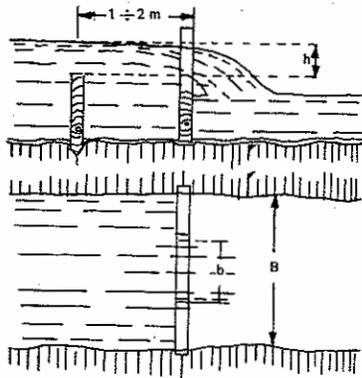
g es la aceleración estándar de la gravedad; $9.81 \text{ m}/\text{seg}^2$.

b es el ancho de la incisión rectangular del vertedero.

n es el coeficiente del vertedero, pudiendo tomarse un valor medio de 0.63, pero puede ser calculado por medio de la siguiente fórmula empírica, válida para valores de $b \geq 0.1 \text{ m}$:

$$\frac{2}{3} n = 0.3838 + 0.0386 \frac{b}{B} + 0.00053 \frac{1}{h}$$

donde B es el ancho total del cauce donde está montado el vertedero.



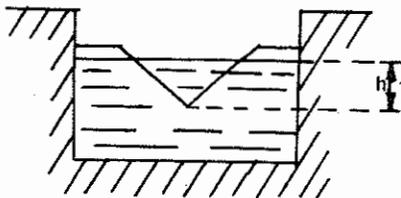
Una medición correctamente realizada con un vertedero bien instalado y construido no debe arrojar errores de un orden superior a más menos 10^o/o en la medición del caudal.

c) Medición del caudal por medio de vertedero triangular

Se utiliza preferentemente para la medición de aforos reducidos inferiores a 0.2 m³/s y en canales de ancho reducido con respecto a su profundidad donde no resulte viable la instalación de un vertedero de sección rectangular.

La disposición para medir la altura "b" es semejante a la del vertedero rectangular, sólo que ésta se refiere al vértice inferior del vertedero (Figura 3) empleándose la siguiente fórmula:

$$Q = 1.415 h^{5/2}$$



3.3 Nivelación aproximada para determinar el perfil de la caída

Consideramos que existe suficiente literatura sobre métodos de nivelación topográfica que normalmente se emplean para determinar el perfil de la caída y consecuentemente

el salto bruto aprovechable, las longitudes de la tubería de presión, sus apoyos y accesorios, sin embargo, para fines de una determinación preliminar del salto y perfil, es posible utilizar métodos sencillos que requieren un mínimo de instrumentación y calificaciones del personal que la ejecuta. En el caso particular de las Microcentrales, cuando se requiere reducir al mínimo los gastos de preinversión, y cuando se emplean tuberías de presión no metálicas que se adaptan fácilmente a la conformación del terreno (PVC y polietileno), la determinación aproximada de la caída que se presenta a continuación puede resultar suficiente para fines del proyecto definitivo, considerando que con una medición cuidadosamente realizada, el error en la determinación del salto no será superior a más menos 3^o/o, lo cual ha sido verificado en forma práctica por el autor.

INSTRUMENTACION Y MATERIALES:

- 1 Cinta de 10 - 30 m de longitud graduada en centímetros, para medir distancias horizontales y alturas de nivelación.
- 1 Jalón de madera o un tubo metálico bien alineado de aproximadamente 3 m de longitud, opcionalmente puede estar graduado en centímetros para simplificar la medición de alturas. Adicionalmente se puede incorporar una plomada para verificar su verticalidad. Se debe evitar el empleo de materiales flexibles o con secciones pequeñas a fin de evitar distorsiones por deflexión.
- 1 Nivel de carpintero (de burbuja) con base no menor de 30 cm.
- 1 Cuerda de 10 - 30 m de longitud.
 - Estacas de madera mínimo 2, sin embargo, conviene dejar las estacas en el lugar donde fueron colocadas, en cuyo caso es necesario contar con una estaca para cada estación de nivelación.
 - Pintura al agua o cal y brocha.
- 2 Jalones rectos de 2 m de alto, sin graduar; pueden ser cañas derechas (para referencias del punto inicial de nivelación al punto final).

INSTRUMENTOS Y EQUIPOS OPCIONALES:

- Brújula con rumbo para orientar el perfil.
- Cuerda o soguilla en longitud suficiente (100 - 200 m) para trazar el perfil.
- Cal o yeso en polvo para trazar el perfil.

PROCEDIMIENTO:

1. Inspección visual y estudio sobre la carta (1:25 000 o menor). Si no se tiene construido el canal, o si se trata de aprovechar un canal existente, es necesario identificar alternativas de ubicación de la cámara de carga y casa de fuerza.

Para seleccionar tentativamente el punto inicial de la tubería y el punto final, considerar entre otros los siguientes factores:

- Proximidad al centro de consumo.
 - Máximo desnivel entre las vías de agua, acequias o canales.
 - De preferencia seleccionar el punto desde el nivel superior que nos permita una caída brusca, o sea considerar favorablemente aquel punto que permita una mayor "máxima pendiente". Esto permite una mínima longitud de tubería, lo cual tiende a reducir la inversión inicial y la pérdida de carga. Por otra parte considerar las dificultades para el tendido de la tubería.
 - Considerar lugares protegidos de aluviones para la toma, como para la eventual ubicación de la sala de máquinas, estudiar en el terreno rastros de aluviones y hacer averiguaciones con los habitantes de la localidad.
 - Considerar posibles instalaciones aprovechables (compuertas, casas, molinos abandonados, etc.), que puedan definir la ubicación, aun fuera de sus puntos óptimos.
 - De preferencia la tubería de presión no debe pasar por terrenos cultivados.
 - Considerar posibles derechos de regantes. Dificultades y problemas legales que se puedan derivar del uso del agua.
 - Inspeccionar la toma existente a fin de verificar su estado y posible mejora (y aumento de caudal) sin mayor inversión en el caso de canales existentes.
 - Verificar estado de conservación de la acequia o canal que se considere aprovechar.
2. Una vez seleccionados los puntos extremos superior e inferior, plantar dos jalones a fin de orientar el trazo del perfil, si es posible tender un cordel y marcar con cal. Pintar algunas piedras como referencia.
 3. Si se está nivelando desde un canal existente, plantar una estaca en el punto más alto y colocar verticalmente el ja-

lón en la orilla más próxima del canal superior; tender un cordel desde el jalón, hasta la estaca y nivelarlo en su parte central (asegurarse que el cordel esté tenso, medir la altura de fijación del cordel sobre el nivel del agua para determinar la altura negativa ($-h$) desde el nivel de la primera estación y la longitud tensada del cordel (1).

4. Si se nivela a partir de un punto dado, plantar en él una estaca y de ahí continuar la nivelación.
5. Plantar la segunda estaca en un punto inferior a la primera, sobre la pendiente de caída manteniendo el alineamiento definido. Colocar verticalmente el jalón sobre la estaca y en forma similar al anterior, tender, tensar y nivelar el cordel desde la primera estaca hasta el jalón, para determinar la altura positiva (h) y la longitud horizontal (1). Repetir este procedimiento para las estaciones sucesivas, hasta alcanzar el nivel del canal inferior que constituiría la última estación.
6. El salto bruto estará dado por:

$$H_b = h + h_2 + h_3 + h_4 \dots + h_n = \sum_{i=1}^n h_i \text{ (m)}$$

7. La longitud proyectada horizontal del perfil estará dada por:

$$L = l_1 + l_2 + l_3 \dots + l_n = \sum_{i=1}^n l_i \text{ (m)}$$

8. La longitud efectiva del perfil (Z) estará dada por:

$$Z = \sqrt{h_1^2 + l_1^2} + \sqrt{h_2^2 + l_2^2} + \sqrt{h_3^2 + l_3^2} + \dots + \sqrt{h_n^2 + l_n^2} = \sum_{i=1}^n \sqrt{h_i^2 + l_i^2} \text{ (m)}$$

En la figura 4 se muestra un ejemplo práctico de nivelación aproximada por el método propuesto.

4. *Procedimiento de cálculo y determinación de especificaciones técnicas*

En este capítulo se desarrolla una secuencia de cálculo para definir las especificaciones de una Microcentral Hidroeléctrica y sus máquinas motrices.

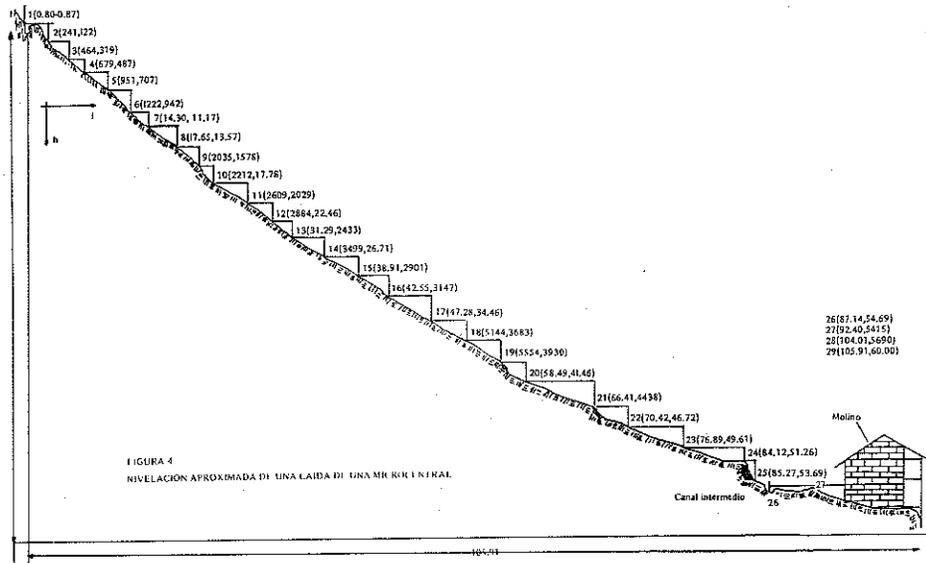


FIGURA 4
NIVELACION APROXIMADA DE UNA CAIDA DE UNA MR ROL EN FAL

4.1. Definición de potencias y eficiencias

a) Potencia en los bornes del generador

Considerando los requerimientos de capacidad instalada que se hayan determinado del análisis de la demanda (Cap. 2), luego de tomar en cuenta las pérdidas de transmisión y distribución, se establece la potencia requerida en los bornes del generador.

A continuación, debe considerarse una selección preliminar del generador a partir de especificaciones comerciales.

Para microcentrales, es recomendable el empleo de generadores de dos y cuatro polos (1 800 RPM y 3 600 RPM respectivamente a 60 Hz).

Generalmente se seleccionan alternadores, pudiendo considerarse la utilización de generadores asíncronos también.

De acuerdo a las especificaciones comerciales (catá-

logos) se selecciona un tamaño tal que la potencia resultante sea lo más próxima posible a la potencia requerida o ligeramente superior, en la siguiente forma:

$$P_g = kVA \times \cos \phi$$

donde:

P_g es la potencia del generador en kW

kVA es la potencia aparente en kilo volt amperes.

$\cos \phi$ es el factor de potencia, usualmente se fija un valor de 0.8, sin embargo, en aplicaciones rurales es frecuente la predominancia de cargas resistivas, pudiendo entonces especificarse valores mayores (0.9 – 0.95).

Una vez preseleccionado el generador, del mismo catálogo comercial, se determina su eficiencia (n_g). De no contar con este dato, se puede asumir una eficiencia del orden de 0.86.

Nota: Está a disposición de los interesados el Programa de Cálculo de Microcentrales Hidroeléctricas para minicalculadora programable Texas Instruments, Mod. TI-59, cuya descripción es la siguiente:

Calcula una variable dadas las otras tres, entre salto (m) (bruto o neto), potencia (kW) (de la central o la potencia hidráulica de la turbina), caudal (m^3/s) y/o eficiencia (fracción

decimal) (conjunto de eficiencias: hidráulica de la turbina, mecánica de la turbina, transmisión y del alternador) o sólo eficiencia hidráulica (sólo con potencia hidráulica de la turbina). Calcula asimismo las velocidades específicas (n_s y n_g) de la turbina dadas en R. P. M. Calcula Hw para Puc y acero. Nota: Asume $N_{volum} = 1$ en Nhidraul.

Solicítarlo a OLADE. Casilla 1, Quito, Ecuador.

b) *Potencia Transmitida al generador (P_{tr})*

$$P_{tr} = \frac{P_g}{\eta_g}$$

c) *Potencia al freno de la turbina (P_t)*

Si se tiene un acoplamiento directo entre la turbina y el generador, ésta será igual a la potencia transmitida al generador; si existe alguna forma de transmisión se debe considerar la eficiencia de la transmisión (η_{tr}) en la siguiente forma:

$$P_t = \frac{P_{tr}}{\eta_{tr}}$$

	η_{tr}
ENGRANAJES	0.98
BANDAS O	
FAJAS EN "V"	0.95

d) *Potencia hidráulica de la turbina (P_h)*

Considerando la eficiencia mecánica de la turbina (η_m) determinada por la presencia de pérdidas mecánicas por fricción, se determina así:

$$P_h = \frac{P_t}{\eta_m}$$

La eficiencia mecánica de la turbina, depende de sus características de diseño, para microturbinas es razonable asumir valores de η_m en el rango de 0.95 a 0.97.

e) *Potencia absorbida por la turbina (P_a)*

Se debe considerar la eficiencia hidráulica (η_h) de la turbina dada por las características hidrodinámicas de la máquina y la eficiencia volumétrica (η_v) dada por las pérdidas de agua que no circula por el rodete, en la siguiente forma:

$$P_a = \frac{P_h}{\eta_h \eta_v}$$

La eficiencia hidráulica (η_h) depende del tipo de turbina, su diseño hidráulico, las características hidrodinámicas de sus secciones de paso y las proporciones y exactitud en la construcción; en general se pueden considerar los si-

guientes rangos de valores de eficiencia máxima para máquinas de potencias inferiores a 50 kW:

	η_h
– Turbinas Axiales	0.86 – 0.92
– Turbinas Francis	0.85 – 0.90
– Turbinas Michell-Banki con buen diseño y construcción	0.75 – 0.82
– Turbinas Michell-Banki de construcción artesanal	0.60 – 0.70
– Turbinas Pelton	0.82 – 0.87

En máquinas bien construidas frecuentemente se desprecia el valor de la eficiencia volumétrica ($\eta_v = 1.0$), incorporándolo al valor de la eficiencia hidráulica. Alternativamente se pueden considerar valores del orden de 0.98 a 0.99.

En máquinas de construcción artesanal, los valores de la eficiencia volumétrica pueden ser muy reducidos llegándose a valores del orden de 0.90 o menos, considerando deficiencias en ajustes, en alineamientos e inexactitudes dimensionales de construcción o montaje, que determinan importantes fugas de agua.

4.2 Especificaciones y alternativas de selección de tubería de presión

En el presente capítulo se analiza el empleo de tuberías de acero y tuberías no metálicas, en este último caso, se presentan datos solamente para tuberías de polietileno, PVC y asbesto-cemento. Cabe señalar que es posible considerar también el empleo de otros materiales, tales como fibra de vidrio, madera y ferro-cemento.

La selección del tipo de tubo, está determinada por su disponibilidad en los diámetros y espesores requeridos y por consideraciones económicas, en las cuales hay que tomar en cuenta, tanto el precio de adquisición, como los costos de transporte, acarreo, montaje y requerimientos de accesorios.

a) *Tuberías de acero.*

Constituye la solución convencional más difundida, generalmente se emplean tubos construidos ad-hoc por medio de procesos de rolado y soldado, en consecuencia su diámetro se puede adaptar a los requerimientos del proyecto. Para diámetros pequeños, donde resulta difícilmente realizable el rolado de tubos, se pueden emplear tubos

estándar conformados en frío y soldados. En el cuadro siguiente se señalan sus características dimensionales para la serie normal (cédula 40).

DIA. NOM. (pulg)	DIA. EXT. (mm)	DIA. INT. (mm)	ESPELOR (mm)
2	60.33	52.50	3.91
2 1/2	73.03	62.71	6.16
3	88.90	77.93	5.49
4	114.30	102.26	6.02
5	141.30	128.19	6.55
6	168.28	154.05	7.11
8	219.08	202.72	8.18
10	273.03	254.51	9.27

Tuberías de Acero Cédula 40.

Pueden estar construidas en diversas calidades de acero, para acero estructural ordinario se pueden asumir los siguientes valores:

Esfuerzo de fluencia $S_f = 21 \text{ kg/mm}^2$

Factor de seguridad 1.5 sobre el esfuerzo de fluencia

Esfuerzo de diseño $S_d = 14 \text{ kg/mm}^2$

Densidad del material $= 7.85$

Si bien es la opción más difundida, el empleo de tubería de acero en Microcentrales, es en general la alternativa más costosa, tanto en cuanto a precio de adquisición, como en cuanto a costos de transporte y montaje, en razón de su peso y a la necesidad de soldadura de tramos en el campo y/o la instalación de bridas de unión entre los mismos.

b) Tuberías de polietileno

Tienen como ventajas, su costo considerablemente menor que el de las tuberías de acero, si bien mayor al de PVC y al del asbesto-cemento, su instalación es sencilla, ya que se adecúan a la conformación del terreno debido a su capacidad de deformación, requiere un mínimo de anclajes (al pie de las uniones), pueden asentarse directamente sobre el terreno y tienen requerimientos mínimos en cuanto a determinar con exactitud el perfil de la caída antes de su instalación. Asimismo, tienen una buena resistencia a la radiación solar.

Una ventaja adicional está dada por su fácil transporte, pudiendo ser arrolladas en diámetros 32 veces mayores que su diámetro nominal.

Sus principales desventajas están dadas por la necesidad de emplear coples metálicos para la unión de tramos de tubería, los cuales son costosos, requieren un montaje cuidadoso por medio de ajuste forzado en caliente y determinan elevadas pérdidas de carga por estrangulación, además estos tubos generalmente se fabrican sólo para diámetros pequeños, lo que limita su aplicación a las unidades más pequeñas.

A continuación se muestra una tabla de dimensiones de las tuberías de "Clase 10" adecuadas para presiones nominales, hasta de 10 kg/cm^2 .

DIAMETRO NOMINAL (pulg)	DIAMETRO EXTERIOR (mm)	DIAMETRO INTERIOR (mm)	ESPELOR (mm)
3	88.5	70.5	9.0
4	114.0	90.8	11.6
6	168.0	133.8	17.1
8	219.0	174.4	22.3
10	273.0	218.0	27.5

Tuberías de polietileno clase 10

Esfuerzo de rotura equivalente en tracción 2.32 kg/mm^2 (25°C)

Factor de seguridad recomendado 5

Esfuerzo de Diseño 0.464 kg/mm^2

c) Tuberías de PVC

Su costo es menor que los tubos equivalentes de acero y polietileno, pero es mayor que el de asbesto-cemento.

Los tubos de PVC son muy flexibles y se adaptan fácilmente a la conformación del terreno por su deformación elástica, además son muy livianos y fáciles de transportar. La unión de los tramos se realiza por medio de espiga y campana con un pegamento especial.

Sus principales desventajas están dadas por su tendencia a deteriorarse por la radiación solar y a su relativa fragilidad al impacto, en consecuencia conviene instalarlos enterrados.

Sus paredes lisas, determinan reducidas pérdidas de carga. Generalmente se pueden obtener para diámetros hasta de 15" y aun 20" en clase 10 (10 kg/mm² de presión nominal) y clase 15 (15 kg/mm² de presión nominal). A continuación se presenta una tabla de dimensiones de tubos estándar de PVC clase 10, hasta 10" de diámetro nominal:

DIA. NOM. (pulg)	DIA. EXT. (mm)	DIA. INT. (mm)	ESPESOR (mm)
2	60.0	53.0	3.5
2 1/2	73.0	65.0	4.5
3	88.5	78.9	4.8
4	114.0	102.0	6.0
5	141.8	126.0	7.5
6	168.0	150.2	8.9
8	219.0	195.8	11.6
10	273.0	244.0	14.5

Tuberías de PVC clase 10

Esfuerzo de rotura en tracción (25°C)	= 5-5.2 kg/mm ²
Esfuerzo de rotura en flexión	= 7.9 kg/mm ²
Esfuerzo de rotura en compresión	= 6.7 kg/mm ²
Operando a presión se recomienda un factor de seguridad de 5, a 20°C.	
Esfuerzo de trabajo	= 1.0 kg/mm ²
Densidad del material	= 1.43

d) Tuberías de asbesto-cemento

Probablemente constituyen una de las más interesantes alternativas para microcentrales, minicentrales y aún para pequeñas centrales, en razón de su bajo costo y amplia disponibilidad en una gran gama de diámetros y espesores.

Tienen excelente resistencia a las condiciones ambientales y su montaje es sencillo. Su principal desventaja está dada por su peso, bastante mayor al de los tubos de PVC y polietileno equivalentes y a su relativa fragilidad que hace recomendable su instalación bajo tierra.

Si bien son rígidos, sus uniones permiten desviaciones angulares hasta de 5°, lo que facilita su adaptación al

perfil del terreno, además sus uniones actúan como juntos de dilatación.

Sus paredes lisas determinan reducidos coeficientes de pérdida de carga, comparables con los correspondientes a tubos de PVC.

A continuación se presenta una tabla de dimensiones estándar de tubos de asbesto-cemento clase 10 (hasta 10 kg/mm² de presión nominal) y diámetros hasta de 24":

DIAMETRO NOMINAL (pulg)	DIAMETRO EXTERIOR (mm)	DIAMETRO INTERIOR (mm)	ESPESOR (mm)
4	124	100	12
6	178	150	14
8	238	200	19
10	298	250	24
12	354	300	27
14	412	350	31
16	468	400	34
18	526	450	38
20	584	500	42
24	698	600	49

Tubería de asbesto-cemento clase 10

4.3 Cálculo de pérdidas de carga, salto neto y caudal requerido.

Se propone el procedimiento que se resume a continuación. Considerando que en la etapa de diseño y especificación se deben tantear diversas alternativas y condiciones, se recomienda trasladar el proceso de cálculo señalado en el punto 4.1 y en el presente a un programa adaptable a una mini calculadora programable. En la nota de la pág. 62 se presenta un programa adecuado para una máquina Texas Instruments modelo TI-59.

Cabe señalar también que si se tienen como datos la potencia, las eficiencias y el salto bruto, es necesario determinar las pérdidas de carga y caudal por medio de un proceso iterativo.

1. Selección de tubería para el cálculo.

Según las particularidades de la aplicación, se seleccionan en forma tentativa distintos tamaños y tipos de

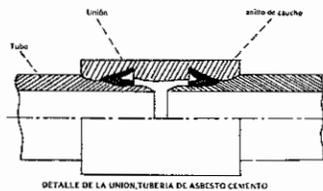
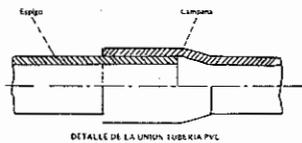
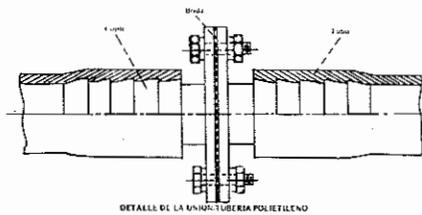


FIGURA 5

tubería, calcular las especificaciones de la central para cada caso y luego proceder a la selección final del tubo. La secuencia de cálculo se aplica para cada tipo o tamaño de tubo cuya aplicación se quiera verificar.

2. Cálculo del caudal.

$$Q = \frac{P_h}{9.807 \eta_h \eta_v H_n}$$

donde:

- P_h = Potencia hidráulica de la turbina (kW)
- η_h = Eficiencia hidráulica de la turbina
- η_v = Eficiencia volumétrica de la turbina
- H_n = Salto neto (m)
- Q = Caudal (m^3/s)

Nota: en la primera iteración se asume que no hay pérdidas de carga, en consecuencia el salto neto (H_n) será igual al salto bruto (H_b).¹

3. Cálculo de la velocidad en la tubería $C(m/s)$

$$C = \frac{4 \times 10^6 Q}{\pi D_i^2}$$

D_i = día interno de la tubería (mm)

4. Cálculo de la pérdida de carga H_w (m). Para tubería de acero con costura:

$$H_w = \left(0.7334 + \frac{0.4827}{\sqrt{C}} \right) \frac{L_T C^2}{D_i}$$

Para tuberías de PVC, polietileno y asbesto cemento.

$$H_w = \left(0.4893 + \frac{0.8217}{\sqrt{D_i}} + \frac{2.7209}{\sqrt{C D_i}} \right) \frac{L_T C^2}{D_i}$$

L_T = Longitud equivalente de la tubería (m).

Nota: no incluye pérdidas en uniones, válvulas y cambios de dirección, estos datos deben computarse separadamente.

5. Cálculo del salto neto aprovechable H_n (m)

$$H_n = H_b - H_w$$

H_b = Salto bruto (m)

6. Iterar al punto 2 con el nuevo valor de H_n y así sucesivamente hasta hallar Q con una aproximación determinada.

4.4 Verificación del espesor mínimo de la pared de la tubería de presión

$$e_{\min} = 0.001 \frac{D_i H_t}{2 S_d}$$

donde:

- e_{\min} = Espesor mínimo de la pared del tubo (mm).
 Di = Diámetro interno del tubo (mm).
 H_t = Altura máxima de diseño (m).
Equivale al salto bruto (H_b) más una tolerancia adicional por golpe de ariete.

Generalmente se determina el margen de sobrepresión por golpe de ariete en función de la velocidad del agua en la tubería, la longitud del tubo, su material y la velocidad de cierre de la válvula máxima prevista, así como la existencia de una chimenea de equilibrio.

A nivel preliminar, empleando tuberías no metálicas es usual considerar un margen de 20% ó 30% por encima del salto bruto (H_b).

- S_d = Esfuerzo de diseño a tracción del material del tubo. (kg/mm²).

Una vez determinado el espesor mínimo, se compara con el espesor real de la tubería.

Si $e_{\min} > e$ descartar la tubería.

Cabe señalar que en el diseño definitivo merecen estudiarse con mayor cuidado algunos esfuerzos localizados, principalmente en los cambios de dirección y uniones.

4.5 Cálculo del peso de la tubería

$$W_T = \frac{\pi \rho_e}{1000} L_T e (Di + e)$$

donde:

- W_t = Peso total de la tubería (Kg)
 ρ_e = Densidad del material del tubo
 L_T = Longitud del tubo (m).

4.6 Selección de diámetro de la tubería

Al margen de la especificación del material del tubo en fun-

ción de los aspectos técnicos y económicos vistos en el punto 4.2 y luego de descontadas las alternativas correspondientes por espesor insuficiente de la pared del tubo, se debe proceder a seleccionar el tubo que determine las mejores condiciones técnico-económicas de un compromiso entre pérdida de carga y valor de la inversión en un tubo de mayor diámetro.

En general la selección económica determina velocidades en el tubo entre 1 y 3 m/s.

Una aproximación al análisis económico estaría dada por el costo anual combinado expresado por:

$$C_a = \frac{V_p \times \frac{i}{100}}{1 - (1 + \frac{i}{100})^{-n}} + V_{kwh} P_b \times 8760 \times f_c \times \frac{H_w}{H_b}$$

El valor mínimo de C_a nos permite seleccionar la tubería óptima, donde:

- V_p = Valor presente de la tubería con accesorios igual a Val. Unit. de un tramo x long. de un tramo/ long. total + No. de accesorios x Val. Unit. de accesorios.
 i = Interés (o/o) anual
 n = Número de años de amortización
 V_{kwh} = Tarifa por kwh
 P_b = Potencia en los bornes del generador
 f_c = Factor de carga promedio de la planta.
 H_w = Pérdida de carga (m)
 H_b = Salto Bruto (m)

El primer término representa los costos de amortización e intereses del tubo y el segundo el valor de la energía dejada de producir por las pérdidas de carga.

4.7 Selección preliminar de la turbina

El tipo de turbina a ser empleada en cada caso, está determinado por la velocidad específica (n_s o n_q) que corresponde a las condiciones de funcionamiento dadas por la potencia, salto, velocidad (RPM) y eficiencia.

En la Fig. 6 se presenta un nomograma para selección de turbinas en función de sus parámetros principales.

Se tienen dos expresiones de velocidad específica, la primera depende de la eficiencia de la turbina y está dada por:

$$n_s = N \frac{P^{1/2}}{H_N^{5/4}}$$

donde:

P = Potencia neta en CV
 H_N = Salto neto (mt)
 N = Velocidad (RPM)

La segunda velocidad específica nos permite establecer criterios de semejanza independientes del rendimiento y está dada por:

$$n_q = N \frac{Q^{1/2}}{H_N^{3/4}}$$

donde:

Q = Caudal en m³/s

Por otra parte, se puede deducir la siguiente relación entre las dos velocidades específicas:

$$n_s = n_q \sqrt{\frac{1000}{75} n_h}$$

donde:

n_h = Eficiencia hidráulica de la turbina (fracción)

Una forma de selección consiste en la consulta a catálogos de fabricantes de turbinas estandarizadas, que permita seleccionar un tamaño estándar de un tipo de turbina dado, a partir de los datos de salto y caudal y consecuentemente determinar la velocidad de giro correspondiente. Un ejemplo muy ilustrativo de este proceso para el caso de las Turbinas Michell-Banki, aparece en el Documento "Diseño y Estandarización de Turbinas Michell-Banki" por C.A. Hernández.

Una aproximación independiente de una serie estandarizada de turbinas, asumiendo una especificación y diseño *ad-hoc* de la misma, puede realizarse en la siguiente forma:

1. Asumir una velocidad de giro de la turbina (RPM) considerando una velocidad igual o menor a la del generador; en general no conviene exceder 1800 RPM; sobre esta base se define también si la turbina estaría acoplada directamente al generador o existiría una transmisión intermedia. En este segundo caso conviene considerar los ratios de velocidad generador/turbina que permitan un determinado sistema de transmisión; en general para transmisión por fajas o bandas en "V" no conviene tener valores mayores a 3.5 aproximadamente. En transmisiones por engranajes se pueden tomar ratios mayores.
2. Especificar y diseñar en forma preliminar el sistema de transmisión generador/turbina para determinar su viabilidad técnico-económica.
3. Con la velocidad de giro de la turbina determinar sus velocidades específicas.
4. Seleccionar el tipo de turbina del nomograma o del cuadro que se muestra en la Figura 6.
5. Si se quiere profundizar en la selección de la turbina se puede determinar en forma aproximada su principal dimensión dada por el diámetro del rodete.

Para el caso de Turbinas Michell-Banki, el diámetro del rodete está dado por la siguiente ecuación:

$$D_v = \frac{39.85\sqrt{H_n}}{N}$$

donde:

D_v = Diámetro del rodete (m)
 H_n = Salto neto (m)
 N = RPM de la turbina

y para el caso de Turbinas Pelton

$$D_v = \frac{41.45\sqrt{H_n}}{N}$$

donde:

D_v = Diámetro Pelton (m), o sea dos veces el radio determinado por el eje del chorro tangente al rodete.

Estas fórmulas se derivan de consideraciones técnicas que relacionan la velocidad óptima con el salto neto, para un determinado ángulo de ingreso del chorro y coeficientes experimentales típicos para las pérdidas en el inyector y el rodete.

- Si el diámetro del rodete determinado resulta en una magnitud poco adecuada o si se quieren fijar valores estandarizados para el mismo, se pueden adecuar las fórmulas para determinar la velocidad de giro a partir de un diámetro dado de rodete, debiendo luego volver al paso 3.

En el caso de Turbinas Pelton, cabe señalar que se puede emplear más de una tobera (usualmente hasta un máxi-

mo de seis), en este caso el diámetro del rodete es proporcional a la raíz cuadrada del número de toberas.

TIPO DE TURBINA	n_s	n_q	$H_{\text{máx. adm.}}$
Pelton de una tobera	10 a 29	3 a 9	1800 a 400
Pelton de dos o más toberas	29 a 59	9 a 18	400 a 350
Michell-Banki	29 a 220	9 a 68	400 a 80
Francis lenta	59 a 124	18 a 38	350 a 150
Francis normal	124 a 220	38 a 68	150 a 80
Francis rápida	220 a 440	68 a 135	80 a 20
Hélice y Kaplan	342 a 980	105 a 300	35 a 5

