

**DIMENSIONAMIENTO DE UNA MICROCENTRAL
HIDROELÉCTRICA**

**MAIRA GINET RODRÍGUEZ PEDRAZA
FREDY ALDEMAR TORRES FERREIRA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE ELECTRICA, ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

2006

**DIMENSIONAMIENTO DE UNA MICROCENTRAL
HIDROELÉCTRICA**

**MAIRA GINET RODRÍGUEZ PEDRAZA
FREDY ALDEMAR TORRES FERREIRA**

**Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar
el título de Ingeniero Electricista**

**Director
Msc. ARNULFO GALÁN**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE ELECTRICA, ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

2006

NOTA DE ACEPTACIÓN

Presidente de Jurado

Jurado

Jurado

Bucaramanga, Noviembre del 2006

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCION	1
1. GENERALIDADES	3
1.1. MCH en derivación	4
1.2. Elementos de un sistema de micro hidrogenación.	4
1.3. Información Parque Ecológico El Portal	5
1.3.1. Abastecimiento de energía	6
1.3.2. Demanda	6
2. METODOLOGÍA	7
3. OBTENCIÓN DE DATOS	8
3.1. Determinación del caudal Q	8
3.1.1. Método de medida del área transversal y de la velocidad media	8
3.2. Determinación de la altura	10
4. OBRAS CIVILES	12
4.1. OBRA DE CAPTACIÓN	12
4.1.1. Diseño de la obra de captación	14
4.1.1.1. Desripiador	16
4.2. OBRA DE CONDUCCIÓN	19
4.3. CÁMARA DE CARGA	25
4.3.1. Dimensionamiento de la cámara de carga	25
4.4. TUBERIAS FORZADAS	30
4.4.1. Dimensionamiento de las tuberías forzadas	33
4.4.1.1. Diámetro de la tubería	33
4.4.1.2. Pérdidas en la tubería	33
4.4.1.2.1. Pérdidas en la rejilla	34
4.4.1.2.2. Pérdidas de entrada	35
4.4.1.2.3. Pérdidas en los codos	36
4.4.1.2.4. Pérdidas por fricción en el tubo	37

4.4.1.2.5. Pérdidas en válvulas	39
4.4.1.2.6. Pérdidas por estrechamiento de la tubería	39
4.4.1.3. Espesor de la tubería	40
4.4.1.4. Apoyos	48
4.4.1.5. Anclajes	49
5. CASA DE MÁQUINAS	52
5.1. Empalme entre la tubería de presión y la boca de la turbina	53
5.2. Sistema de transmisión de energía mecánica entre la turbina y el generador	54
5.3. Selección de la turbina	55
5.3.1. Turbinas de acción	55
5.3.1.1. Turbinas Pelton	55
5.3.1.2. Turbinas Turgo	56
5.3.1.3. Turbinas de flujo cruzado	56
5.3.2. Turbinas de reacción	57
5.3.2.1. Turbinas Francis	57
5.3.2.2. Turbinas Kaplan y de hélice	58
5.4. Transmisión mecánica entre la turbina y el generador	60
5.5. Fundamentos para la selección del generador	64
5.5.1. Tipos de generadores utilizados en MCH	64
5.5.1.1. Generador Síncrono	64
5.5.1.1.1. Regulación de tensión	65
5.5.1.1.2. Criterios de selección	66
5.5.1.1.3. Inconvenientes principales para su uso	67
5.5.1.2. Generador de Inducción	67
5.5.1.2.1. Funcionamiento independiente	68
5.5.1.2.2. Regulación de tensión	68
5.5.1.2.3. Criterios de selección	69
5.5.1.2.4. Inconvenientes principales para su uso	70
5.5.2. Selección del generador	70
5.6. Potencia generada	71
5.7. Regulador de carga	71

5.7.1. Regulación de velocidad por medio del caudal de agua en la turbina	72
5.7.1.1. Regulación manual	73
5.7.1.2. Regulación automática	73
5.7.2. Regulación de velocidad por regulación de carga	74
5.7.2.1. Regulación manual	74
5.7.2.2. Regulación automática	74
5.7.2.2.1. Componentes	75
5.7.3. Clasificación de los reguladores de carga	76
5.7.3.1. Características Técnicas controladores Thomson & Howe	76
5.7.3.2. Equipo opcional del regulador	78
5.7.4. Selección del regulador de carga	78
5.8. Subestación	79
6. Observaciones	80
7. Bibliografía	81
8. Anexos	83

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Esquema general de una MCH	2
Figura 2. Ubicación Parque Ecológico El Portal	5
Figura 3. Cálculo sección transversal	10
Figura 4. Dimensiones obra de captación	15
Figura 5. Medidas canal rectangular	18
Figura 6. Alturas de seguridad canal de conducción	20
Figura 7. Medidas canal de conducción	25
Figura 8. Cámara de carga	28
Figura 9. Perfil de la tubería de presión	32
Figura 10. Pérdidas en la rejilla por fricción	34
Figura 11. Coeficiente de pérdidas en la entrada de la tubería	35
Figura 12. Coeficiente de pérdidas en las válvulas	37
Figura 13. Apoyos	45
Figura 14. Anclajes para variar pendiente horizontal y vertical	46
Figura 15. Dimensiones para variar pendiente en un anclaje	47
Figura 16. Dimensiones anclaje	50

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Valores del coeficiente e en función de a/H	18
Tabla 2. Límites de velocidad del agua en el canal según el tipo de suelo o de revestimiento	22
Tabla 3. Valores de n	23
Tabla 4. Medidas tubería de presión	25
Tabla 5. Coeficiente de pérdidas K_K para codos de tubos circulares	35
Tabla 6. Pérdidas en cada uno de los codos	35
Tabla 7. Valores de k para calcular el factor de fricción	36
Tabla 8. Rangos de aplicación de las turbinas	59
Tabla 9. Características principales de las turbinas hidráulicas	59
Tabla 10. Número de bandas especiales tipo 8v de acuerdo con la potencia del generador	62
Tabla 11. Relación de transmisión con diámetros de poleas estandarizados para bandas tipo 8V.	62
Tabla 12. Velocidades máximas recomendadas para transmisión con Correas	64
Tabla 13. Precios de los controladores	79

LISTA DE ANEXOS.

	Pág.
Anexo A. Diagrama de selección de turbinas	84
Anexo B. Diagrama de selección de turbinas	85
Anexo C. Curvas de rendimiento de turbinas	86
Anexo D. Foto de la quebrada fuente de energía	87
Anexo E. Foto estructuras existentes	88

TITULO. DIMENSIONAMIENTO DE UNA MICROCENTRAL HIDROELECTRICA *

AUTORES

Maira Ginet Rodriguez Pedraza
Fredy Aldemar Torres Ferreira **

PALABRAS CLAVES.

Hidroeléctrica
Caudal
Casa de máquinas
Turbinas

DESCRIPCION

Este proyecto tienen como fin proporcionar las primeras pautas necesarias en el dimensionamiento de una microcentral hidroeléctrica ubicada en la finca el portal ubicada en el municipio de Rionegro (Santander); en la primera parte se exponen y calculan algunos parámetros del dimensionamiento como lo son las alturas y dimensiones de la obra de captación; seguidamente se tratan temas relacionados con la obra de conducción. Además de ello se calculan también parámetros de diseño como lo son las alturas de seguridad de las paredes de la conducción y otros no menos importantes. En la segunda parte del proyecto se discuten situaciones referentes a la cámara de carga como lo son sus dimensiones y la forma de la misma.

En la segunda mitad del proyecto se tratan y establecen variables relacionadas con la tubería de presión y la casa de máquinas; con respecto a la tubería de presión se calculan parámetros con sus dimensiones, estos abarcan medidas como su diámetro, material de construcción, inclinación, número de codos y empalme con la válvula de cierre; finalmente y con respecto a la casa de máquinas se definen las características y dimensiones de los elementos que la componen como la turbina, el generador y el sistema de control al igual que la válvula de cierre; se seleccionó la turbina teniendo en cuenta los rendimientos de cada una de las turbinas presentes en el mercado, los rangos de aplicación así como el caudal aplicable para cada diseño; de la misma forma se elige el tipo de generador, dependiendo de sus características, su rendimiento y fiabilidad así como su facilidad de instalación de acuerdo al tipo de turbina escogido (Michelle-Banki), adicionalmente se selecciona el sistema de control necesario de acuerdo al tipo de generador seleccionado (Síncrono); cabe anotar que en dicho estudio no se tienen en cuenta factores económicos de ninguno de los equipos existentes en el mercado, esto no implica necesariamente que el diseño sea el más costoso del mercado, hay que tener en cuenta que dentro de los factores y parámetros de diseño siempre se tuvo presente la facilidad de instalación y mantenimiento, por lo que se puede decir que corresponde a un criterio económico de selección.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Físico - Mecánicas.
Escuela de Ingenierías Eléctrica y Electrónica.
Director: Arnulfo Galan. Msc.

TITLE. DESIGN OF A MICROCENTRAL HYDROELECTRIC*

AUTHORS

Maura Ginet Rodriguez Pedraza
Freddy Aldemar Torres Ferreira **

CLUE WORDS.

Hydroelectric
Flow
Machine House
Turbines

DESCRIPTION

The object of this project is to provide the necessary directions in the design of a micro central hydroelectric located in the farm El Portal located in Rionegro (Santander); in the first part there are shown and calculated some parameters of the design like the high and dimensions of the capitation structure; then there are treated topics related with the conduction structure. Also there are calculated parameters of the design like the security high of the walls of conduction and another less important. In the second part of the project there are discuss situations that refers to the charge chamber like the dimensions and the shape.

In the second part of the project there are treated and established variables related with the pressure plumbing and the Machine house; with relation to the pressure plumbing there are calculated parameters like its dimensions, they include its diameter, construction material, inclination, number of elbows and the join with the closing valve; finally and related to the machine house there are define the characteristics and dimensions of the elements that compose the turbine, the generator and the control system and also the closing valve; the turbine was selected according to the efficiency of each one of the turbines present in the market, the ranges of applications and also the flow apply to each design; in the same way there was chosen the type of generator, depending on its characteristics, its efficiency and the facility of installation according to the type of turbine that was chosen (Michelle-Banki), in addition it was chosen the control system necessary according to the generator typo selected; it is important to mention that in this study the economic factor of any of the machines was taken into account, this imply that the design is the most expensive of the market, is necessary to have into account that in the factors and parameters of design the facility of installation and maintenance where always present, so it could be said that it correspond to a economic judgment of selection.

* Degree Project

** Physic-Mechanic Science Faculty, Electric, Electronic and Telecommunications Engineering School, directed by Arnulfo Galán

INTRODUCCIÓN

La energía constituye uno de los elementos fundamentales para el desarrollo económico, productivo y social, debido a que su disponibilidad determina en gran medida los niveles de productividad, las posibilidades de desarrollo agroindustrial y las condiciones y calidad de vida de los pobladores [2].

Las zonas aisladas no interconectadas al sistema interconectado nacional poseen un desarrollo limitado y deficientes servicios públicos, mitigados mínimamente con el uso de plantas eléctricas de combustible fósil, caracterizadas por un elevado costo del kWh generado, por cuanto la dificultad de acceso aumenta el costo del combustible, y su mantenimiento y operación se realiza con operarios no calificados. Las condiciones topográficas e hidrológicas de estas regiones facilitan la creación de Microcentrales Hidroeléctricas (MCH) para el suministro de energía a estas comunidades [3].

Aunque el desarrollo de una Microcentral Hidroeléctrica (MCH) requiere costos de inversión inicial elevados, comparadas con las plantas térmicas de igual capacidad, se ha demostrado que a largo plazo las microcentrales hidroeléctricas son económicas respecto al consumo, con una mayor vida útil, sin estar sujetas a los incrementos en los precios de combustibles y mantenimiento durante su operación [7].

Los aprovechamientos hidroeléctricos convencionales, en los que la importancia de la obra civil y la necesaria inundación de grandes áreas para embalsar el agua y crear altura de salto, dan lugar a importantes impactos en el entorno, los pequeños aprovechamientos - considerando como tales los de potencia instalada

no superior a 100 kW - , se integran fácilmente en el ecosistema más sensible si están bien diseñados [2].

Así las instalaciones hidroeléctricas de pequeño tamaño representan por lo tanto una importante fuente energética renovable y pueden contribuir activamente al desarrollo sostenible del territorio en el que se implantan [2].

1. GENERALIDADES

Una MCH es una instalación donde se utiliza la energía hidráulica para generar cantidades reducidas de electricidad por medio de uno o más grupos turbina – generador [2].

Las MCH están constituidas por elementos (obras civiles y equipos electromecánicos), que permiten aprovechar el agua para la generación de energía eléctrica. En la figura 1 se muestra el esquema general de una MCH [2].

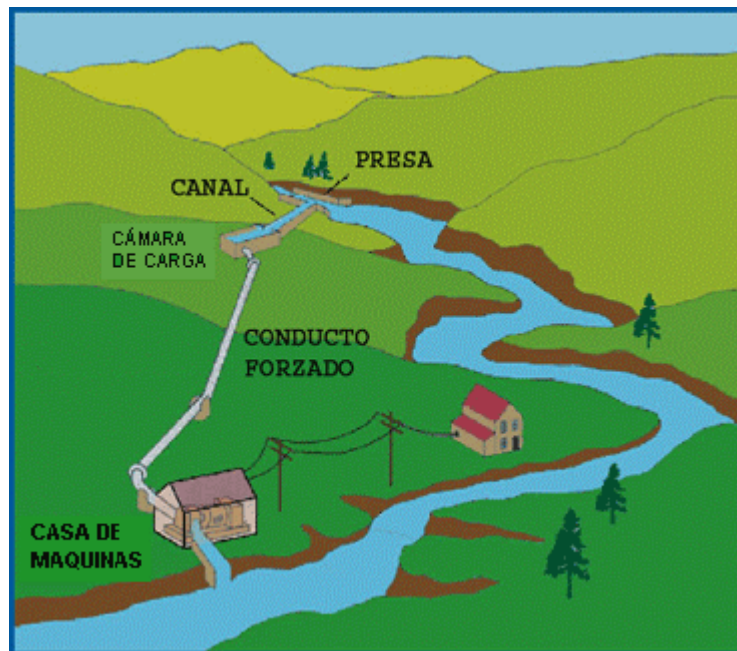


Figura 1. Esquema general de una MCH [13]

En una microcentral hidroeléctrica el agua se canaliza hacia la cámara de carga colocada en el nivel superior: desde este punto, a través de conductos forzados, el agua se canaliza a la turbina que se encuentra más abajo en la casa de

máquinas. La energía del agua, pasando a través de la turbina, determina la rotación del rotor de la turbina misma [2].

El eje del rotor que gira está conectado al alternador que produce la energía eléctrica. La potencia eléctrica que se puede obtener de una central hidroeléctrica depende de la cantidad de agua canalizada en la turbina, de la altitud del salto, y además del rendimiento eléctrico del generador [2].

El agua que sale de la turbina es devuelta a su curso original a un nivel más bajo respecto al que fue recogida [2].

1.1.MCH EN DERIVACIÓN

Un sistema de derivación no detiene el caudal del río sino que desvía una parte a un canal que luego se lleva por una tubería hacia la turbina. La mayoría de los sistemas de MCH son del tipo de derivación. La desventaja de este método es que el agua no se puede almacenar de una estación de lluvias a una estación seca, su ventaja está en que el sistema puede construirse localmente a un bajo costo y su simplicidad proporciona una mayor confiabilidad a largo plazo. Los sistemas de derivación son preferibles a la hora de analizar los daños ambientales, dado que las características estacionales del flujo aguas debajo de la instalación no son afectadas y tampoco hay necesidad de inundar los valles ubicados aguas arriba de la instalación [2].

1.2.ELEMENTOS DE UNA MCH

Los elementos que componen la MCH son:

- Bocatoma: Es la obra mediante la cual se toma el caudal que se requiere para obtener la potencia de diseño; su construcción es sólida, ya que debe soportar las crecidas del río [3].

- Obra de conducción: Se encarga de conducir el caudal desde la bocatoma hasta el tanque de presión, posee una pequeña pendiente; en la mayoría de los casos suele ser un canal, aunque también un túnel o una tubería [3].
- Desarenador: Es necesario que las partículas en suspensión que lleva el agua sean decantadas, por ello al final de la obra de conducción se construye un tanque de mayores dimensiones que el canal, para que las partículas pierdan velocidad y caigan al fondo del desarenador [3].
- Tanque de presión: En esta obra, la velocidad del agua es prácticamente cero, empalma con la tubería de presión, sus dimensiones deben garantizar que no ingresen burbujas de aire en la tubería de presión, permitir el fácil arranque del grupo turbina – generador y amortiguar el golpe de ariete [3].
- Aliviadero: Con estas obras se elimina el caudal de exceso que se presenta en la bocatoma y en el tanque de carga, y se regresa al cauce del aprovechamiento [3].
- Tubería de presión: Mediante la tubería de presión se conduce el caudal de diseño hasta la turbina; está apoyada en anclajes que le ayudan a soportar la presión generada por el agua y la dilatación que ocurre por variación de temperatura [3].
- Casa de máquinas: En ella se encuentra el grupo turbina - generador, encargado de transformar la energía hidráulica en mecánica, la mecánica en eléctrica y, mediante el sistema de transmisión, llevarla al usuario [3].

1.3. INFORMACIÓN PARQUE ECOLÓGICO EL PORTAL

El Parque Ecológico El Portal es un lugar para la recreación y el descanso de las familias bumanguesas y de aquellos que visitan Santander, posee aguas cristalinas, vegetación exuberante y una construcción con conciencia ecológica. Se encuentra ubicado en el municipio de Rionegro, a 35 minutos de la capital santandereana, sobre la vía principal que de Bucaramanga conduce hacia la Costa Atlántica, exactamente en el kilómetro 24 [10].

1.3.1. Abastecimiento de Energía

Actualmente las instalaciones de El Parque Ecológico El Portal reciben suministro de energía eléctrica de la red de la ESSA.



Figura 2. Ubicación Parque Ecológico El Portal [10]

1.3.2. Demanda

La necesidad primordial es suplir la totalidad o parte de la demanda que se genera en el área del restaurante, que depende de la potencia que se puede generar de acuerdo al caudal y la altura que se dispone. Actualmente la carga instalada es de 9 kW.

Luego de observar una factura de energía eléctrica del área del restaurante, se pudo calcular la potencia media consumida.

La potencia media P_{med} equivale a:

$$P_{med} = A / T_o \quad (1)$$

donde A es la energía total en kWh, suministrados durante el tiempo T_o .

En este caso T_o es 720 que son las horas totales de un mes (30 días), ya que A son los kWh/mes promedio del recibo de energía eléctrica.

$$P_{med} = 2342 / 720 \quad (2)$$

$$P_{med} = 3.2528 \text{ kW} \quad (3)$$

2. METODOLOGÍA

Para realizar el presente proyecto, se inició por conseguir bibliografía, lo que permitió obtener información sobre los pasos a seguir así como la información básica necesaria para poder comenzar a hacer los cálculos. Seguidamente se realizó una visita al Parque Ecológico El Portal, se localizó la fuente de agua, así como cada una de las estructuras que ya se encuentran construidas y la posible ubicación de la casa de máquinas. En varias ocasiones se tomaron las medidas de caudal y altura, necesarias para realizar el diseño de cada uno de los elementos que forman parte de la microcentral.

Con base en los datos obtenidos, se procedió a hacer los cálculos de los elementos de la obra civil, obteniendo las medidas para cada una de las partes. Se escogieron, además, cada uno de los elementos electromecánicos que se deben ubicar en la casa de máquinas.

3. OBTENCIÓN DE DATOS

3.1. DETERMINACIÓN DEL CAUDAL, Q

Este valor suele variar en algunas regiones de acuerdo a las estaciones, y a otros fenómenos climáticos. Generalmente se necesita el valor medio, o normal, del caudal de un arroyo a los fines de poder dimensionar los equipos y demás instalaciones. Es importante establecer que la medición del caudal sea representativa del valor medio. Es frecuente que los ingenieros y proyectistas de sistemas hidráulicos con microturbinas, se planteen estimar con excesiva precisión los valores del caudal medio de los arroyos. En obras de gran envergadura, la estimación exacta del caudal puede ser crucial, y por lo tanto, se justifica un estudio o una recopilación de los aforos de los caudales durante muchos años. En cambio, en el caso de pequeños recursos hidráulicos (inferiores a los 100 kW), es irrelevante que la estimación de la altura y el caudal se realice con un error menor al 10 % [8].

Para la medición del caudal de la quebrada y del canal se utilizó el método de medida del área transversal y de la velocidad media.

3.1.1. Método de medida del Área Trasversal y de la Velocidad Media

Calculo del área de la sección transversal.

Para calcular el área de la sección transversal, se recomienda descomponerla en una serie de trapecios como muestra la figura 3. Midiendo sus lados con ayuda de

unas reglas graduadas, colocadas en la forma que indica la figura, el área de la sección mojada del cauce vendrá dada por la ecuación [1]:

$$S = b * \frac{h_1 + h_2 + \dots + h_n}{n} \quad [4]$$

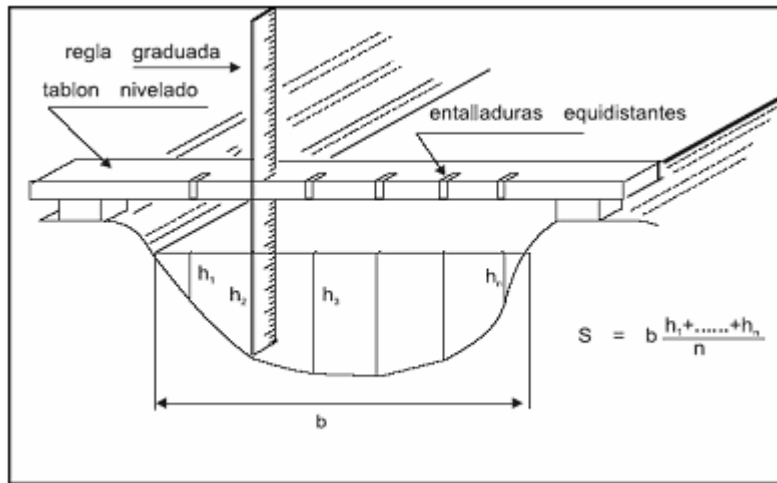


Figura 3. Calculo sección transversal [1]

A continuación se tabulan los datos tomados en el río cada 30 centímetros:

cm	30	60	90	120	150	180	210	240
h	27,0	29,5	32,6	37,3	38,5	47,0	49,5	48,5
cm	270	300	330	360	390	420	450	480
h	46,0	40,2	39,5	34,7	29,4	27,0	23,6	19,5

Promediando los datos tomados y teniendo en cuenta que el ancho del río es $b=5,15$ metros se tiene que la sección transversal en el río es aproximadamente:

$$S = 5,15 * (5,698 / 16) = 1,83 \text{ m}^2 \quad (5)$$

Cálculo de la velocidad media en la sección transversal

Para medir la velocidad de corriente se puede utilizar la técnica que se describe a continuación [1].

- Mediante un flotador

Se coloca un objeto flotante no muy ligero - por ejemplo un tapón de madera – en el centro de la corriente y se mide el tiempo t (en segundos) que necesita para recorrer una longitud L (en metros). El método no es utilizable en cauces de perfil irregular o de muy poca profundidad, pero se obtienen resultados aceptables si se escoge un tramo relativamente recto y de sección uniforme. La velocidad superficial, en m/seg, vendrá dada por la fórmula [1]:

$$V_s = \frac{L}{t} \quad (6)$$

Está claro que la velocidad V_s no es la velocidad media V de la sección. Para obtener V habrá que multiplicar V_s por un factor, que puede variar entre 0,60 y 0,85, dependiendo de la profundidad del cauce y de la rugosidad de su fondo y orillas (0,75 es un coeficiente generalmente aceptado) [1].

Se tomó el tiempo que dura un pedazo de madera pequeño en recorrer una longitud de 5 metros, los datos tomados son los siguientes:

t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7	t8	t9	t10
12,5	14,2	12,3	13,3	13,8	13,5	14,8	11,8	14,0	12,6

Luego de promediar los datos se obtiene que la velocidad media de la sección observada es aproximadamente:

$$V = 0,75 \cdot V_s = 0,75 \cdot (5 / 13,28) = 0,282 \text{ m/s} \quad (7)$$

Con estos datos se obtiene el caudal utilizando la siguiente ecuación:

$$Q = S \times V \quad (8)$$

$$Q = 0,5165 \text{ m}^3/\text{s} \quad (9)$$

3.2. DETERMINACIÓN DE LA ALTURA

Se entiende por altura – H – la diferencia de altura que existe, entre el nivel de la superficie del espejo de agua y el nivel del piso de la sala de máquina. Cuanto mayor es esta altura, mayor será el potencial energético para un mismo caudal, y, en consecuencia, menor será el tamaño requerido de la microturbina y mayor el número de revoluciones de su eje, para producir la misma cantidad de energía [8].

Por lo general, se requiere precisiones de 3% o más, puesto que la caída es un parámetro importante en el diseño del sistema. Es recomendable realizar tres mediciones y analizar los resultados en el lugar con el propósito de corregirlos, u obtener nuevas medidas en el caso que fuera necesario (si las tres mediciones realizadas son demasiado discordantes) [8].

Las medidas de altura se realizaron directamente con un metro en el lugar, debido a que la altura es pequeña y el terreno se presta para poder hacer las mediciones.

$H = 8 \text{ m}$

4. OBRAS CIVILES

En este capítulo se describen y llevan a cabo los cálculos de diseño de los diferentes elementos que constituyen la obra civil, tales como la obra de captación, canal de conducción, cámara de carga, tuberías y otros presentes en los esquemas de construcción para microcentrales hidroeléctricas.

4.1. OBRA DE CAPTACIÓN

En general la obra de captación se debe realizar de forma que bajo cualquier condición de caudal del río se tome aproximadamente la misma cantidad de caudal, por ello es indispensable conocer el caudal en estiaje para determinar de esta forma el caudal mínimo de captación para la generación; posteriormente se determinará según las características del río el tipo de captación que se debe realizar, teniéndose entre las mas conocidas las siguientes [3]:

- Captación convencional
- Captación con toma lateral con espigones
- Captación en el lecho

En la toma convencional se dispone de un azud que eleva el nivel del agua a un nivel determinado necesario para realizar la captación, el caudal tomado se hace pasar por el desripador a fin de eliminar el material sólido que ha logrado pasar por la rejilla de filtrado, de esta forma y finalmente se lleva el caudal a la obra de conducción; en la captación con toma lateral con espigones el caudal es llevado directamente del río sin ninguna obra en el cauce, en este tipo de captación la toma está expuesta a graves deterioros por avenidas del río, por ello y teniendo en

cuenta que el río seleccionado presenta constantes avenidas en épocas de lluvia se hace insegura esta captación para nuestro caso específico. Por último se mencionará la captación en el lecho que posee las siguientes características [3]:

- El caudal de diseño se toma del lecho del río por medio de una estructura extendida a lo ancho del cauce la cual está acompañada de una rejilla y un colector fijado en dirección del flujo.
- Este tipo de obra requiere de una gran cantidad de material y tecnologías que en algunos casos llegan a ser inaccesibles en comunidades apartadas.
- En tiempo de estiaje la obra puede llegar a tomar la totalidad del cauce del río dejándolo seco aguas abajo de la toma [3].

De esta forma y teniendo en cuenta que se dispone de bajo capital se hace imposible la implementación de este último tipo de captación, para este caso específico y debido a que el río presente características como pendiente fuerte del río, crecidas súbitas con gran cantidad de piedras, pequeño contenido de sedimentos finos y agua limpia en estiaje, se hace apropiada la captación convencional que conlleva las siguientes obras de construcción [3]:

- Un azud que cierra parcialmente el cauce del río obligando al agua por debajo de su cresta a pasar a la conducción.
- Una compuerta de lavado que se construye en el extremo del azud, con el fin de eliminar el material sólido depositado frente a la toma de agua, con el fin de evitar la disminución del caudal de captación provocado por el mismo.
- La toma de agua debe poseer una rejilla que impida la entrada directa de sedimentos gruesos a la conducción [3].
- Una compuerta de admisión ubicada en el extremo de la obra de captación que permita interrumpir total o parcialmente el caudal de conducción con el fin de efectuar labores de mantenimiento o limpieza.

Ahora que se ha determinado el tipo de toma que se construirá se procede al diseño.

4.1.1. Diseño de la obra de captación

En este punto se debe tener en cuenta que el caudal tomado directamente del río también abastece otros servicios de la finca, estos caudales adicionales suman un total de $0,0468\text{m}^3/\text{s}$, de esta forma y teniendo en cuenta que el caudal total del río es de $0,5165\text{m}^3/\text{s}$ y que el caudal máximo que se debe tomar de un río pequeño es del 33,3%, esto nos obliga tomar un caudal de $0,1252\text{m}^3/\text{s}$ para la generación.

La altura sobre el umbral debe ser $0,82\text{m}$ como mínimo, para este caso se toma $Y_1 = 0,82\text{m}$; la altura del agua es $H = 0,3\text{m}$; el desnivel entre las superficies de agua es $Z = 0,1\text{m}$; la altura del desripiador es $Y_2 = 1,02\text{m}$; el ancho de los barrotes es $a' = 0,1\text{m}$; la velocidad de entrada a los barrotes es $V_e = 1,1\text{m/s}$; la separación de los barrotes es $b' = 0,2\text{m}$; la altura de la ventana de la toma de agua es $h' = 1\text{m}$; la elevación del agua bajo el vertedero sobre la cresta es

$$h_n = H - Z = 0,3\text{m} - 0,1\text{m} = 0,2\text{m} \quad (10)$$

La altura del agua en el desripiador es

$$h = Y_2 + h_n = 1,02\text{m} + 0,2\text{m} = 1,22\text{m} \quad (11)$$

En la figura 4 se especifican las dimensiones de la obra.

Según Bazin, s es igual a

$$s = 1,05*(1+0,2*(h_n/Y_2))*(Z/H)^{1/3} \quad (12)$$

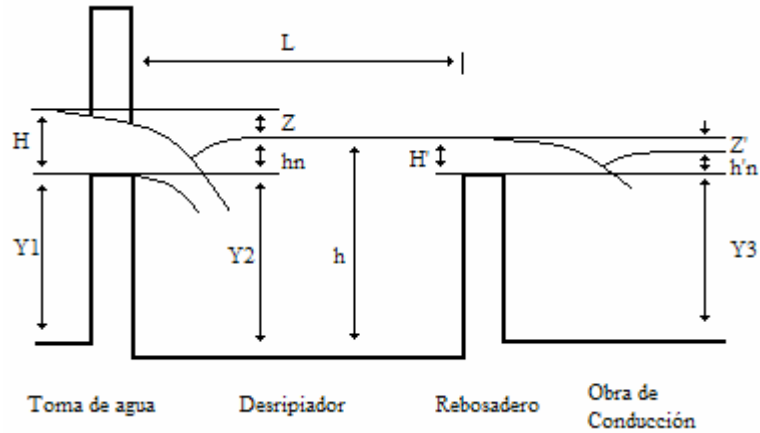


Figura 4. Dimensiones obra de captación

$$s = 1,05 \cdot (1 + 0,2 \cdot (0,2/1,02)) \cdot (0,1/0,3)^{1/3} \quad (13)$$

$$s = 0,7566 \quad (14)$$

donde s es el coeficiente de corrección de sumersión

Según Konovalov, M es igual a

$$M = [0,407 + (0,045 \cdot H)/(H + Y_1)] \cdot [1 + 0,285 \cdot (H/(H + Y_1))^2] \cdot (2 \cdot g)^{1/2} \quad (15)$$

$$M = (0,407 + 0,045 \cdot 0,3/(0,3 + 0,82)) \cdot (1 + 0,285 \cdot (0,3/(0,3 + 0,82))^2) \cdot (2 \cdot 9,8)^{1/2} \quad (16)$$

$$M = 1,8932 \quad (17)$$

Adicionalmente se toma un coeficiente por pérdida en los barrotes de 0,95 de forma que para el caudal captado se obtiene:

$$0,1252 = 0,95 \cdot 0,7566 \cdot 1,8932 \cdot b_1 \cdot 0,3^{3/2} \quad (18)$$

$$b_1 = 0,5599 \quad (19)$$

Se determina el número de espacios

$$n = b_1/b' = 0,5599/0,2 = 2,7995 \quad (20)$$

$$n \approx 3 \quad (21)$$

donde b' es la separación entre los barrotes

El número de barrotes es

$$N = n-1 = 2 \quad (22)$$

El ancho total de la reja de la toma de agua es

$$B = b_1 + N \cdot a' = 0,5599 + 2 \cdot 0,1 \quad (23)$$

$$B = 0,7599 \text{ m} \quad (24)$$

Se determina la velocidad media anual V_r :

$$V_r = Q_m / P \quad (25)$$

$$V_r = 0,5165 / 1,92 \quad (26)$$

$$V_r = 0,269 \text{ m/s} \quad (27)$$

Se determina el ángulo α

$$\alpha = \arcsin (0,269 / 1,1) \quad (28)$$

$$\alpha = 14,1501^\circ \quad (29)$$

Es decir, la toma de agua debe tener un ángulo $14,1501^\circ$ con la dirección del río; la altura del azud es igual a:

$$H'' = Y_1 + H \quad (30)$$

$$H'' = 1 + 0,3 = 1,3 \text{ m} \quad (31)$$

4.1.1.1. Descripiador

Para el dimensionamiento del descripiador se debe tener en cuenta la naturaleza de los residuos sólidos arrastrados por el río; en el río del cual se abastece la obra se presentan gran cantidad de residuos sólidos de muy pequeño tamaño, esto debido a que es un río arenoso y que por tal motivo no conlleva residuos o piedras

de gran tamaño, debido a ello se han seleccionado las siguientes medidas para realizar la transición por el desripiador:

$$h_n' = 0,05\text{m}$$

$$H' = 0,12\text{m}$$

$$Y_3 = 1\text{m}$$

$$Z' = 0,07\text{m}$$

$$Y_2 = 1,02\text{m}$$

De esta forma el caudal que se trasladará hacia la conducción a través del rebosadero debe tener un ancho igual a:

$$b_2 = Q/(s*M*H'^{3/2}) \quad (32)$$

Según Bazin, s es igual a:

$$s = 1,05*(1+0,2*(h_n'/Y_2))*(Z'/H')^{1/3} \quad (33)$$

$$s = 1,05*(1+0,2*(0,05/1,02))*(0,07/0,12)^{1/3} \quad (34)$$

$$s = 0,8859 \quad (35)$$

Según Konovalov, M es igual a:

$$M = [0,407+(0,045*H')/(H'+Y_2)]*[1+0,285*(H'/(H'+Y_2))^2]*(2*g)^{1/2} \quad (36)$$

$$M=(0,407+0,045*0,12/(0,12+1,02))*(1+0,285*(0,12/(0,12+1,02))^2)*(2*9,8)^{1/2} \quad (37)$$

$$M = 1,8286 \quad (38)$$

Así se encuentra el ancho del vertedero como sigue:

$$b_2 = 0,1252/(0,8859*1,8286*0,12^{3/2}) \quad (39)$$

$$b_2 = 1,8592\text{m} \quad (40)$$

La longitud del desripiador puede considerarse como la longitud de una transición:

$$L_d = (b_1 - b_2) / 2 * \tan(12.5^\circ) \quad (41)$$

La pendiente del canal del desripador debe ser elevada de forma que en el proceso de limpieza se pueda arrastrar todo tipo de piedras y elementos sólidos que hayan logrado pasar por la rejilla; esta pendiente se determina de la siguiente forma:

$$j_c = v^2 * n^2 / R^{4/3} \quad (42)$$

En esta expresión v es la velocidad del agua, n es el coeficiente de rugosidad ($n=0,025$ para un fondo con piedras) y R es el radio hidráulico; Si el gradiente del río es superior al gradiente del canal no se presentarán dificultades a la hora de la evacuación de los residuos sólidos, si por el contrario el valor del gradiente del río es inferior al valor del desripador se debe hacer el canal mas ancho o se debe levantar el fondo del desripador [3].

De esta forma y de acuerdo con las medidas que se hallaron para el desripador, este tendrá las siguientes medidas:

Altura de 1m

Ancho de 1m

La velocidad de evacuación es igual a:

$$V = 3 \text{ m}^3/\text{s} \quad (43)$$

De esta forma se tiene:

$$\text{Área del canal } A = 1 * 1 \text{ m}^2 = 1 \text{ m}^2 \quad (44)$$

$$\text{Perímetro mojado } P = 1 + 1 + 1 \text{ m} = 3 \text{ m} \quad (45)$$

$$\text{Para } R \text{ tenemos } R = A/P = 1/3 \quad (46)$$

$$\text{El radio hidráulico } R = 0,3333 \quad (47)$$

Entonces para la pendiente del canal se tiene:

$$j_c = 3^2 * 0,025^2 / 0,3333^{4/3} \quad (48)$$

$$j_c = 0,3245 \quad (49)$$

En la siguiente tabla se muestran los valores del coeficiente e dado en función de a/H

donde a es la apertura de la compuerta

H es la altura del nivel de las aguas en el desripador

a/H	0,0	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5
e	0,611	0,615	0,618	0,62	0,622	0,625	0,628	0,63	0,638	0,645

a/H	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9	0,95	1
e	0,65	0,66	0,675	0,69	0,705	0,72	0,745	0,78	0,835	1

Tabla 1. Valores del coeficiente e en función de a/H [3]

Suponiendo que la compuerta se abre 0,3m se tiene según la anterior tabla un valor de e igual a 0,625, que al ser reemplazado con los demás valores se obtiene $Q = 1,812\text{m}^3/\text{s}$, que es un valor muy superior al valor del caudal captado, por tanto las dimensiones de la compuerta y la pendiente son aceptables.

4.2. OBRA DE CONDUCCIÓN

La obra de conducción consta de todos aquellos elementos cuyo fin es proporcionar un camino seguro y eficiente para el traslado del caudal de aprovechamiento hasta el punto de generación, de esta forma se dispone de varios tipos de estructuras para tal fin que dependen primero de su forma y segundo de los materiales que se emplean para su construcción; uno de los mas conocidos es el tipo de conducción abierta o canal, que consta de una zanja con revestimiento que varía según el tipo de material y una forma determinada

generalmente por un trapezoide, un semicírculo o un triángulo rectángulo. Otra forma conocida para tal fin es el tipo de conducción cerrada o túnel, generalmente usado en aquellas zonas de gran pendiente de inclinación o terrenos inestables y donde la distancia calculada para la conducción abierta o de canal se hace demasiado grande debido a que se debe bordear la ladera o montaña, los demás tipos de obstáculos que se puedan presentar durante la conducción se pueden sortear por medio de viaductos, sifones y rellenos especialmente adecuados según la situación en particular [3].

La pendiente de la conducción se halla teniendo en cuenta criterios como el de una menor pendiente que la del río aguas abajo, criterios técnicos y criterios económicos. El criterio técnico se establece según las condiciones topológicas y topográficas del terreno y el criterio económico se establece dependiendo la longitud de la conducción, que en últimas depende de la pendiente de la conducción, es decir a mayor pendiente de conducción menor longitud de la misma [3].

Para este caso en particular y teniendo en cuenta que el trazado desde la bocatoma hasta la generación es casi rectilíneo y que el terreno presenta una estabilidad casi garantizada no se hará necesaria la construcción de obra cerrada o túneles de conducción, en algunos casos se hará necesaria la construcción de puentes para el desplazamiento de los visitantes de la finca y de algunos animales como caballos y vacas.

A continuación se realizará el diseño de la obra de conducción teniendo en cuenta los siguientes factores:

- La inclinación longitudinal en el tramo comprendido entre la bocatoma y la generación es de 4°.
- Por facilidad en la construcción del canal se adoptará una forma rectangular en la cual la pendiente del calado es cero.

- El ancho del fondo del canal será el doble de la altura del mismo, estas dimensiones no tienen en cuenta la altura de seguridad.
- No será necesario el diseño de canal en curvatura puesto que el tramo de conducción es casi rectilíneo, situación que puede ser solucionada con tan solo un leve aumento en la distancia de seguridad.
- Inicialmente se diseñará el canal con un recubrimiento de grava gruesa, esto teniendo en cuenta la facilidad de conseguirla y la economía a la hora de su construcción [3].

Tipo de Suelo	Velocidad máxima [m ³ /s]	
	Agua limpia	Material en suspensión
Lodo	0,10	0,15
Barro suelto	0,15	0,20
Arena fina (0.02-0.2m)	0,30	0,40
Arena media (0.2-0.5mm)	0,35	0,50
Limo arenoso (Natural)	0,40	0,60
Arena gruesa (2-5mm)	0,45	0,65
<i>Grava muy arenosa</i>	<i>0,60</i>	<i>0,80</i>
Limo compacto (Natural)	0,70	1,00
Grava media (5-20mm)	0,80	1,15
Tierra arcillosa grasosa (Natural)	1,00	1,30
Grava gruesa, piedras (20-50mm)	1,40	1,60
Piedras (50-75mm)	1,70	1,80
Cantos rodados (75-100mm)	1,90	2,00
Césped/prado, bien radicado	1,80	1,80

Tabla 2. Límites de velocidad del agua en el canal

Según el tipo de suelo o de revestimiento [3]

Para empezar se halla la sección transversal del canal por medio de la siguiente expresión [3]:

$$S = Q/V \quad (50)$$

En donde Q es el caudal en m³/s y V es la velocidad en m/s. En el cuadro se muestran los valores límites de velocidad del agua en el canal según el tipo de suelo.

En la anterior tabla se puede observar que para el material empleado en la construcción del canal se tiene una velocidad máxima de 1,6m/s, de esta forma para la sección transversal se obtiene [3]:

$$S = 0,1252/1,6 \quad (51)$$

$$S = 0,0783\text{m}^2 \quad (52)$$

Para el ancho y alto del canal rectangular se tiene:

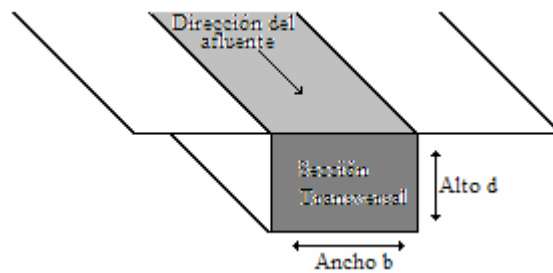


Figura 5. Medidas canal rectangular

$$S = d*b = 0,0783 \quad (53)$$

$$d = 2*b \quad (54)$$

De donde se obtienen las dimensiones del canal como sigue:

$$d = 0,1979\text{m} \quad (55)$$

$$b = 0,3958\text{m} \quad (56)$$

Como ya se dijo la inclinación media es de 4°, de tal forma que para el gradiente del canal se tiene:

$$j = \tan (\alpha) = \tan (4^\circ) \quad (57)$$

$$j = 0,07 \quad (58)$$

Se halla la velocidad real en el canal como sigue:

$$V = (1/n) \cdot (R^{2/3}) \cdot j^{1/2} \quad (59)$$

En donde n es una constante que depende del tipo de material del cauce y se obtiene de la siguiente tabla [3]:

Material del cauce	Mínimo	Medio	Máximo
Roca áspera	----	0,04	0,045
Roca igualadas las asperezas	0,020	0,033	0,035
Canales grandes en buen estado	0,020	0,0225	0,025
Canales grandes en regular estado	0,023	0,025	0,027
Canales grandes en mal estado	0,025	0,0275	0,03
Canales malos semiderrumbados	0,028	0,03	0,033
Canal irregular con vegetación	0,033	0,035	0,04
Madera cepillada	0,01	0,013	0,014
Madera sin cepillar	0,012	0,015	0,018
Hormigón sin alisado con buen encofrado	0,013	0,014	0,015
Hormigón con huellas de tablas	0,015	0,016	0,018
Hormigón alisado	0,011	0,012	0,013
Mampostería, piedra	0,017	0,0225	0,3
Gaviones	0,025	0,027	0,032

Ladrillo enlucido	0,012	0,015	0,017
-------------------	-------	-------	-------

Tabla 3. Valores de n [3]

De la tabla se puede ver que para el material del canal se tiene un valor para n de 0,045, que al ser reemplazado en la ecuación para la velocidad da:

$$V = (1/0,045) * (0,0989^{2/3}) * 0,07^{1/2} \quad (60)$$

$$V = 1,2575 \text{ m/s} \quad (61)$$

Posteriormente se comparan los valores de velocidad máxima y de velocidad real en el canal, teniendo en cuenta que la velocidad real no debe exceder la velocidad máxima como sigue [3]:

$$V < V_{\max} \quad (62)$$

$$1,2575 < 1,6 \quad (63)$$

Luego de comprobada la relación entre estas velocidades se procede a calcular la altura de seguridad, que debe ser de un 5% a un 30% del calado del canal, así se tiene que para los tramos mas rectos la altura de seguridad será del 20% del calado, es decir unos 0,03958m, de forma que la altura total teniendo en cuenta la altura de seguridad será 0,2375m; de la misma forma para los tramos con alguna curvatura se asumirá una altura de seguridad del 30% del calado, que equivale a unos 0,0594m, que en total resultan en una altura de 0,2573m, como se muestra en la siguiente figura:

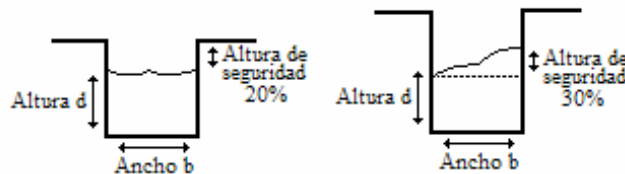


Figura 6. Alturas de seguridad canal de conducción [3]

De esta forma y finalmente se obtiene para el canal una altura en los tramos mas rectos de 0,2375m y un ancho constante de 0,3958m; para los tramos con alguna curvatura se tiene una altura total de 0,2573m y un ancho de 0,3958m. Estas dimensiones se muestran en la siguiente figura:

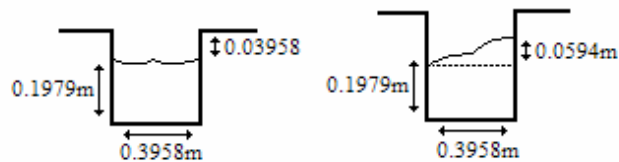


Figura 7. Medidas canal de conducción

4.3. CÁMARA DE CARGA

Por sus características, la cámara de carga es una estructura que une un sistema de baja presión con uno de alta presión y debe ser dimensionada para que cumpla con las condiciones críticas de operación, es decir, partida brusca y parada brusca. Está conectada al canal por medio de una transición, de la cual el agua pasa a la tubería de presión a través de una rejilla que evita la entrada de elementos sólidos flotantes [3].

4.3.1. Dimensionamiento de la cámara de carga

Para su dimensionamiento se requiere la siguiente información:

- Q caudal de diseño (m^3/s)
- H_c altura total de la MCH (m)
- h_1 altura de la conducción (m)
- D diámetro de la tubería de presión (m)
- L longitud de la tubería de presión (m)

Con base en esta información se procede de la siguiente manera:

- Se fija un valor de altura que evita el ingreso de posibles sedimentos a la tubería de presión [3]

$$0,3 < a_1 < 0,5 \text{ (m)} \quad (64)$$

- Se toma un valor de altura equivalente al diámetro de la tubería de presión [3]:

$$a_2 \approx D \quad (65)$$

- Para que el torbellino creado por el flujo del caudal no genere cavitación debe dejarse un nivel mínimo equivalente a [3]:

$$0,5D < a_3 < 1,5D \quad (66)$$

$$a_{3\min} = 0,30 \text{ m} \quad (67)$$

- Por efecto del golpe de ariete se crea una elevación del nivel del agua en el tanque de presión, como seguridad se toma el siguiente valor [3]:

$$a_{4\min} = 0,30 \quad (68)$$

- En función de la altura del canal h_1 , de la topografía local, de la calidad del agua, de la ubicación del canal y de los conductos forzados, del tamaño de las compuertas se toma un valor para altura de la cámara h_2 (m) [3].

- Se fijan los valores posibles para la velocidad media de la cámara de presión:

$$V_2 = 0,6 < 1,0 \text{ (m/s)} \quad (69)$$

- Se determina el ancho del tanque de presión:

$$b_2 = Q / (V_2 * h_2) \text{ (m)} \quad (70)$$

- Se determina la altura del volumen de agua en el tanque para el arranque:

$$h_{2d} = \frac{Q}{7 * b_2 * \sqrt{h_2}} \text{ (m)} \quad (71)$$

Se determina :

$$h'_{2e} = a_1 + a_2 + a_3 + h_{2d} \text{ (m)} \quad (72)$$

se confrontan las alturas h_{2e} y h_2 , si:

$h'_{2e} < h_2$ los valores tomados son correctos

$h'_{2e} > h_2$ se debe tomar un valor mayor para h_2 y volver a calcular [3]

- Si se cumple la relación se determina la longitud de la cámara de presión, en caso de que no se cumpla deben variarse los parámetros fijados inicialmente

$$L_2 = 0.304 \frac{Q * L * \sqrt{h_2}}{H_c * D^2} (m) \quad (73)$$

- Se calcula la altura del nivel máximo

$$h_{2e} = \frac{0.25 * Q}{b_2 * \sqrt{h_2}} (m) \quad (74)$$

- Se calcula el ancho del vertedero

$$b_v = \frac{5 * b_2^{3/2} * h_2^{3/4}}{\sqrt{Q}} \quad (75)$$

- Se determina la altura de la cámara de presión

$$h_T = h_2 + h_{2e} + a_4 \quad (76)$$

Teniendo la información necesaria, se halla cada uno de los valores para el dimensionamiento de la cámara de carga.

$$Q = 0,1252 \text{ m}^3/\text{s} \quad (77)$$

$$H_c = 8\text{m} \quad (78)$$

$$h_1 = 0,30 \text{ m} \quad (79)$$

$$L = 12,3 \text{ m} \quad (80)$$

$$D = 1,27 * \frac{Q^{0,4268}}{(H_c + h_s)^{0,1423}} \quad (81)$$

donde h_s es la altura por efecto del golpe de ariete (m) se toma igual a 30% de la altura bruta

$$D = 1,27 * \frac{0,1252^{0,4268}}{(8 * 1,3)^{0,1423}} = 0,3749m \quad (82)$$

Se toma:

$$a_1 = 0,3 \text{ m} \quad (83)$$

$$a_2 = 0,3749 \text{ m} \quad (84)$$

$$a_3 = 1 \times 0,3749 = 0,3749 \text{ m} \quad (85)$$

$$a_4 = 0,3 \text{ m} \quad (86)$$

$$h_2 = 1,3 \text{ m} \quad (87)$$

$$V_2 = 0,6 \text{ m/s} \quad (88)$$

$$b_2 = 0,1252 / (0,6 * 1,3) = 0,1605 \text{ m} \quad (89)$$

Dado que el ancho que se obtiene para la cámara es menor que el ancho del canal se opta por el ancho de este último:

$$b_2 = 0,3958 \text{ m} \quad (90)$$

$$h_{2d} = \frac{0,1252}{7 * 0,3958 * \sqrt{1,3}} = 0,0396m \quad (91)$$

$$h'_{2e} = 0,3 + 0,3749 + 0,3749 + 0,0396 = 1,0894m \quad (92)$$

$h'_{2e} < h_2$, como se cumple esta condición los valores tomados son correctos

$$L_2 = 0,304 \frac{0,1252 * 12,3 * \sqrt{1,3}}{8 * 0,3749^2} = 0,4747m \quad (93)$$

$$h_{2e} = \frac{0,25 * 0,1252}{0,3958 * \sqrt{1,3}} = 0,0693m \quad (94)$$

El ancho del vertedero se determina con base en la condición más crítica, que ocurre cuando se debe rebosar todo el caudal captado, que es el caudal de dimensionamiento para la conducción, el cual es igual a:

$$Q_v = 1,2 * Q \quad (95)$$

$$Q_v = 0,15024 \text{ m}^3/\text{s} \quad (96)$$

El aliviadero tendrá una cresta gruesa de cantos redondeados, lo cual indica que el coeficiente M es igual:

$$M = 0,50 - 0,55 \quad (97)$$

Se toma un valor de :

$$M = 0,5 \quad (98)$$

En este caso el aliviadero se comporta como un vertedero frontal, cuyo caudal vertido equivale a:

$$Q_v = \frac{2}{3} * M * b_v * \sqrt{2 * g} * h_v^{3/2} \quad (99)$$

donde b_v es el ancho del vertedero

h_v es la altura del vertedero

La selección del ancho y la altura se realiza previendo que su ancho debe ser considerablemente mayor que su altura. Siguiendo estas consideraciones, se tiene que el vertedero posee las siguientes características:

$$b_v = 1,2 \text{ m} \quad (100)$$

$$h_v = 0,2 \text{ m} \quad (101)$$

Altura de la cámara de presión:

$$H_T = 1,3 + 0,0693 + 0,3 = 1,6693 \text{ m} \quad (102)$$

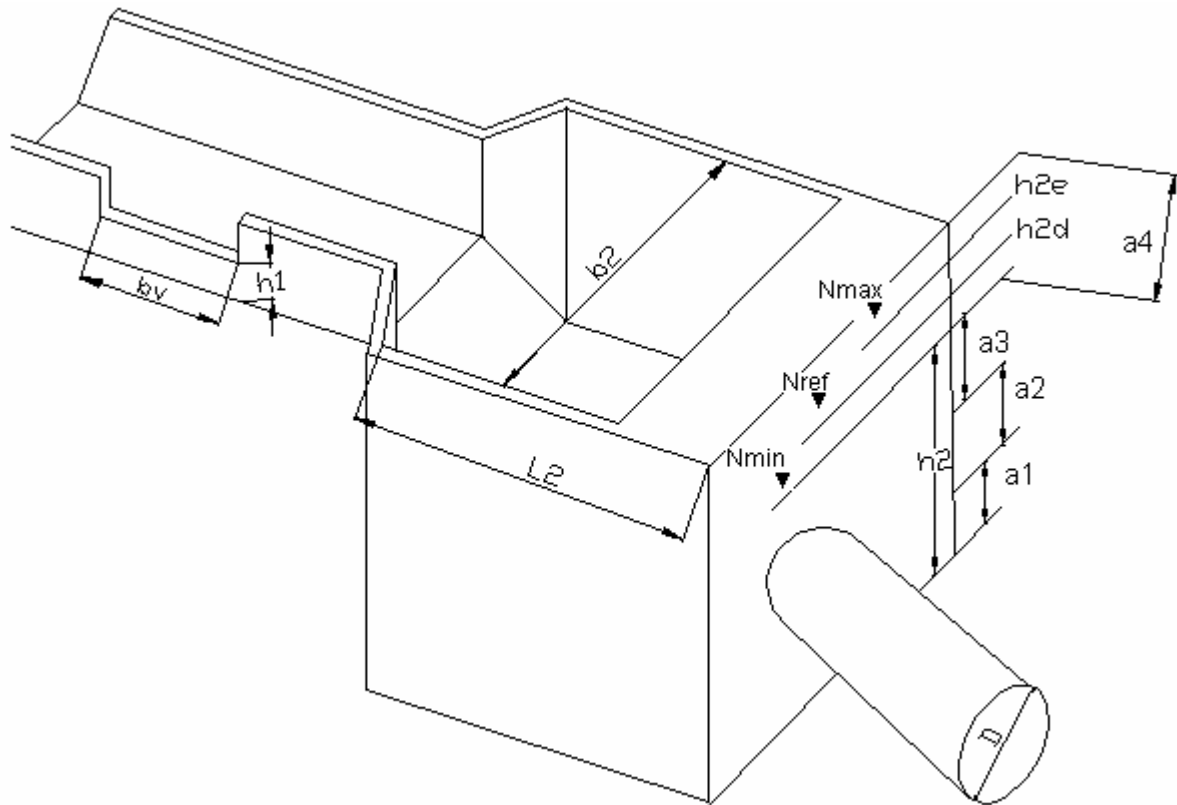


Figura 8. Cámara de carga

4.4. TUBERIAS FORZADAS

En las centrales hidroeléctricas, las *tuberías de presión* o *tuberías forzadas*, tienen por objeto conducir el agua desde la cámara de presión a las turbinas cuando, por causa de la altura del salto, se precisa tal disposición para transformar la energía potencial de posición que tiene el agua en la cámara de presión, en energía potencial presión, que tiene junto a la turbina y al final de la conducción forzada. La tubería de presión debe ser preferiblemente recta, aunque en algunas ocasiones es difícil de obtener, debido a las condiciones del terreno. Este hecho obliga a ajustarse al perfil topográfico de su trazado, con el apoyo de estructuras de concreto que le ayudan a sostenerse y a variar la pendiente.

Pautas para seleccionar una tubería de presión:

- Considerar las diferentes clases de material disponible, tipos de uniones, comparar formas y costos de mantenimientos. Anotar también los diámetros de tubería y los espesores de pared disponibles.
- La selección del diámetro se hará tratando de obtener el menor costo y las menores pérdidas de energía.
- El espesor se determina de acuerdo con los esfuerzos generados por el golpe de ariete, el peso del agua y de la tubería.

Al decidir el material que se empleará para un proyecto tienen que ser considerados los siguientes factores:

- Presión de diseño
- Tipo de unión
- Diámetro y pérdida por fricción
- Peso y grado de dificultad de la instalación
- Accesibilidad al sitio
- Terreno y tipo de suelo
- Mantenimiento y vida esperada de la instalación
- Condiciones climáticas
- Disponibilidad
- Costo relativo

Los materiales empleados en las tuberías de presión son:

Acero Comercial

El acero comercial ha sido uno de los materiales mas usados para tuberías de presión. Estas tuberías pueden ser fabricadas con maquinaria común en la mayoría de talleres de regular tamaño que trabajen con acero. Sus diámetros y espesores son variados. Tienen un factor de pérdida por fricción regular y si están recubiertas por una capa de pintura u otra capa de protección pueden durar hasta 20 años. Además, son resistentes a impactos y relativamente pesadas, pero en caso de ser necesario pueden ser fabricadas en longitudes adecuadas para su

transporte e instalación. Las tuberías de presión de acero que son enterradas corren el riesgo de corroerse.

Policloruro de vinilo (PVC)

La tubería de PVC es una de las más empleadas en las microcentrales. Es relativamente económica, se producen en diámetros que van hasta cerca de 400 mm, y es adecuada para presiones elevadas (100 a 150 m). Al variar el espesor de la pared de la tubería se obtienen diferentes niveles de presión. Es liviana y fácil de transportar e instalar. Tiene un factor de pérdidas por fricción bajo y es resistente a la corrosión. No obstante, es relativamente frágil y puede ser dañada por golpes o impactos de rocas, en especial a bajas temperaturas. La principal desventaja radica en que el PVC se deteriora cuando se expone a la luz ultravioleta. Por ello, siempre debe estar protegida de la luz solar directa, ya sea enterrándola, cubriéndola con vegetación, envolviéndola o pintándola.

Hierro dúctil centrifugado

El hierro dúctil ha remplazado en gran medida al hierro fundido, aunque este último todavía se utiliza en sistemas antiguos. En ocasiones, las tuberías de hierro dúctil están revestidas en su interior con cemento, lo que las dota de protección contra la corrosión y de una baja pérdida por fricción. Es un material pesado, de allí que sea difícil de instalar y sea más costoso.

Asbesto – cemento

Las tuberías hechas de cemento reforzado con fibra de asbesto son frágiles y adecuadas para trabajar a una presión moderada. Son más pesadas que las de PVC y tienen una apreciable pérdida por fricción.

Resina de poliéster con fibra de vidrio reforzado

Las tuberías hechas de resina reforzada con fibra de vidrio insertada en forma de espiral son livianas y poseen bajo coeficiente de fricción. Son frágiles y hay que instalarlas con bastante cuidado. Pueden ser utilizadas con presiones elevadas

con la condición de que estén bajo tierra y se rellene el espacio donde se colocan con material fino seleccionado. Aún no tienen mayor aceptación.

Polietileno de alta densidad

Las tuberías fabricadas con este material son buena alternativa frente a las de PVC. Son particularmente útiles para pequeños sistemas dada su fácil instalación. Tienen un coeficiente de pérdidas de fricción bajo, son resistentes a la corrosión y no se deterioran cuando están expuestas a la luz solar.

4.4.1. Dimensionamiento de las tuberías forzadas

Se dimensionará la tubería en el siguiente orden:

- Diámetro de la tubería
- Pérdidas en la tubería
- Espesor de la tubería
- Apoyos
- Anclajes

4.4.1.1. Diámetro de la tubería

$$D = 1,27 * \frac{Q^{0,4268}}{(H_c + h_s)^{0,1423}} \quad (103)$$

$$D = 1,27 * \frac{0,1252^{0,4268}}{(8 * 1,3)^{0,1423}} = 0,3749m \quad (104)$$

4.4.1.2. Pérdidas en la tubería

Las pérdidas de carga son generadas por la fricción de los elementos que componen la tubería de presión. Para determinar las pérdidas en la tubería debe conocerse la velocidad del caudal que fluye en ella, la cual es igual a [3]:

$$V = \frac{4 * Q}{\pi * D^2} \quad (105)$$

$$V = \frac{4 * 0,1252}{\pi * 0,749^2} = 1,134 \text{ m / sg} \quad (106)$$

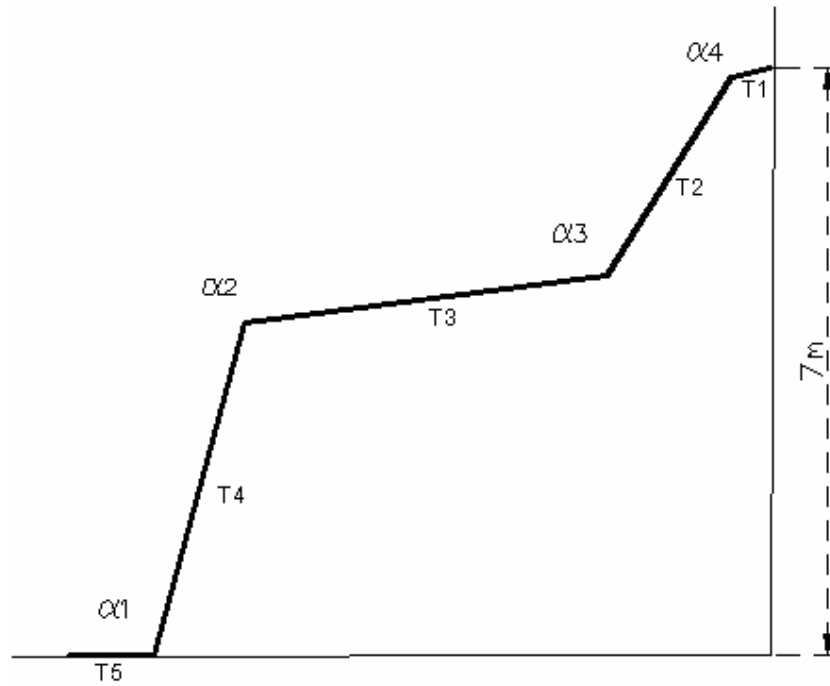


Figura 9. Perfil de la tubería de presión

Angulo	α(°)	Tramo	L(m)
1	74.5°	1	0.5
2	67.5°	2	2.8
3	50.5°	3	4.35
4	43.5°	4	4.1
		5	1

Tabla 4. Medidas tubería de presión

4.4.1.2.1. Pérdidas en la rejilla

A la entrada de la toma de agua y en la cámara de carga, a la entrada de la tubería forzada, suele instalarse una rejilla para impedir el paso elementos sólidos.

El agua al atravesar la rejilla, genera una turbulencia que se traduce en una pérdida de carga [3].

$$h_r = K_r \times \frac{V^2}{2 \times g} \quad (107)$$

Donde K_r es el coeficiente de pérdidas según la figura

V es la velocidad del agua entrante a la rejilla (m/s)

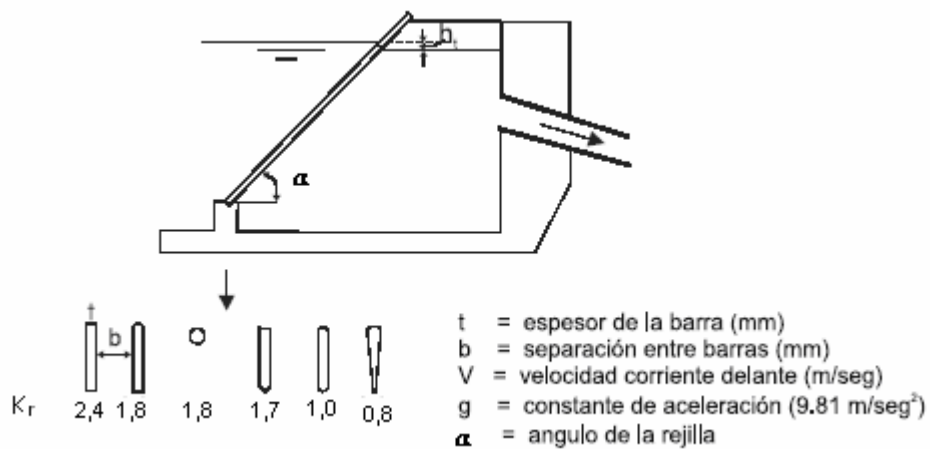


Figura 10. Pérdidas en la rejilla por fricción [1]

Se toma $K_r = 1,8$

$$h_r = 1,8 * \frac{1,134^2}{2 * 9,81} = 0,1179m \quad (108)$$

4.4.1.2.2. Pérdidas de entrada

$$h_E = K_e * \frac{V^2}{2 * g} \quad (109)$$

Donde K_e es el coeficiente de pérdidas que depende de la forma de entrada al tubo como se muestra en la figura.

V es la velocidad del agua en el tubo (m/s)

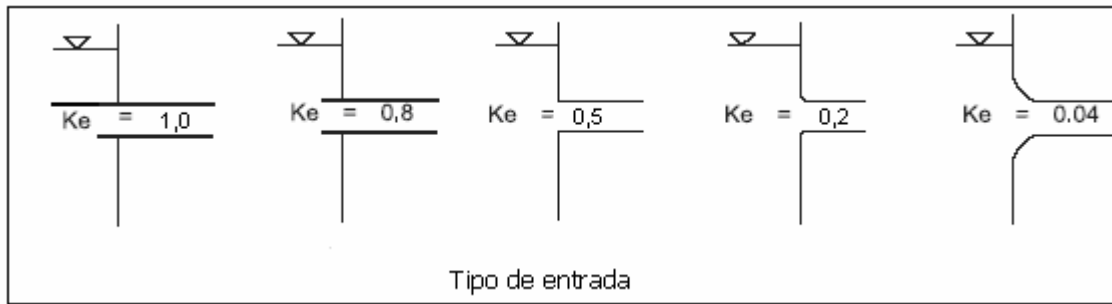


Figura 11. Coeficiente de pérdidas en la entrada de la tubería [1]

Se toma $K_e = 0.2$

$$h_E = 0,2 * \frac{1,134^2}{2 * 9,81} = 0,0131m \quad (110)$$

4.4.1.2.3. Pérdidas en los codos

Cuando un fluido recorre un codo, se produce un aumento de presión en la pared externa y una disminución en la interna. Pasado el tramo curvo, y a una cierta distancia del mismo, la situación vuelve a su estado original, para lo que es necesario que aumente la presión en la cara interior y retorne así la velocidad a su valor original [1].

$$h_K = K_K \frac{V^2}{2g} (m) \quad (111)$$

donde K_K es el coeficiente de pérdidas, que depende del ángulo del codo y se obtiene de la tabla

V es la velocidad en el tubo (m/s)

α (grados)	10	15	22.5	30	45	60	70	80	90
K_K	0,044	0,062	0,154	0,165	0,320	0,684	0,70	0,80	1,265

Tabla 5. Coeficiente de pérdidas K_K para codos de tubos circulares [3]

Las pérdidas correspondientes a cada uno de los codos son las siguientes:

α (grados)	α_1 (74,5°)	α_2 (67,5)	α_3 (50,5)	α_4 (43,5)
K_k	0,75	0,69	0,60	0,31
h_k (m)	0,049	0,045	0,039	0,0203

Tabla 6. Pérdidas en cada uno de los codos

$$h_{ktotal} = 0,049 + 0,045 + 0,039 + 0,0203 = 0,1533 \text{ (m)} \quad (112)$$

4.4.1.2.4. Perdidas por fricción en el tubo

$$h_f = f * \frac{L V^2}{D 2g} \quad (113)$$

Donde, f es el factor de fricción

L es la longitud del tubo en m

D es el diámetro de la tubería (m)

V es la velocidad dentro del tubo (m/s)

g es la constante gravitacional

El factor de fricción equivale a:

$$f = 0,01 * \left(\frac{K}{D} \right)^{0,134} \quad (114)$$

Donde la constante K depende del tipo de material según se muestra en la tabla.

<i>Material del tubo</i>	<i>k</i>
Tubo de acero (nuevo)	1,15
Tubo de hierro fundido (nuevo)	2,50
Tubo de acero corroído (en operación)	5,00

Tubo plástico	0,50
---------------	------

Tabla 7. Valores de k para calcular el factor de fricción [3]

Para tubo de acero:

La constante K para el acero es 1,15, se tiene que el factor de fricción es:

$$f = 0,01 * \left(\frac{1,15}{0,3749} \right)^{0,134} = 0,0116 \quad (115)$$

Las pérdidas por fricción son:

$$h_f = 0,0116 * \frac{12,75}{0,3749} * \frac{1,134^2}{2 * 9,81} = 0,0258m \quad (116)$$

Para tubo de PVC (plástico):

La constante K para el plástico es 0,50, se tiene que el factor de fricción es:

$$f = 0,01 * \left(\frac{0,50}{0,3749} \right)^{0,134} = 0,0104 \quad (117)$$

Las pérdidas por fricción son:

$$h_f = 0,0104 * \frac{12,75}{0,3749} * \frac{1,134^2}{2 * 9,81} = 0,0231m \quad (118)$$

Para tubo de hierro:

La constante K para el hierro es 2,50, se tiene que el factor de fricción es:

$$f = 0,01 * \left(\frac{2,50}{0,3749} \right)^{0,134} = 0,0128 \quad (119)$$

Las pérdidas por fricción son:

$$h_f = 0,0128 * \frac{12,75}{0,3749} * \frac{1,134^2}{2 * 9,81} = 0,0285m \quad (120)$$

4.4.1.2.5. Pérdidas en válvulas

Las válvulas se emplean, en general, para aislar determinados tramos a fin de poder intervenir en operaciones de mantenimiento o reparaciones importantes.

$$h_v = K_v \frac{V^2}{2g} (m) \quad (121)$$

Donde K_v es el coeficiente de pérdida que depende del tipo de válvula como se observa en la figura.

V es la velocidad en el tubo (m/s)

Se escogen válvulas tipo esférica, las cuales tienen un coeficiente de pérdida de 0,05.

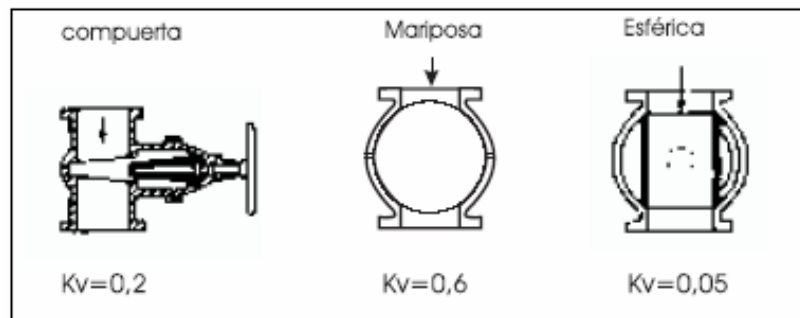


Figura 12. Coeficiente de pérdidas en las válvulas [1]

$$h_v = 0,05 * \frac{1,134^2}{2 * 9,81} = 0,0033(m) \quad (122)$$

4.4.1.2.6. Pérdidas por estrechamiento de la tubería

No se tienen este tipo de pérdidas.

Pérdidas totales:

Para tubo de acero

$$h_T = 0.1179 + 0.0131 + 0.1533 + 0.0258 + 0.0033 = 0.3134 \text{ m} \quad (123)$$

Para tubo de PVC

$$h_T = 0.1179 + 0.0131 + 0.1533 + 0.0231 + 0.0033 = 0.3107 \text{ m} \quad (124)$$

Para tubo de hierro

$$h_T = 0.1179 + 0.0131 + 0.1533 + 0.0285 + 0.0033 = 0.3161 \text{ m} \quad (125)$$

Se observa que se tienen menos pérdidas en la tubería con PVC.

4.4.1.3. Espesor de la tubería

El espesor es función de la presión interna, de la carga de rotura y límite elástico del material escogido, y del diámetro de la tubería. En una tubería el espesor de pared se calcula con la siguiente ecuación:

$$e = \frac{P_i * D}{2\sigma_f * K_f} + e_s = \frac{(H_c + h_s)D}{2\sigma_f * K_f} + e_s \text{ (mm)} \quad (126)$$

Donde, P_i es la presión máxima considerando el golpe de ariete

H_c es la caída bruta (m)

h_s es la sobrepresión ejercida por el golpe de ariete (m)

D es el diámetro de la tubería

σ_f es la resistencia a la tracción (kgf/cm^2)

K_f es la eficiencia de las uniones

e_s es un espesor adicional ($e_s = 3\text{mm}$)

Se tiene que $K_f = 0,8$ para tubos sin soldadura

$K_f = 0,9$ para uniones soldadas

$K_f = 1,0$ para uniones soldadas, radiografiadas y aliviado de tensiones.

Para el acero la resistencia de tracción del material σ_f es de 1200 kgf/cm^2

$$e = \frac{(1,3 * 7) * 0,3749}{2 * 1200 * 0,9} + 0,003 = 4,579 \text{ mm} \quad (127)$$

Para el hierro dúctil la resistencia de tracción del material σ_f es de $4118,94 * 10^2 \text{ kgf/cm}^2$

$$e = \frac{(1,3 * 7) * 0,3749}{2 * 4118,94 * 10^2 * 0,9} + 0,003 = 3,005 \text{ mm} \quad (128)$$

Para PVC la resistencia de tracción del material σ_f es de 500 kgf/cm^2

$$e = \frac{1,3 * 7 * 0,3749}{2 * 500 * 0,8} = 4,264 \text{ mm} \quad (129)$$

Tensiones

En la tubería de presión apoyada sobre estructuras de concreto tiene gran importancia la relación entre el espesor de la tubería y la distancia entre bloques L_s . Las principales tensiones que debe soportar el espesor de la tubería son:

- Tensión tangencial ejercida por el golpe de ariete (kgf/cm^2):

$$\delta_{ta} = \frac{P_i * D}{2e} = \frac{(Hc + h_s) * D}{20 * e} = 0,05 * (Hc + h_s) * \frac{D}{e} \quad (130)$$

Donde, Hc es la caída bruta (m)

h_s es la sobrepresión ejercida por el golpe de ariete (m)

e es el espesor de la tubería (m)

D es el diámetro interno (m)

Para una tubería de acero:

$$\delta_{ia} = 0,05 * 1,3 * 7 * \frac{0,3749}{0,00458} = 37,24 \text{kgf} / \text{cm}^2 \quad (131)$$

Para una tubería de hierro dúctil:

$$\delta_{ia} = 0,05 * 1,3 * 7 * \frac{0,3749}{0,003} = 56,86 \text{kgf} / \text{cm}^2 \quad (132)$$

Para una tubería de PVC:

$$\delta_{ia} = 0,05 * 1,3 * 7 * \frac{0,3749}{0,004264} = 40,005 \text{kgf} / \text{cm}^2 \quad (133)$$

- Tensión longitudinal debido a la variación de temperatura.

$$\delta_{ie} = E * \alpha * \Delta t (\text{kgf} / \text{cm}^2) \quad (134)$$

Donde E es el módulo de elasticidad del material

α es el coeficiente de dilatación

Δt es la variación de la temperatura

La variación de la temperatura se toma igual a 5°C

$$\text{Para el acero } E = 2,1 * 10^6 \text{ KN/m}^2 \quad (135)$$

$$\sigma = 1,2 * 10^{-5} \text{ m/m}^\circ\text{C} \quad (136)$$

$$\delta_{ie} = 2,1 * 10^6 * 1,2 * 10^{-5} * 5 = 126 (\text{kgf} / \text{cm}^2) \quad (137)$$

$$\text{Para el hierro dúctil } E = 1,7 * 10^6 \text{ KN/m}^2 \quad (138)$$

$$\sigma = 1,1 * 10^{-5} \text{ m/m}^\circ\text{C} \quad (139)$$

$$\delta_{ie} = 1,7 * 10^6 * 1,1 * 10^{-5} * 5 = 93,5 (\text{kgf} / \text{cm}^2) \quad (140)$$

Para el PVC $E = 2,7 \cdot 10^6 \text{ KN/m}^2$ (141)

$\sigma = 5,4 \cdot 10^{-5} \text{ m/m}^\circ\text{C}$ (142)

$\delta_{ie} = 0,0275 \cdot 10^6 \cdot 5,4 \cdot 10^{-5} \cdot 5 = 7,425 (\text{kgf} / \text{cm}^2)$ (143)

- Tensión longitudinal debida a la presión hidrostática, con la válvula cerrada

$$\delta_{il} = \frac{Pi * A}{As} = \frac{(Hc + h_s) * \frac{\pi D^2}{4}}{10\pi * \frac{(D_e^2 - D^2)}{4}} \quad (144)$$

Donde D_e es el diámetro externo que es igual a:

$$D_e = D + 2e \quad (145)$$

En este caso, la tensión longitudinal que se debe a la presión hidrostática es igual a:

$$\delta_{il} = 0,025 * \frac{(Hc + h_s) D^2}{e(e + D)} (\text{kgf} / \text{cm}^2) \quad (146)$$

Para tubería de acero:

$$\delta_{il} = 0,025 * \frac{1,3 * 7 * 0,3749^2}{0,00458 * (0,00458 + 0,3749)} = 18,397 (\text{kgf} / \text{cm}^2) \quad (147)$$

Para tubería de hierro dúctil:

$$\delta_{il} = 0,025 * \frac{1,3 * 7 * 0,3749^2}{0,003 * (0,003 + 0,3749)} = 28,204 (\text{kgf} / \text{cm}^2) \quad (148)$$

Para tubería de PVC:

$$\delta_{il} = 0,025 * \frac{1,3 * 7 * 0,3749^2}{0,004264 * (0,004264 + 0,3749)} = 19,777 (\text{kgf} / \text{cm}^2) \quad (149)$$

- Tensión de flexión entre apoyos debida al peso propio de la tubería y al peso del agua

$$\delta_{f_f} = \frac{M_{ma}}{W} (\text{kgf} / \text{cm}^2) \quad (150)$$

Donde el momento flector máximo es igual a:

$$Mf_{\max} = F(Ls^2 / 8)\text{sen} \theta \quad (151)$$

Donde F es el peso del agua y de la tubería

Ls es la distancia entre soportes

El peso de la tubería y del agua es igual a:

$$F = \gamma_t * \pi * e * (D + e) + \gamma * \pi \frac{D^2}{4} \quad (152)$$

Donde γ_t es el peso específico de la tubería

γ es el peso específico del agua

$$\gamma = 1000 (\text{kgf}/\text{m}^3) \quad (153)$$

Para tubería de acero :

$$\gamma_t = 7850 (\text{kgf}/\text{m}^3) \quad (154)$$

$$F = 7850 * \pi * 0,00458 * (0,3749 + 0,00458) + 1000 * \pi \frac{0,3749^2}{4} = 153,25 (\text{tf} / \text{m}) \quad (155)$$

Se escoge ubicar los apoyos cada dos metros.

$$Ls = 2\text{m}$$

$$\theta = 47^\circ$$

$$Mf_{\max} = 153,25 \times 10^{-3} (2^2 / 8) \text{sen}(47^\circ) = 56,04 \times 10^{-3} (\text{tf}) \quad (156)$$

El momento de resistencia W es igual a:

$$W = \frac{\pi (De^4 - D^4)}{32 De} \quad (157)$$

$$W = \frac{\pi \left((0,3749 + 0,00458)^4 - (0,3749)^4 \right)}{32 (0,3749 + 0,00458)} = 2,54 \times 10^{-4} \quad (158)$$

Entonces, la tensión por flexión es igual a:

$$\delta_{tf} = \frac{56,04 \times 10^{-3}}{2,54 \times 10^{-4}} = 220,63 (\text{kgf} / \text{cm}^2) \quad (159)$$

Para tubería de hierro dúctil:

$$\gamma_t = 7063 (\text{kgf}/\text{m}^3) \quad (160)$$

$$F = 7063 * \pi * 0,003 * (0,3749 + 0,003) + 1000 * \pi \frac{0,3749^2}{4} = 135,54 (\text{tf} / \text{m}) \quad (161)$$

Se escoge ubicar los apoyos cada 2 metros

$$L_s = 2\text{m}$$

$$\theta = 47^\circ$$

$$Mf_{\max} = 135,54 \times 10^{-3} (2^2 / 8) \text{sen}(47^\circ) = 49,56 \times 10^{-3} (\text{tf}) \quad (162)$$

El momento de resistencia W es igual a:

$$W = \frac{\pi \left((0,3749 + 0,003)^4 - (0,3749)^4 \right)}{32 (0,3749 + 0,003)} = 1,66 \times 10^{-4} \quad (163)$$

Entonces, la tensión por flexión es igual a:

$$\delta_{tf} = \frac{49,56 \times 10^{-3}}{1,66 \times 10^{-4}} = 298,55 (\text{kgf} / \text{cm}^2) \quad (164)$$

Para tubería de PVC:

$$\gamma_t = 1400 (\text{kgf}/\text{m}^3) \quad (165)$$

$$F = 1400 * \pi * 0,004264 * (0,3749 + 0,004264) + 1000 * \pi \frac{0,3749^2}{4} = 117,49(tf / m) \quad (166)$$

Se escoge ubicar los apoyos cada 2 metros

$$L_s = 2m$$

$$\theta = 47^\circ$$

$$Mf_{\max} = 117,49 \times 10^{-3} (2^2 / 8) \text{sen}(47^\circ) = 42,96 \times 10^{-3} (tf) \quad (167)$$

El momento de resistencia W es igual a:

$$W = \frac{\pi}{32} \frac{((0,3749 + 0,004264)^4 - (0,3749)^4)}{0,3749 + 0,004264} = 2,37 \times 10^{-4} \quad (168)$$

Entonces, la tensión por flexión es igual a:

$$\delta_{tf} = \frac{42,96 \times 10^{-3}}{2,37 \times 10^{-4}} = 181,27(kgf / cm^2) \quad (169)$$

- Tensión longitudinal debida a la inclinación por variación de la pendiente del terreno

$$\delta_j = \frac{F \times L_s \times \cos \theta}{\pi \times e \times (D + e)} (kgf / cm^2) \quad (170)$$

Para tubería de acero:

$$\delta_j = \frac{153,25 \times 10^{-3} \times 2 \times \cos(47^\circ)}{\pi \times 0,00458 \times (0,3749 + 0,00458)} = 38,28(kgf / cm^2) \quad (171)$$

Para tubería de hierro dúctil:

$$\delta_j = \frac{135,54 \times 10^{-3} * 2 * \cos(47^\circ)}{\pi * 0,003 * (0,3749 + 0,003)} = 51,91(kgf / cm^2) \quad (172)$$

Para tubería de PVC:

$$\delta_j = \frac{117,49 \times 10^{-3} * 2 * \cos(47^\circ)}{\pi * 0,004264 * (0,3749 + 0,004264)} = 31,55(\text{kgf} / \text{cm}^2) \quad (173)$$

- Tensión Resultante

Un criterio para comparar las tensiones y elegir la que ofrezca mayor seguridad, se puede determinar a partir de:

$$\delta_{ad} > \sum_{j=1}^5 \delta_j \quad (174)$$

El espesor de la tubería debe soportar la suma de las tensiones que actúan sobre ella.

La tensión de tracción del acero es:

$$\delta_{ad} = 1200 \text{ kgf/cm}^2 \quad (175)$$

$$\delta_{ad} = \delta_{ta} + \delta_{te} + \delta_{tl} + \delta_{tf} + \delta_j \quad (176)$$

$$\delta_{ad} = 37,24 + 126 + 18,397 + 220,63 + 38,28 \quad (177)$$

$$\delta_{ad} = 440,547 \text{ kgf/cm}^2 \quad (178)$$

Se observa que el acero soporta las tensiones que actúan sobre él.

La tensión de tracción del hierro dúctil es:

$$\delta_{ad} = 4118,94 * 10^2 \text{ kgf/cm}^2 \quad (179)$$

$$\delta_{ad} = \delta_{ta} + \delta_{te} + \delta_{tl} + \delta_{tf} + \delta_j \quad (180)$$

$$\delta_{ad} = 56,86 + 93,5 + 28,204 + 298,55 + 51,91 \quad (181)$$

$$\delta_{ad} = 529,024 \text{ kgf/cm}^2 \quad (182)$$

Se observa que el hierro dúctil soporta las tensiones que actúan sobre él.

La tensión de tracción del PVC es:

$$\delta_{ad} = 500 \text{ kgf/cm}^2 \quad (183)$$

$$\delta_{ad} = \delta_{ta} + \delta_{te} + \delta_{tl} + \delta_{tf} + \delta_j \quad (184)$$

$$\delta_{ad} = 40,005 + 7,425 + 19,777 + 181,27 + 31,55 \quad (185)$$

$$\delta_{ad} = 280,027 \text{ kgf/cm}^2 \quad (186)$$

Se observa que el PVC soporta las tensiones que actúan sobre él.

De lo anterior se observa que los tres materiales soportan las tensiones que actúan sobre ellos, pero para este caso se seleccionará una tubería de acero que es más comercial, fácil de fabricar, resistente a impactos y a la exposición al ambiente.

4.4.1.4. Apoyos

La tubería de presión a cielo abierto en su perfil se adapta a las condiciones del terreno con la pendiente respectiva; en su trayecto para sostenerse se soporta en estructuras de concreto llamadas apoyos; en lugares donde se requiere variar la pendiente la tubería tiene su respectivo codo sujeto a un anclaje que se encarga de absorber los esfuerzos que se derivan por variación de pendiente [3].

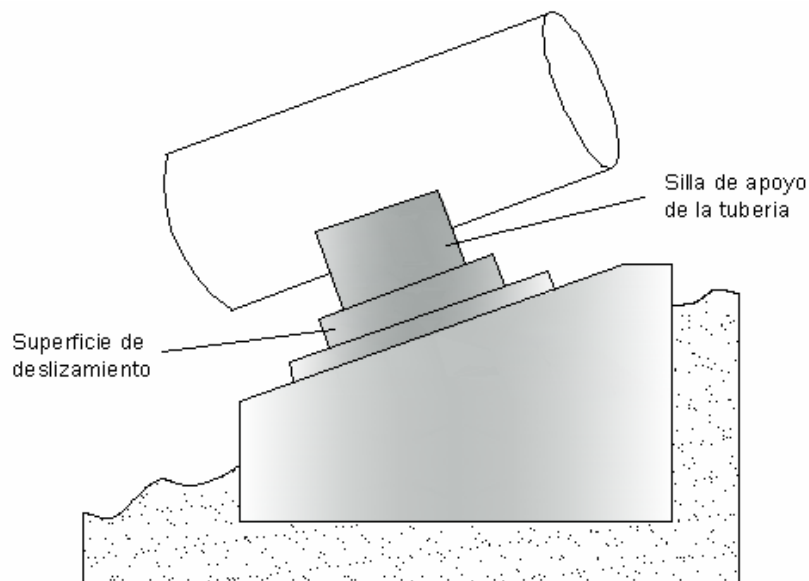


Figura 13. Apoyos [3]

Los bloques de apoyo se utilizan para sostener adecuadamente la tubería de presión, deben ser dimensionados de forma que sean de bajo costo y de fácil construcción.

El apoyo se encarga de sostener la tubería de presión y facilita su deslizamiento por dilatación o contracción debido a variaciones de temperatura. Para cumplir con estas funciones, el apoyo se compone de una estructura de concreto que absorbe los esfuerzos y que a su vez en sus dimensiones, garantiza que no se volteará o enterrará y que las aguas lluvias podrán escurrir. Encima de él está montada una placa metálica de baja fricción con la cual se desliza la tubería de presión, montada sobre una silla metálica de baja fricción; con estas condiciones los esfuerzos mecánicos transmitidos son menores [3].

Ya que la tubería de presión presenta unos tramos de longitud corta, no es necesario utilizar apoyos. En el primer, segundo y tercer tramo de la tubería, ésta va sobre una estructura de concreto que ya existe (ver anexo D); luego se puede sujetar a esta por medio de piezas de acero.

4.4.1.5. Anclajes

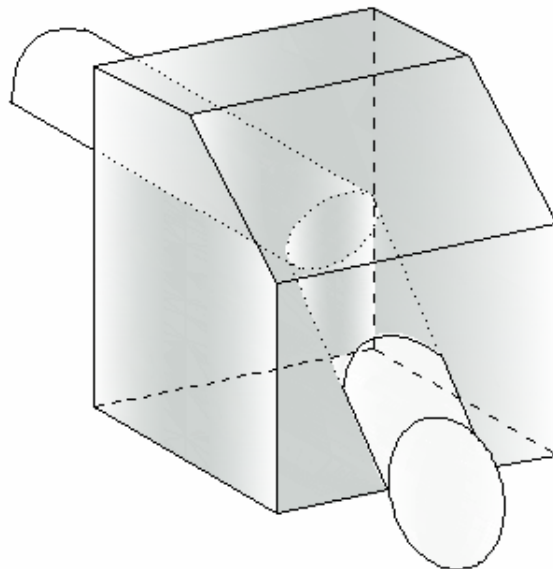


Figura 14. Anclajes para variar pendiente horizontal y vertical [3]

Los anclajes son bloques de hormigón que impiden el movimiento de la tubería. Pueden ser de tipo abierto cuando la tubería está descubierta y sujeta al bloque por medio de piezas especiales de acero, o de tipo macizo cuando el hormigón cubre totalmente la tubería embebida dentro del bloque.

Los anclajes ajustan la tubería al perfil topográfico del terreno y permiten variar la pendiente horizontal y/o vertical [3].

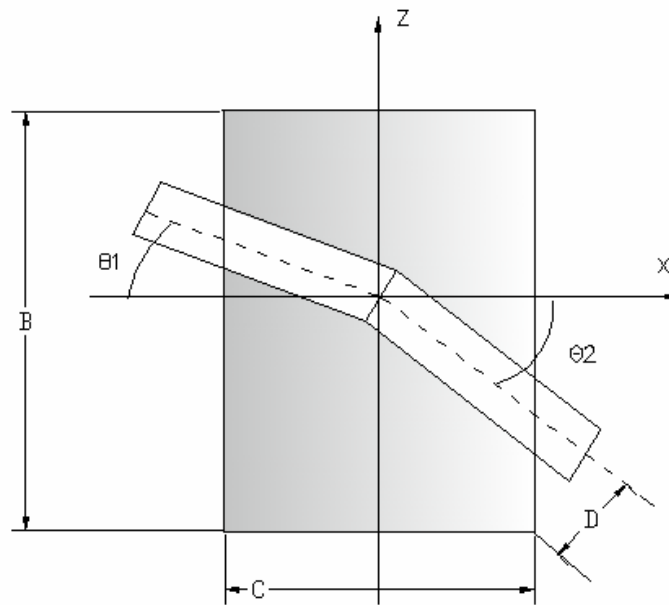


Figura 15. Dimensiones para variar pendiente en un anclaje [3]

En el cuarto tramo de la tubería se debe construir un anclaje, ya que en este tramo no va apoyada sobre ninguna estructura.

Se seleccionan las medidas del anclaje así:

$$B = 3 \times D \quad (187)$$

$$C = 3 \times D \quad (188)$$

$$A = 4 \times D \quad (189)$$

$$F = A - 0.5 \times C \times \tan \theta_1 \quad (190)$$

$$J = A + 0.5 \times C \times \tan \theta_2 \quad (191)$$

Donde D es el diámetro de la tubería

θ_1 es el ángulo de inclinación con la horizontal aguas arriba del anclaje

θ_2 es el ángulo de inclinación con la horizontal aguas abajo del anclaje

$$D = 0,3749 \text{ m} \quad (192)$$

$$\theta_1 = 74^\circ \quad (193)$$

$$\theta_2 = 0^\circ \quad (194)$$

Tenemos entonces:

$$B = 3 \times 0,3749 = 1,1247 \text{ m} \quad (195)$$

$$C = 3 \times 0,3749 = 1,1247 \text{ m} \quad (196)$$

$$A = 4 \times 0,3749 = 1,4996 \text{ m} \quad (197)$$

$$F = 1,4996 - 0,5 \times 1,1247 \times \tan(16^\circ) = 1,4996 \quad (198)$$

$$J = 1,4996 + 0,5 \times 1,1247 \times \tan(74^\circ) = 3,46 \quad (199)$$

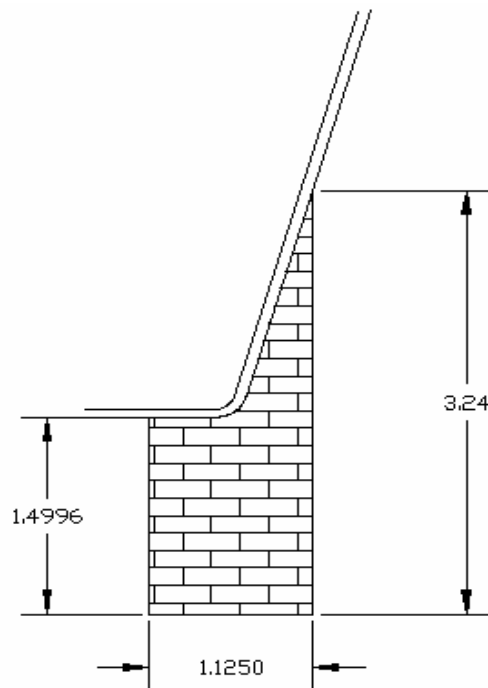


Figura 16. Dimensiones anclaje

5. CASA DE MÁQUINAS

En un aprovechamiento hidroeléctrico, la casa de máquinas es una estructura que tiene la mayor parte del equipo electromecánico, que convierte la energía potencial del agua en energía mecánica y posteriormente en eléctrica. Este proceso de transformación de la energía requiere como mínimo la instalación dentro de la casa de máquinas del siguiente equipo [3]:

- Válvula
- Turbina
- Generador
- Subestación

La casa de máquinas en este caso específico estará ubicada en el antiguo molino de El Parque Ecológico “El Portal”, este sitio cuenta con todas aquellas características necesarias y también convenientes para la transformación de la energía mecánica en eléctrica como lo son algunas de las que se mencionan a continuación:

- Cercanía al afluente y resguardado del mismo, evitando así que las posibles crecidas del río pudieran afectar la estructura de la casa de máquinas [3].
- Un declive en el terreno inmediatamente posterior al sitio de construcción que linda con el río y que posee condiciones especiales para la construcción del canal de desagüe [3].

- Es un sitio de fácil acceso y un terreno estable apropiado para la construcción, además de ser bastante amplio cuenta con una carretera que facilita el transporte de elementos pesados como materiales de construcción y los equipos propios de la casa de máquinas [3].

El diseño de la casa de máquinas será horizontal, siendo esta la postura mas usada por presentar características como: cojinetes normales, transmisión directa por unión o acoplamiento entre los ejes a los que se transmite el movimiento, fácil inspección para su mantenimiento puesto que todos los elementos están a la misma altura y otras características no menos importantes que se muestran a continuación [3]:

- El agua llega al canal de desagüe a través de uno o dos codos de 90°, cuyas pérdidas serán mayores cuanto mayor sea la velocidad.
- La extensión superficial es mayor puesto que todos los elementos se encuentran en el mismo plano y a la misma altura [3].

5.1. EMPALME ENTRE LA TUBERÍA DE PRESIÓN Y LA BOCA DE LA TURBINA

Para realizar el empalme entre la tubería de presión y la boca de entrada a la turbina se hace necesario tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- El empalme debe poseer baja resistencia hidráulica de tal forma que se minimicen las pérdidas por fricción en la tubería.
- Las longitudes de las tuberías empleadas en este proceso deben ser cortas con el fin de evitar pérdidas por fricción en la tubería.

- Antes de la entrada de caudal a la turbina debe existir una válvula de cierre con el fin de obstruir o regular el flujo de agua hacia la turbina.
- La tubería de presión tiene un diámetro interno de 0,3749m, por otro lado el tubo sobre el cual se va a montar la válvula de cierre es de 15 pulgadas con un diámetro interno de 0,381m [3].

Luego de analizar cada una de las anteriores condiciones de trabajo se concluye primero que el empalme debe ser hecho a base de soldadura con gas o alógena que ofrece menores resistencias al paso del agua, este empalme se realizará a 10 centímetros del codo de la tubería de presión. Posteriormente a 10 centímetros del empalme se encuentra la válvula de cierre y finalmente a 1 metro de la válvula se encuentra la boca de entrada a la turbina.

5.2. SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE ENERGÍA MECÁNICA ENTRE LA TURBINA Y EL GENERADOR

En una central hidroeléctrica a frecuencia industrial (60Hz) se dispone de generadores con velocidades de 3600, 1800, 1200, 900, 600 rpm y menos, siendo mas alto el costo del generador cuanto mas baja sea la velocidad de operación, esto se debe en gran medida al mayor número de pares de polos que debe poseer el generador cuanto menor sea su velocidad de giro; por otro lado la velocidad de giro de la turbina está relacionada con la caída neta, el caudal y las dimensiones del rodete, por esta razón en muy pocas ocasiones la velocidad de giro de la turbina coincide con la velocidad de giro del generador, debido a esto se debe emplear un sistema de transmisión del movimiento que básicamente tiene las siguientes características [2]:

- La transmisión del movimiento puede realizarse con poleas o correas, en cuyo caso se debe disponer de rodamientos ajenos a los rodamientos de la turbina y el generador siempre que sea necesario reducir la tensión axial de los rodamientos delanteros del generador y la turbina.
- El acople también puede realizarse por medio de una o varias cadenas de rodillos, en este caso también se presentan tensiones axiales en los rodamientos delanteros de la turbina y el generador.
- La transmisión puede realizarse por ruedas de fricción o por engranajes; en estos sistemas las dos características principales son la alta eficiencia y el alto costo de los mismos [2].

5.3. SELECCIÓN DE LA TURBINA

Para la selección de la turbina es de gran importancia tener en cuenta que cada clase de turbina ofrece determinadas ventajas y desventajas, de esta forma se hace necesario conocer las principales características de algunas de las más usadas para contar con argumentos reales para la selección. En general las turbinas se clasifican según la forma como convierten la energía cinética en energía mecánica, según sea se clasifican en turbinas de acción y turbinas de reacción como sigue [2]:

5.3.1. Turbinas de acción

5.3.1.1. Turbinas Pelton

Son turbinas de acción en las que la tobera o toberas (una turbina de eje vertical puede tener hasta seis toberas, con uno o muchos rodetes) transforman la energía de presión del agua en energía cinética. Cada tobera produce un chorro, cuyo caudal se regula mediante una válvula de aguja. Suelen estar dotadas de un deflector, cuya misión es desviar el chorro para evitar que, al no incidir sobre las cazoletas, se embale la turbina, sin tener que cerrar bruscamente la válvula de

aguja, maniobra que podría producir un golpe de ariete. Se utilizan en saltos entre 40 y 1200 m. El eje de las toberas está siempre situado en el plano meridiano del rodete. El agua sale de las cazoletas a velocidades muy bajas (idealmente a velocidad cero) con lo que la carcasa que rodea al rodete no tiene que resistir ninguna presión [2].

5.3.1.2. Turbinas Turgo

La turbina Turgo puede trabajar en saltos con alturas comprendidas entre 15 y 300 metros. Como la Pelton, se trata de una turbina de acción, pero sus alabes tienen una distinta forma y disposición. El chorro incide con un ángulo de 20° respecto al plano diametral del rodete, entrando por un lado del disco y saliendo por el otro. A diferencia de la Pelton, en la turbina Turgo el chorro incide simultáneamente sobre varios alabes, de forma semejante a como lo hace el fluido en una turbina de vapor. Su menor diámetro conduce, para igual velocidad periférica, a una mayor velocidad angular, lo que facilita su acoplamiento directo al generador, con lo que al eliminar el multiplicador reduce el precio del grupo y aumenta su fiabilidad [2].

5.3.1.3. Turbinas de flujo cruzado

Esta turbina, conocida también con los nombres de Michell-Banki, en recuerdo de sus inventores, y de Ossberger, en el de la compañía que la fabrica desde hace más de 50 años, se utiliza con una gama muy amplia de caudales (entre 0.025 m³/s y 10 m³/s) y una horquilla de saltos entre 1 y 200 m. Su rendimiento máximo es inferior al 87%, pero se mantiene casi constante cuando el caudal desciende hasta el 16% del nominal, y tiene un mínimo técnico inferior al 10% del caudal de diseño. El agua entra en la turbina a través de un distribuidor, y pasa a través de la primera etapa de alabes del rodete, que funciona casi completamente sumergido (incluso con un cierto grado de reacción). Después de pasar por esta primera etapa, el flujo cambia de sentido en el centro del rodete y vuelve a cruzarlo en una segunda etapa totalmente de acción. Ese cambio de dirección no resulta fácil y da

lugar a una serie de choques que son la causa de su bajo rendimiento nominal. El rodete consta de dos o más discos paralelos, entre los que se montan, cerca del borde, unas laminas curvadas que hacen el papel de alabes. Estos rodetes se prestan a una construcción artesanal en países en vía de desarrollo, aunque naturalmente nunca alcanzarán los rendimientos de las unidades construidas con los medios técnicos apropiados [2].

5.3.2. Turbinas de reacción

5.3.2.1. Turbinas Francis

Son turbinas de reacción de flujo radial y admisión total, muy utilizadas en saltos de altura media, equipadas con un distribuidor de alabes regulables y un rodete de alabes fijos. En las turbinas Francis rápidas la admisión sigue siendo radial, pero la salida tiende a ser axial. En estas turbinas el agua se desplaza como encauzada en una conducción forzada, pasando del distribuidor -fijo al rodete -móvil- al que cede su energía, sin entrar, en ningún momento, en contacto con la atmósfera. Las turbinas Francis pueden ser de cámara abierta – generalmente para saltos de poca altura - o de cámara en espiral. En las turbinas con cámara en espiral, la carcasa, dependiendo del tamaño, se construye en hormigón armado, en acero soldado o en hierro fundido. Al ser uniforme el volumen de agua que llega a cada alabe del distribuidor, el caudal que pasa por cada sección del caracol es proporcional al arco que le queda por abastecer. En las turbinas de reacción, el agua a la salida del rodete, pasa antes de llegar al canal de descarga, por un tubo de aspiración o difusor, cuya misión es recuperar parte de la energía cinética contenida en el agua que abandona el rodete a una velocidad elevada. Para disminuir la velocidad con que el agua llega al canal de descarga - la pérdida cinética es proporcional al cuadrado de la velocidad - se aumenta la sección de salida del difusor adoptando un perfil cónico. Su función es especialmente crítica en los rodetes de alta velocidad específica porque el agua sale de estos rodetes a una velocidad especialmente elevada. En turbinas de eje horizontal es importante

que el cuerpo de la turbina esté perfectamente anclado en bloques de hormigón para evitar que las vibraciones limiten su campo de funcionamiento [2].

5.3.2.2. Turbinas Kaplan y de hélice

Son turbinas de reacción de flujo axial. Los alabes del rodete en las Kaplan son siempre regulables, mientras que los de los distribuidores, pueden ser fijos o regulables. Si ambos son regulables la turbina es una verdadera Kaplan; si solo son regulables los del rodete, la turbina es una Semi-Kaplan. Para su regulación, los alabes del rodete giran alrededor de su eje, accionados por unas manivelas, que son solidarias de unas bielas articuladas a una cruceta, que se desplaza hacia arriba o hacia abajo por el interior del eje hueco de la turbina. Este desplazamiento es accionado por un servomotor hidráulico, con la turbina en movimiento. Las turbinas Kaplan son de admisión radial mientras que las semi-kaplan puede ser de admisión radial o axial Las turbinas de hélice se caracterizan porque tanto los alabes del rodete como los del distribuidor son fijos, por lo que solo se utilizan cuando el caudal y el salto son prácticamente constantes. La turbina bulbo es una derivación de las anteriores, caracterizada porque el agua pasa axialmente a través de alabes directrices fijos y porque el generador y el multiplicador (si existe) están contenidos en una carcasa estanca, con forma de bulbo, sumergida en el agua. Las bombas centrífugas pueden trabajar como turbinas sin más que invertir su sentido de giro y hacer pasar el agua de la salida hacia la entrada. Como no tienen posibilidad de regulación, solo pueden utilizarse con un caudal y una altura de salto prácticamente constantes [2].

Para la selección de la turbina se hace necesario verificar cuales turbinas se encuentran dentro del rango de funcionamiento según la altura que esta expresada en la siguiente tabla, en dicha tabla se muestra en negrita las turbinas que pueden funcionar a la altura de este caso particular (8m).

TIPO DE TURBINA		RANGO DE APLICACIÓN DE LA CAIDA (m)
POR CONVERSIÓN DE ENERGÍA	POR DIRECCIÓN DE FLUJO	
REACCIÓN	Bulbo Tubular	5 - 30
	Kaplan o flujo Axial	5 – 80
	Francis	2 – 750
	Flujo Radial	100 – 700
IMPULSO	Pelton	30 – 1800
	Turgo	15 – 300
	Cross Flow Michell-Banki	1 - 50

Tabla 8. Rangos de aplicación de las turbinas [2]

Para continuar con la selección se observa a continuación una tabla que muestra las características principales de las turbinas hidráulicas, señalando en **negrita** aquellas que son aptas para nuestro uso:

TURBINA		Ns (rpm)	Q (m/s)	H (m)	P (kW)	η máx. %
Acción	Pelton	1Ch: 30 2Ch: 30-50 4Ch: 30-50 6Ch: 50-70	0.05-50	30-1800	2-300000	91
	Turgo	60-260	0.025-10	15-300	5-8000	85
	Michell-Banki	40-160	0.025-5	1-50	1-750	82
Reacción	Bomba rotodinámica	30-170	0.05-0.25	10-250	5-500	80
	Francis	L:60-150 N:150-250 R:250-400	1-500	2-750	2-750000	92

	Deriaz	60-400	500	30-130	100000	92
	Kaplan y de hélice	300-800	1000	5-80	2-200000	93
	Axiales	300-800	600	5-30	100000	93

Ch: Chorro Ns: Velocidad específica L: lento N: Normal R: Rápida

Tabla 9. Características principales de las turbinas hidráulicas [2]

De esta consideración se puede decir que la turbina que mas se adapta a este caso es la turbina Michell-Banki, que operaría a 160 rpm, con un caudal de 0,1252 m³/s y un salto neto de 7,7 m. Esta selección se basa principalmente en el hecho de que a mayor sea el valor de la velocidad de giro de la turbina mayor podrá ser la velocidad de giro del generador para una relación de transmisión convencional, lo que proporciona una mayor economía en la selección del generador y el sistema de transmisión. Además de ello la selección está en concordancia con las curvas de selección que se muestran en los anexos A y B.

En dichas gráficas se muestra la zona en la cual opera la turbina de acuerdo al caudal y la altura.

5.4. TRANSMISIÓN MECÁNICA ENTRE LA TURBINA Y EL GENERADOR

Para determinar el tipo y las características del tipo de transmisión mecánica entre la turbina y el generador es necesario conocer el valor de la velocidad de rotación del generador en rpm así como de la turbina; en primer lugar para el generador se tiene la siguiente tabla que indica la velocidad de rotación en rpm dependiendo de la potencia que se genera como sigue [2]:

POTENCIA (kW)	VELOCIDAD (N) [rpm]
Hasta 2400	900
Hasta 4000	600
Hasta 8000	514
Hasta 28000	400

Hasta 60000	300
-------------	-----

De la tabla se puede observar que la velocidad del generador solo se ha expresado para potencias superiores a 2.4 MW, por otra parte se tiene que una regresión de dicha tabla de valores se ajusta a una curva exponencial decreciente, en la cual para un valor de 9,4141 Kw el valor de la velocidad de rotación del generador es de 1800 rpm, que corresponde a un generador de 4 polos a frecuencia industrial (60 Hz), de otro lado se tiene el cálculo de la relación de transformación como sigue [2]:

$$r = \text{rpm del generador} / \text{rpm de la turbina} \quad (200)$$

$$r = 1800 / 160 = 11,25 \quad (201)$$

Como se puede observar este valor de relación de transformación es muy alto y supone un diseño complicado y robusto para el sistema de transmisión, razón por la cual se hace necesario emplear un generador mas lento y con mayor número de polos a fin de emplear un sistema de transmisión comercial y convencional; por ello se decide escoger un generador de 12 pares de polos a 600 rpm y frecuencia industrial (60 Hz).

De esta forma se obtiene la nueva relación de transmisión como sigue:

$$r = 600 / 160 = 3,75 \quad (202)$$

De esta forma se puede diseñar el sistema de transmisión con bandas especiales tipo 5V ó 8V teniendo en cuenta que poseen las siguientes ventajas especiales sobre los sistemas de transmisión basados en engranajes de dientes helicoidales o los sistemas de engranajes corrientes [2]:

- Posibilidad de unir el eje conductor con el eje conducido a distancias relativamente altas comparadas con los demás sistemas.

- Aparte de los cojinetes no se requiere lubricación.
- Costo inicial relativamente bajo.
- Sencillez de construcción y mantenimiento.
- Eficiencias del orden de 95% a 97%.

Para la selección del sistema de transmisión se utilizó la siguiente tabla de acuerdo con el número de revoluciones del generador y la turbina:

RPM DEL GENERADOR	POTENCIA EN KW									
	20	50	80	110	140	170	200	250	300	350
900	1	2	4	5	6	7	8	10	12	14
600	2	3	5	6	8	9	11	14		
450	2	4	6	8	10	12	14			
360	2	4	7	9	12	14				
300	2	5	8	11	14					

Tabla 10. Numero de bandas especiales tipo 8v de acuerdo con la potencia del generador

[2]

De la anterior tabla se tiene un sistema de transmisión con 2 bandas especiales tipo 8v; a continuación se presenta una tabla con los valores de relación de transmisión con diámetros de poleas estandarizados y no estandarizados, los valores no estandarizados se muestran con sombra:

DIAMETRO mm	300	330	440	560	740	900	1125
300	1,00	1,10	1,46	1,86	2,47	3,00	3,75
330		1,00	1,33	1,69	2,24	2,72	3,41
440			1,00	1,27	1,68	2,04	2,56
560				1,00	1,30	1,60	2,01
740					1,00	1,22	1,52

900						1,00	1,25
1125							1,00

Tabla 11. Relación de transmisión con diámetros de poleas estandarizados para bandas tipo 8V [2].

Con los datos proporcionados se concluye que el sistema de transmisión debe tener dos bandas especiales tipo 8v en dos poleas de 300 y 1125 mm de diámetro que proporcionan una relación de transmisión $r = 3,75$; cabe anotar que la polea de 1125 mm de diámetro no es una polea estandarizada y se debe construir por encargo.

Para el cálculo de la velocidad tangencial en cada una de las poleas tenemos la siguiente ecuación:

$$V = 2 * \pi * r * N / 60 = \pi * D * N / 60 \quad (203)$$

$$V = w * D / 2 \quad (204)$$

En donde w es la velocidad angular de la polea y D es el diámetro de la rueda. Así se tiene para la polea más pequeña una velocidad tangencial $V1$ y para la polea más grande una velocidad tangencial $V2$ como sigue:

$$V1 = \pi * 0,3 * 600 / 60 \quad (205)$$

$$V1 = 9,42 \text{ m/s} \quad (206)$$

$$V2 = \pi * 1,125 * 160 / 60 \quad (207)$$

$$V2 = 9,42 \text{ m/s} \quad (208)$$

Como era de esperarse ambas velocidades tangenciales tienen el mismo valor puesto que se trata de la misma banda; a continuación se muestran los valores máximos permitidos de velocidades tangenciales para correas de diferentes tipos:

VELOCIDADES MÁXIMAS RECOMENDADAS PARA TRANSMISIÓN CON

CORREAS	
Correa plana corriente	$V_{\max} < 25\text{m/s}$
Correa especial de fibras artificiales	$V_{\max} < 50\text{m/s}$
Correa trapezoidal estándar	$V_{\max} < 30\text{m/s}$
Correas trapezoidales con alma de acero	$V_{\max} < 50\text{m/s}$

Tabla 12. Velocidades máximas recomendadas para transmisión con correas [2]

Como se puede observar la velocidad de las bandas v utilizadas en el diseño no sobrepasa los límites de seguridad especificados anteriormente.

5.5. FUDAMENTOS PARA LA SELECCIÓN DEL GENERADOR

Los generadores eléctricos para estas aplicaciones son máquinas eléctricas rotativas que se acoplan directa o indirectamente a los rodetes de las turbinas y así, conjuntamente, producen energía eléctrica o electricidad.

5.5.1. Tipos de generadores utilizados en MCH.

Existen dos tipos de generadores utilizados para las MCH: el generador síncrono y el generador de inducción o asíncrono.

5.5.1.1. Generador Síncrono

El generador síncrono es la máquina de uso prioritario en las unidades de generación. Con el tiempo ha evolucionado en cuanto a magnitud de potencia y métodos de enfriamiento, aún cuando su estructura básica se ha mantenido invariable [2].

Estos generadores se caracterizan porque la velocidad de giro de la máquina permanece invariable y origina en la corriente alterna, la frecuencia síncrona normalizada. La velocidad de rotación es dada por la turbina hidráulica.

Las frecuencias síncronas normalizadas son de 50 y 60 Hz y la velocidad síncrona es deducible de la frecuencia (f) y el número de polos de la máquina (p) de la siguiente forma:

$$n_s = \frac{120 \times f}{p} [rpm] \quad (209)$$

El generador síncrono tiene el bobinado de campo excitado por corriente continua y la tensión desarrollada en la armadura es alterna, de allí que también se denomine alternador. La frecuencia de la tensión de salida es la síncrona, la forma de onda puede tomarse como senoidal y por el acomodo de las bobinas de armadura dar lugar a una o más fases [2].

5.5.1.1.1. Regulación de tensión

En sistemas autónomos como las microcentrales hidráulicas que no se interconectan a la red de energía eléctrica, los alternadores proporcionan energía para atender necesidades domésticas, iluminación pública y energía industrial, por lo cual es necesario el control de la tensión de salida que se logra manteniendo la regulación de tensión en un rango mínimo de variación [2].

- **Regulador automático de tensión (AVR) electrónico.** Es un dispositivo fabricado con elementos de estado sólido, montados sobre una tarjeta impresa. Su misión es mantener el nivel de tensión constante en cualquier condición de carga dentro del valor nominal del alternador aún con variaciones de la velocidad. Para esto toma como señal la tensión de salida del alternador, la compara y emite automáticamente hacia el campo de la excitatriz la

corriente continua necesaria para mantener la tensión en el nivel de calibración [2].

Este sistema de excitación fue construido especialmente para los generadores sin escobillas por la reducida potencia de excitación que demandan las excitatrices, su aplicación se ha extendido a los alternadores de mayor potencia, constituyendo los llamados excitadores estáticos. Los niveles de regulación de tensión se encuentran en valores usuales de $\pm 1,5\%$ llegando hasta $\pm 0,25\%$ [2].

➤ **Reguladores de tensión automático “compuesto”.** Es un sistema electromagnético sin realimentación de señal y está conformado por los siguientes elementos:

- Reactancia lineal. Se encarga de suministrar la corriente para la excitación de la tensión de vacío.
- Transformador de corriente. Conectado en serie con la carga que incrementa la corriente de excitación, para compensar a la reacción de armadura en magnitud y fase.
- Puente rectificador. Aquí ambas corrientes se suman geométricamente y se convierten en corriente continua de excitación [2].

Con un buen dimensionamiento se llega al conseguir regulaciones de $\pm 2\%$ y es usual conseguir que cualquier alternador excitado con este sistema tenga una regulación de $\pm 3,5\%$. La aplicación normal es en alternadores con escobillas, especialmente los de armadura rotativa, lo cual constituye un sistema bastante robusto y de alta durabilidad [2].

El método de tomar la excitación a partir de la tensión y de la corriente, permite al alternador tener una gran capacidad para el arranque de motores eléctricos. La

tensión generada depende de la velocidad de giro, por lo tanto está autoprotegido contra sobreexcitación ante caídas de la velocidad [2].

5.5.1.1.2. Criterios de selección.

Conociendo las características de operación de los alternadores, se tienen en cuenta las siguientes consideraciones para su uso en PCH.

- Arranque de motores eléctricos. El alternador puede soportar altas corrientes instantáneas de carga a bajos factores de potencia, lo que es típico del arranque de un motor de inducción.
- Operación en paralelo. Los generadores con AVR electrónico están preparados para trabajar en paralelo con otra máquina con excitación similar de igual o diferente potencia. Si el AVR es compuesto, la operación en paralelo sin dispositivos adicionales especiales, se limita a máquinas iguales o de la misma familia, de manera que tengan excitación de igual valor.
- Los alternadores se preparan para arreglos de dos o más tensiones de generación según la conexión elegida [2].

5.5.1.1.3. Inconvenientes principales para su uso.

El uso de este tipo de generadores presenta algunos inconvenientes entre los cuales los mas significativos son:

- Los alternadores estándar de fabricación actual son de un solo cojinete, por lo que para uso con turbinas, se debe solicitar el alternador especial con dos cojinetes y demás características.
- La velocidad debe ser mantenida en rangos estrechos de regulación; comúnmente aceptan una caída de 5% de la velocidad, de lo contrario se

presenta exceso de calentamiento por sobreexcitación. En casos límite se admite hasta una caída del 15% de velocidad para cargas parciales menores al 60%.

- Las relaciones aproximadas de peso y costo en los generadores especiales es: 1800 rpm, peso 100% 1200 rpm, peso 230% 900 rpm, peso 350%
720 rpm, peso 500% 600 rpm, peso 580% [2].

5.5.1.2. Generador de Inducción

Al igual que un generador, una máquina de inducción tiene bastantes limitaciones. Como carece de un circuito de campo separado, un generador de inducción no puede producir potencia reactiva, de hecho la absorbe por lo cual se le debe conectar todo el tiempo una fuente externa de potencia reactiva, para mantener el campo magnético de su estator. Esta fuente externa de potencia reactiva debe controlar también el voltaje terminal del generador. Sin corriente de campo, un generador de inducción no puede controlar su propio voltaje de salida. Normalmente, el voltaje del generador se mantiene por medio del sistema de potencia externa al cual está conectado [2].

La mayor ventaja de un generador de inducción es su simplicidad, ya que no necesita un circuito de campo separado ni tiene que ser accionado continuamente a una velocidad fija. Mientras la velocidad de la máquina tenga un valor mayor que la velocidad síncrona, para el sistema de potencia al cual está conectada, funcionará como generador [2].

5.5.1.2.1. Funcionamiento independiente

Una máquina de inducción puede funcionar como un generador aislado, independiente de cualquier sistema de potencia, mientras haya condensadores

disponibles para proporcionar la potencia reactiva requerida por el generador y por cualquier carga conectada [2].

5.5.1.2.2. Regulación de tensión.

El generador conectado a la red no necesita regulación de la tensión pues se alimenta de ella misma. Al generador autoexcitado se le conectan condensadores convenientemente dimensionados para que exciten la máquina cuando alcance la velocidad próxima a la nominal y que le permitan entregar su potencia nominal a la velocidad nominal. La tensión se estabiliza por efecto de la saturación magnética en un valor mayor que el nominal [2].

- **Controlador para el generador de inducción autoexcitado (CGI).** Para hacer factible el uso práctico de este generador, es necesario que la frecuencia y tensión sean reguladas dentro de límites aceptables. El controlador es un regulador de tensión, que mide el valor generado. Si existe mayor tensión que la calibrada, envía corriente a una carga auxiliar de regulación o lastre. Como consecuencia, disminuye la tensión generada y viceversa [2].

Por ser sensible sólo a la tensión, este controlador no debe usarse cuando la turbina tiene regulador mecánico de velocidad, por la lentitud de respuesta de este último que sensa únicamente velocidad [2].

5.5.1.2.3. Criterios de selección.

Presenta las siguientes ventajas:

- Son de construcción simple, robusta y confiable.
- Son de fácil adquisición, a bajo costo, como motores.
- Prácticamente no requieren mantenimiento (no hay escobillas).

- Soportan sobrevelocidades del orden del 200%.
- La tensión generada depende de la magnitud de los condensadores, la velocidad de giro, la corriente y el factor de potencia de la carga.
- Cuando se rebobina un estator de motor de inducción, para este fin, se logran diversas combinaciones de tensión y número de polos, escoger el nivel de saturación, disminución limitada de la velocidad de giro para un acople directo con la turbina y repotenciado de motores usados [2].

5.5.1.2.4. Inconvenientes principales para su uso.

Requiere protección de sobretensión que se presenta durante un embalamiento, falla del CGI o de las resistencias de regulación. El modo más económico es colocar fusibles a los condensadores. El uso de un CGI implica que el aprovechamiento hídrico sea a flujo permanente de toda el agua utilizada para suministrar la máxima carga. Como toda máquina de inducción, el desbalance de corrientes de carga va a provocar exceso de calentamiento en el motor, por lo que deben ser limitadas a un máximo del 10% [1].

La potencia reactiva de la batería de condensadores es considerable, 70 – 100% de la potencia nominal del generador, por consiguiente el costo de los condensadores y de los condensadores no lineales es representativo, comparado con el costo total. Ello hace que en la actualidad su utilización sea limitada [2].

5.5.2. Selección del generador

Con base a los anteriores criterios, a las ventajas y desventajas que presenta cada uno, el que mejor se adapta a esta microcentral es un generador síncrono. Como se cálculo en el numeral 5.4 este debe ser de 12 pares de polos a 600 rpm y frecuencia industrial (60 Hz) y a 220 V.

5.6. POTENCIA GENERADA

La potencia del recurso hidroenergético está dada en función del caudal y de la altura disponible. Dado que la potencia neta del recurso no considera las pérdidas en los diferentes elementos de la obra y la eficiencia de los equipos, debe conocerse la potencia real teórica, de la siguiente forma [3]:

$$P_R = 9,81 \times n_t \times n_j \times Q \times (H - \Delta H) \quad (210)$$

donde, 9.81 es un coeficiente
 n_t es la eficiencia de la turbina, se puede tomar como $n_t = 0,77$
 n_j es la eficiencia del generador, se puede tomar como $n_j = 0,95$
H es la caída bruta
 ΔH son las pérdidas de caída en la tubería de presión y accesorios.

Teniendo en cuenta los datos obtenidos anteriormente se tiene que la potencia que se puede generar es:

$$P_R = 9,81 \times 0,77 \times 0,95 \times 0,1252 \times (8 - 0,3134) \quad (211)$$

$$P_R = 6,9 \text{ kW} \quad (212)$$

5.6. REGULACIÓN DE VELOCIDAD

Existen muchas maneras de aprovechar la energía generada por el agua al golpear las paletas o alabes de una rueda o turbina hidráulica. Algunos de estos sistemas operan con la turbina girando a velocidad constante en todo momento, mientras que otros lo hacen con la turbina trabajando a velocidad variable. Esto ocurre por el uso que se le da a la energía generada y a la existencia o no de control de velocidad en el equipo generador [2].

Los sistemas que operan a velocidad constante están representados típicamente por microcentrales hidroeléctricas que suministran electricidad en corriente alterna. Estos sistemas requieren de una operación a velocidad constante para no dañar el generador eléctrico o los equipos y máquinas que utilicen esta energía. Dado que la frecuencia de la corriente eléctrica es directamente proporcional a la velocidad de giro del generador, una variación en la velocidad de giro se traduce en una variación en la frecuencia del sistema eléctrico [2].

En aquellas centrales que no tienen un sistema de regulación de la velocidad, una variación en la demanda de energía, inmediatamente producirá un cambio en la velocidad de giro de la turbina, por lo tanto el generador empezará a girar a otra velocidad síncrona, con la consecuente variación en la frecuencia y en el voltaje de línea [2].

Por ello, cuando se prevé que en el sistema existirán continuamente variaciones en la demanda, es necesario instalar algún sistema de compensación que mantenga constante la velocidad de la turbina. Existen básicamente dos maneras de controlar la velocidad del grupo generador:

- Por regulación del caudal de agua en la turbina
- Por regulación de la carga.

5.7.1. REGULACIÓN DE VELOCIDAD POR MEDIO DEL CAUDAL DE AGUA EN LA TURBINA

Para obtener una velocidad constante del grupo generador, existiendo una demanda variable, es necesario que en todo momento la potencia disponible al ingreso del grupo generador, sea igual a la potencia eléctrica a la salida de este más las pérdidas internas del grupo [2].

$$P_{Entrada} = P_{Salida} + P_{Pérdidas} \quad (213)$$

Este equilibrio se logra regulando la cantidad de agua que ingresa a la turbina, de tal manera que si se produce un aumento en la demanda, se abre una válvula que permite el mayor ingreso de agua, ocasionando que la potencia generada se iguale a la demanda [2].

Existen dos maneras de realizar esta regulación: manual o automáticamente.

5.7.1.1. Regulación manual

Tradicionalmente, la regulación manual se ha utilizado principalmente en microcentrales de potencia menor a 50 kW, ya que su costo inicial es bajo. Este tipo de regulación se emplea en aquellos sistemas donde no existen grandes fluctuaciones en la demanda de energía [2].

Para utilizar este sistema se requiere de un operador en la casa de máquinas, que controle las variaciones de frecuencia en el sistema y que las compense variando el caudal de agua en la turbina. La variación del caudal se realiza por medio de la válvula de aguja o de álabes directrices, según el tipo de turbina empleada [2].

5.7.1.2. Regulación automática.

La regulación automática de la velocidad por regulación del caudal proporciona un sistema con frecuencia y voltaje estables. Este sistema se emplea cuando se prevé que en el sistema eléctrico existirán grandes fluctuaciones instantáneas en la demanda [2].

Este tipo de regulación utiliza los llamados reguladores de velocidad oleomecánicos y sus variaciones tales como los taquímetros electro-mecánicos y electro-hidráulicos, entre otros. Por su elevado costo este sistema resulta poco apropiado en microcentrales y es más utilizado en centrales de más de 100 kW de potencia [2].

5.7.2. REGULACIÓN DE VELOCIDAD POR REGULACIÓN DE CARGA

A diferencia de la regulación por caudal de agua, en la que en todo momento la turbina regula el paso de agua con el fin de igualar la potencia generada con la demanda para mantener la velocidad de giro constante, en los sistemas de regulación de carga el grupo generador entrega una potencia constante; es decir, no hay regulación de caudal de agua. No obstante, debe cuidarse que el grupo genere una potencia mayor o igual a la máxima potencia esperada en la demanda. El exceso de potencia generada se disipará en forma de calor a través de resistencias sumergidas en agua o expuestas al aire [2].

La regulación de velocidad por regulación de carga puede realizarse de manera manual o automática, siendo esta última la más utilizada [2].

5.7.2.1. Regulación manual

Es poco utilizada. Se requiere de un banco de resistencias (hornillas eléctricas, lámparas incandescentes, baterías, etc.), que el operador irá conectando o desconectando según aumente o disminuya la frecuencia en la red eléctrica. Una ventaja de la regulación manual es que el operador la puede realizar desde su vivienda y no tiene que estar permanentemente en la casa de máquinas. Este sistema es especialmente útil para microcentrales, que atienden a un número reducido de usuarios [2].

5.7.2.2. Regulación automática

Con el fin de lograr soluciones más económicas y sencillas en el mantenimiento y operación de los reguladores automáticos de velocidad, en los últimos años se ha desarrollado el sistema de regulación electrónica de carga. Este sistema ha encontrado su campo de aplicación principalmente en el rango de las microcentrales hidroeléctricas [2].

En este tipo de regulación, el generador produce una potencia constante y el regulador electrónico de carga, a través de unas válvulas electrónicas (tiristores), deriva la energía no consumida por la demanda a un sistema de disipación de energía [2].

Algunas de las principales ventajas de estos reguladores respecto de los reguladores oleomecánicos y similares son:

- Simplicidad del diseño de las turbinas al no existir la necesidad de regular el caudal.
- Menor costo
- Sencillez en la operación y mantenimiento
- No produce sobrepresiones en la tubería de presión.
- Fácil ensamblaje o fabricación.
- Mayor rapidez de la respuesta a cambios de carga.

5.7.2.2.1. Componentes

Los reguladores electrónicos de carga están compuestos básicamente por cuatro unidades:

- **Fuente de poder.** Toma la energía del alternador y se encarga de suministrarla en corriente continua, al nivel de tensión requerido por todos los circuitos electrónicos que componen el regulador [2].
- **Unidad de control y protección.** Es el corazón del regulador y consiste en los circuitos sensores de frecuencia, voltaje y corriente. Además contiene los relés, interruptores y fusibles de protección [2].

➔ **Unidad de potencia.** Contiene los circuitos de disparo para regular la cantidad de energía que se disipa en la carga de lastre o secundaria. Además contiene los tiristores y relés en caso de regulación escalonada [2].

Actualmente existen dos sistemas de regulación electrónica de carga: una es la regulación continua o analógica y la otra es la regulación escalonada o digital [2].

5.7.3. CLASIFICACIÓN DE LOS REGULADORES DE CARGA

En nuestro país son muy pocas las empresas que ofrecen este tipo de equipos o los servicios de importación. Empresas como Aprotéc y Colturbinas pueden suministrar este tipo de equipos, esta última ha importado desde sus inicios productos Thomson & Howe de los cuales se obtuvo alguna información [2].

La empresa Thomson & Howe presenta unos criterios de selección para los reguladores basados en los niveles de potencia generados por la microcentral de la siguiente manera:

- Menos de 4kW, se recomienda un “A2”, “A” o “J”.
- Entre 4kW y 16kW, se recomienda un “A2” o “A” con mínimo dos relés.
- Entre 16kW y 75kW, se recomienda un “A2” o “A” con un relé adicional [9].

5.7.3.1. Características Técnicas controladores Thomson & Howe

Producto “J” - Controlador de carga Junior. Este controlador de carga provee 60 Hz, gobernando generadores A.C. síncronos en lugares donde sea importante la economía. Es aplicable en:

- Plantas síncronas aisladas que no presenten necesidades de control de carga.
- Sistemas monofásicos a 120 / 240V, menores de 4kW a 240V ó 2kW a 120V.

Descripción. Es un gobernador análogo del tipo de monitorización de frecuencia. Está alojado en un encapsulado de acero ventilado, su peso es de 6 libras y sus dimensiones son: 10" de ancho, 6" de alto y 6" de profundidad [9].

Producto "A" – Gobernador de control de carga computarizado. Su propósito es proveer 60 Hz a sistemas de potencia A.C. independientes y aislados, de menos de 100 kW (200 kW con opción de doble triac). También provee control automático de cargas en 8 niveles de prioridad a través el uso de relés remotos (control remoto). Puede entregar adicionalmente, un gran incremento en la utilidad de la generación y también prevenir automáticamente sobrecargas de la planta por el aumento de la carga en las horas pico .

Es aplicable a los siguientes sistemas:

- Sistemas aislados con generación conectada de 1 a 200 kW.
- 120 / 240 o 240 / 280 voltios monofásicos, o 240 ó 416 voltios trifásicos.

Descripción. Este producto está encapsulado en una cámara de acero sin ventilación. El encapsulado tiene 12" de ancho por 14" de alto y 6" de profundidad. El panel frontal tiene un frecuencímetro y un medidor de carga, la cual de acuerdo a tantas luces encienda, indicará el estatus de los arreglos de las cargas manejadas [9].

Producto "E" – Control de frecuencia. El propósito de este controlador es el de proteger los contactos eléctricos de sobre frecuencias y bajas frecuencias, sensando el sistema de potencia aislado, y proteger de sobrevelocidad cuando sean usados con un deflector de boquillas. Aplicable a los sistemas aislados entre 1 y 500 kW.

Ajuste el límite de frecuencia: Los límites superiores e inferiores separadamente pueden ser ajustables para desviaciones entre 0.5 Hz y 20 Hz.

Características: Operación a 120 voltios, medidor análogo de frecuencia 0 – 100 Hz, puntos de ajuste a sobre o baja frecuencia [9].

5.7.3.2. Equipo opcional del regulador.

➤ Deflector de boquillas, control de sobrevelocidad

El controlador electrónico de carga hace innecesario al deflector de boquillas para un control de velocidad normal. Sin embargo, si la turbina funciona sin precauciones, el cierre automático es importante para proteger los cojinetes y la armadura de posibles daños. Los deflectores de boquillas estandarizados en modelos 1525 y 2435, se ofrecen para cada una de las unidades más pequeñas. El deflector incluye cojinetes para el montaje del deflector, brazo pesado, cilindro mecánico de soporte, y una válvula de solenoide de soporte. El control de frecuencia de la Thomson & Howe puede ser ordenado por control de deflector de boquilla [2].

➤ Control de la aguja de la boquilla.

La turbina estándar está completa con boquillas arregladas, lo cual puede ser cambiado por el cierre de la turbina. Las agujas de la boquilla ofrecen un control manual del caudal. Todo flujo desde cero hasta el flujo de diseño puede ser fácilmente seleccionado cuando la máquina esté en funcionamiento. Este control se puede ordenar con cilindros hidráulicos especiales para control automático de flujo. Todos estos dispositivos tienen agujas de acero inoxidable y picos para larga vida [2].

5.6.4. Selección del regulador de carga.

Tomando como punto de partida la potencia a generar en la microcentral, se selecciona el tipo de controlador siguiendo los criterios de clasificación según la potencia y las características técnicas de cada uno de ellos .

El regulador de carga que más se ajusta a las características y parámetros de la microcentral es el producto “A” – Gobernador de control de carga computarizado.

Los costos dados por la empresa Thomson & Howe, relativos a los controladores son dados en dólares y se presentan en la siguiente tabla.

Producto tipo	Precio
“J2” Controlador de carga Junior	922,00
“J3” Controlador de carga Junior	1640,00
“A2” Controlador de carga compuesto	2060,00
“E” Regulador de frecuencia	398,00

Tabla 13. Precios de los controladores [9]

5.8. SUBESTACIÓN

Para este caso no es necesaria una subestación, debido a que la potencia generada es pequeña y además la casa de máquinas se encuentra cerca del lugar al que se le va a suministrar la energía eléctrica, no se necesita subir la tensión para transmisión.

OBSERVACIONES

- Este proyecto presenta el diseño de las obras civiles, así como la selección de equipos electromecánicos que se necesitarían para un futuro montaje de una microcentral hidroeléctrica en El Parque Ecológico El Portal. Para ello, se tomaron datos de altura en el lugar de posible ubicación y caudal en la fuente hídrica que pasa por allí.
- Con la implantación de este proyecto, las directivas del Parque Ecológico El Portal buscan un ahorro económico, al sustituir los recursos energéticos convencionales que son localmente costosos, por el aprovechamiento hidrológico de disponibilidad local.
- A nivel nacional, la empresa Colturbinas S.A. está en disposición de fabricar e instalar centrales hidroeléctricas a pequeña escala, para una capacidad máxima de 500 kW.
- Por medio de este proyecto se puede decir que es posible la construcción de una microcentral en El Parque Ecológico el Portal y suplir la demanda del área del restaurante.

BIBLIOGRAFÍA

1. Manual de la pequeña hidráulica, como llevar a buen fin un proyecto de minicentral hidroeléctrica. European Small Hydropower Association. Universidad Politécnica de Madrid. 1998
2. Martínez Arenas, Jairo Arturo y Florez Ortiz, Wilton Atonio.2000. Centrales hidroeléctricas a pequeña escala: perfil técnico para el departamento de Santander. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.
3. Ortiz Flórez, Ramiro. Pequeñas Centrales Hidroeléctricas. Bogotá 2001.
4. Pequeñas centrales hidroeléctricas – Síntesis
http://sintesis.univalle.edu.co/saladelectura/pequenhas_centrales.htm
5. Energía apropiada para comunidades aisladas del Perú
www.oei.org.co/sii/entrega7/art03.htm
6. Aprovechamientos hidroeléctricos de reducida potencia.
http://www.ambiente_ecologico.com/ediciones/072-07-2000/072-pub-elglobo.html
7. Microcentrales hidroeléctricas en Venezuela
www.monografias.com/trabajos13/micro/micro.shtml
8. Microcentral con red aislada.
www.cps.unizar.es/isf/html/mimr00a.html

9. Thomson and Howe Energy Systems Inc.

www.smallhydropower.com/thes.html

10. www.elportal.com.co

11. www.ossberger.de/index.php?sprache=es&pageid=1-3

12. www.itdg.org.pe/archivos/manualdeminiymicrocentraleshidraulicas.pdf

ANEXOS

ANEXO A

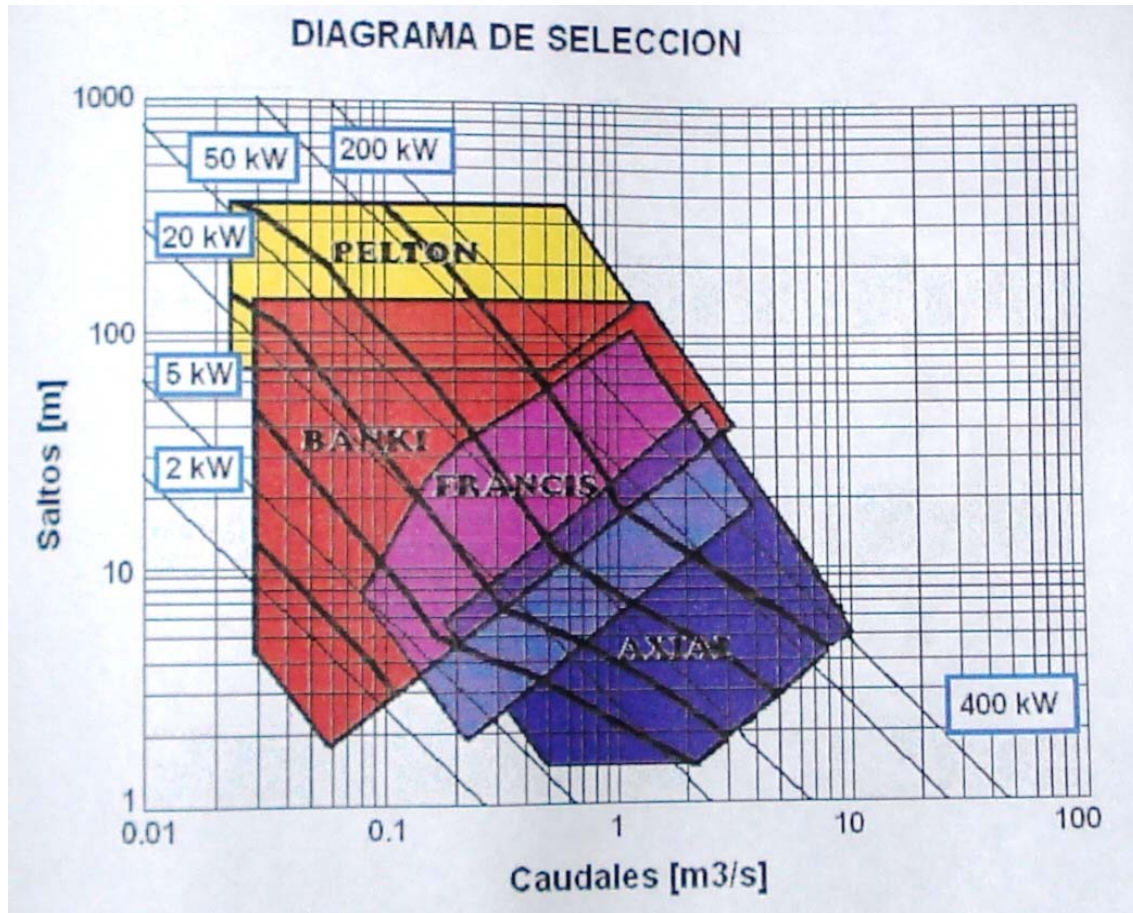


Diagrama de Selección de Turbinas

ANEXO B

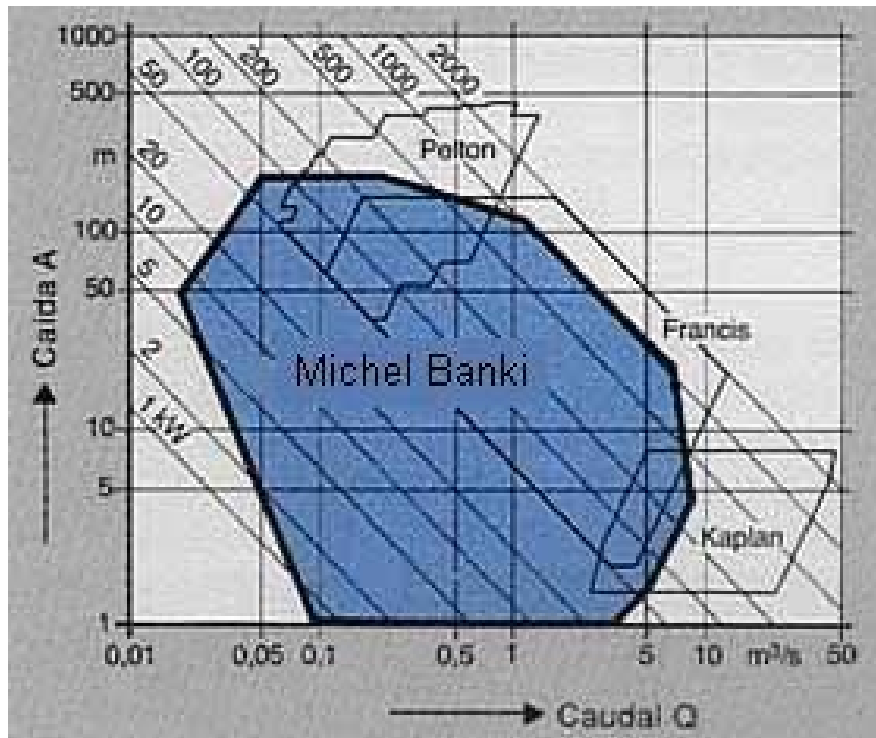
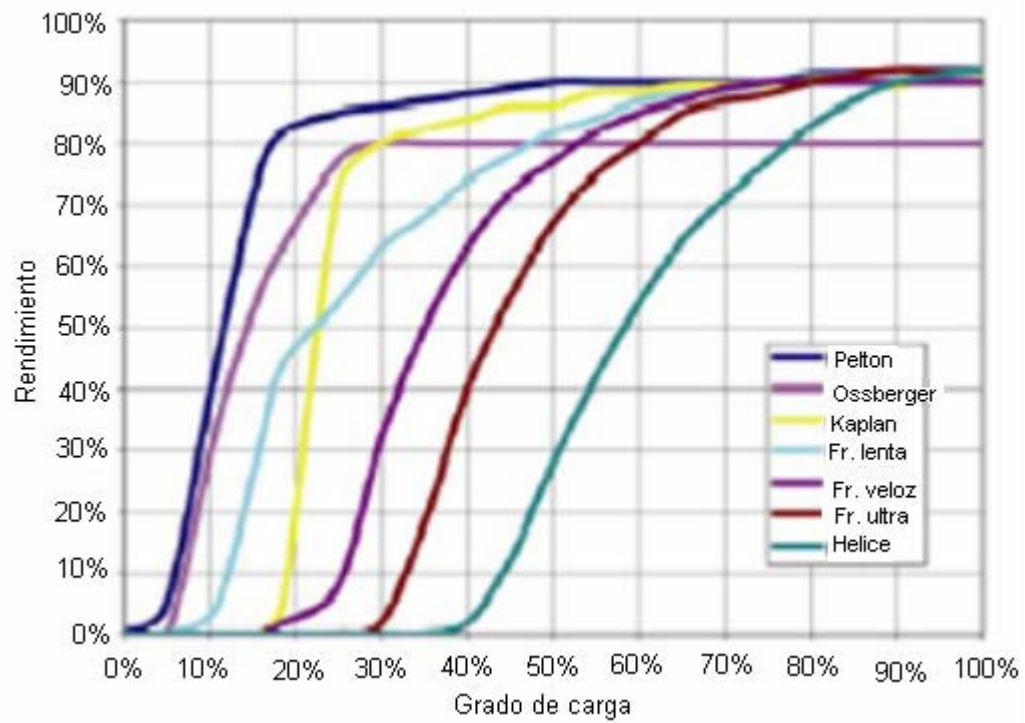


Diagrama de Selección de Turbinas

ANEXO C



Curvas rendimiento de las Turbinas

ANEXO D



Quebrada Fuente de Energía

ANEXO E



Estructura Existente