

**Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo**

**Facultad de Ingeniería Eléctrica**

**TESIS**

**CENTRAL HIDROELECTRICA BASADA EN UNA  
MICROTURBINA**

**Para obtener el Titulo de  
INGENIERO ELECTRICISTA**

**Presenta**

**EDUARDO RUIZ REYES**

**Asesor de Tesis**

**GILBERTO GONZALEZ AVALOS**

**Junio del 2009**

## Resumen

En el presente trabajo se estudia de manera profunda una micro-turbina hidráulica para centrales pequeñas de generación (mini-centrales hidroeléctricas). La turbina es del tipo Michell-Banki, radial- transversal, de admisión parcial, el rodete se asemeja a una jaula de ardilla. De acuerdo a estudios realizados este tipo de turbina a alcanzado rendimientos de hasta de un 85 % en sus dos etapas de admisión, de igual forma se analizan todos los parámetros para poder realizar un diseño y así lograr un rendimiento aceptable en dicha turbina, dichos parámetros se mencionan a continuación: selección del diámetro, número de álabes del rodete, cálculo de la velocidad, cálculo del ancho.

Para seleccionar el diámetro no es necesario emplear una ecuación ya que este parámetro se considera de carácter independiente siempre y cuando se hagan las siguientes consideraciones: si se reduce el diámetro se reduce el rendimiento de la turbina y a un diámetro mayor la velocidad de embalamiento es menor.

El número de álabes se debe realizar en base al diámetro de la turbina y de acuerdo con diferentes investigaciones el número óptimo de álabes está entre 24 y 30.

El ancho y la velocidad de la turbina son parámetros que dependen directamente de la altura del salto y del caudal del arroyo, debido a esto se indica como medir estos parámetros en el lugar donde se propone instalar la micro-turbina.

Teniendo la altura del salto y el caudal se procederá a calcular la potencia que podemos generar con el caudal mínimo y máximo del arroyo utilizado. Después se realizará un estudio de las características de los usuarios para poder calcular a cuantas familias podemos suministrar con la potencia generada. Ya teniendo todos los cálculos se estudian y se proponen cada uno de los elementos y dispositivos con los que cuenta una mini-central hidroeléctrica estableciendo un importante proyecto de generación beneficiando así a poblaciones rurales aisladas que no cuentan con energía eléctrica.

# Contenido

<b>Capítulo 1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1 La energía Mini-Hidráulica -----	1
1.2 Antecedentes -----	2
1.3 Objetivo -----	4
1.4 Justificación -----	4
1.5 Metodología -----	5
1.6 Descripción de la tesis -----	5
<b>Capítulo 2. Antecedentes</b>	<b>6</b>
2.1 La energía hidráulica -----	6
2.2 Evolución histórica de la mini-hidráulica -----	6
2.3 La mini-hidráulica en el mundo -----	8
2.4 La mini-hidráulica en México -----	9
2.5 Micro-turbinas hidráulicas -----	11
2.6 Centrales mini-hidráulicas -----	19
2.7 Tipos de centrales mini-hidráulicas -----	20
2.8 Turbina -----	23
2.8.1 Elementos de una turbina -----	24
2.8.2 Clases de turbinas -----	25
2.8.2.1 Turbina Pelton -----	25
2.8.2.2 Turbina Turgo -----	27
2.8.2.3 Turbina Michell-Banki-----	28
2.8.2.4 Turbina Francis -----	29
2.8.2.5 Turbina Kaplan y de Hélice-----	31
2.8.2.6 Turbina axial-----	33
2.8.2.7 Bombas que operan como turbinas-----	34

<b>Capítulo 3. Modelado de la micro-turbina Michell-Banki</b>	<b>36</b>
3.1 Turbinas hidráulicas-----	36
3.2 Potencia del salto de agua-----	37
3.3 Determinación del caudal-----	38
3.3.1 Método del llenado del tambor -----	38
3.3.2 Método del vertedero -----	39
3.3.3 Método del flotador -----	41
3.4 Curva de duración del caudal -----	42
3.5 Determinación de la altura del salto-----	44
3.6 Modelado de la micro-turbina Michell-Banki-----	45
3.6.1 Descripción de la micro-turbina Michell-Banki-----	46
3.6.2 Principios generales-----	48
3.6.3 Características operativas -----	52
3.6.4 Parámetros de diseño -----	54
3.6.4.1 Selección del diámetro -----	54
3.6.4.2 Cálculo de la velocidad -----	55
3.6.4.3 Cálculo del caudal de la micro-turbina -----	55
3.6.4.4 Número de alabes del rodete-----	56
3.6.4.5 Cálculo del ancho del rodete-----	57
3.6.4.6 Diseño del inyector -----	58
3.6.5 Características constructivas -----	61
3.6.6 Proceso de fabricación-----	63
3.6.7 Cálculos para la fabricación -----	65
3.6.8 Instalación-----	66
3.7 Equipo electromecánico auxiliar-----	67
3.7.1 Retenes-----	69
3.7.2 Sistema de acoplamiento-----	70
3.7.3 Generador Síncrono-----	71
3.7.4 Volante de inercia -----	71
3.7.5 Reguladores de velocidad-----	72
3.7.5.1 Regulación de velocidad con controlador electrónico de carga -----	72

3.7.5.2 Regulación de velocidad por medio del caudal de agua -----	73
<b>Capítulo 4. Proyecto de generación</b>	<b>74</b>
4.1 Hidrografía del estado de Michoacán-----	74
4.1.1 Sistema norte-----	74
4.1.2 Sistema del centro -----	75
4.1.3 Sistema sur -----	75
4.2 Medición de la altura del salto-----	78
4.3 Medición del caudal-----	79
4.4 Compromiso costo / calidad / sustentabilidad-----	80
4.5 Obra de toma (captación del agua) -----	81
4.6 Obra de conducción -----	83
4.6.1 Canal de conducción-----	83
4.6.2 Cámara de carga y desarenador -----	84
4.6.3 Tubería de presión -----	86
4.6.4 Válvulas de compuerta-----	88
4.7 Casa de maquinas -----	89
4.7.1 Casa de Maquinas de la central -----	90
4.8 Diseño de la turbina-----	91
4.8.1 Selección del diámetro -----	92
4.8.2 Cálculo de la velocidad -----	92
4.8.3 Número de álabes del rodete -----	93
4.8.4 Cálculo del ancho del rodete -----	93
4.8.5 Características operativas de la turbina -----	94
4.9 Acoplamiento y multiplicación de velocidad-----	95
4.10 Generación de electricidad -----	95
4.10.1 Generación alterna-----	96
4.10.2 Generador eléctrico de la central -----	97
4.10.3 Características operativas del generador -----	97
4.11 La regulación de tensión y frecuencia -----	98
4.11.1 Sistemas y dispositivos de regulación -----	99

4.11.2 Regulación de la central -----	100
4.12 Obras de distribución eléctrica -----	100
4.13 Potencia eléctrica instalada -----	101
4.14 Cálculo de la energía diaria -----	102
4.15 Casas habitación suministradas con la potencia instalada-----	103
4.15.1 Potencia Máxima-----	103
4.15.2 Potencia Mínima -----	105
4.16 Resumen del proyecto de generación-----	106
4.16.1 Altura y caudal-----	106
4.16.2 Obras civiles-----	106
4.16.3 Turbina-----	107
4.16.4 Acoplamiento-----	107
4.16.5 Generador-----	107
4.16.6 Reguladores de voltaje y frecuencia-----	107
4.16.7 Obras de distribución eléctrica-----	107
4.16.8 Potencia generada -----	108
<b>Capítulo 5. Conclusiones y Recomendaciones</b>	<b>109</b>
5.1 Entorno socioeconómico de la zona de influencia del proyecto-----	109
5.2 Beneficios económicos y sociales al desarrollar el proyecto -----	111
5.3 Conclusiones sobre las centrales mini-hidráulicas -----	113
<b>Bibliografía</b>	<b>115</b>

## Lista de Figuras

2.1.	Países con plantas hidroeléctricas con capacidades menores 10MW-----	9
2.2.	Tipos de ruedas hidráulicas -----	12
2.3.	Esquema general de de una mini-hidroeléctrica -----	13
2.4.	Micro-turbina tipo hélice de 1KW -----	17
2.5.	Elementos que componen una micro-turbina-----	18
2.6.	Componentes de una central mini-hidráulica -----	22
2.7.	Turbina Pelton-----	26
2.8.	Rodete de una turbina Pelton -----	26
2.9.	Turbina Turgo -----	28
2.10.	Turbina Michell-Banki -----	29
2.11.	Esquema general de una turbina Francis -----	31
2.12.	Rodete de una turbina Francis -----	31
2.13.	Turbina Kaplan -----	32
2.14.	Micro-turbina Kaplan -----	33
2.15.	Turbina tipo Bulbo -----	34
2.16.	Bomba-turbina -----	35
3.1.	Medida del caudal usando un tambor -----	39
3.2.	Vertedero con escotadura rectangular -----	40
3.3.	Método del flotador para medir el caudal -----	41
3.4.	Parte del río o canal lo más recto posible -----	42
3.5.	Medición de caudales en una cuenca -----	43
3.6.	Curva de duración de caudales por correlación -----	43
3.7.	Medición del la altura del salto -----	45
3.8.	Principales elementos de una micro-turbina Michell-Banki -----	47
3.9.	Entrada del caudal de una turbina Michell-Banki -----	48

3.10. Etapas de energía de una turbina Michell-Banki -----	49
3.11. Curva de rendimiento de una turbina Michell-Banki -----	50
3.12. Rodete y carcaza de una turbina Michell-Banki -----	51
3.13. Rodete Banki con discos intermedios -----	51
3.14. Turbina Michell-Banki de alabe regulador -----	53
3.15. Turbina Michell-Banki de compuerta reguladora -----	53
3.16. Turbina Michell-Banki diseñada por Skat -----	54
3.17. Corte transversal del inyector -----	59
3.18. Arco de admisión del inyector -----	60
3.19. Grafica de estandarización altura-caudal -----	62
3.20. Vista lateral de un rodete Banki de flujo cruzado -----	63
3.21. Preparación de los alabes -----	64
3.22. Instalación de la Micro-turbina -----	66
3.23. Turbina con entrada horizontal y vertical -----	67
3.24. Turbina con dispositivos auxiliares -----	68
3.25. Rodamiento de rodillos a rótula SKF -----	68
3.26. Chumacera de rodamiento de rodillos a rótula -----	69
3.27. Retenes de goma -----	70
3.28. Vista de un acople flexible -----	70
3.29. Vista de un generador síncrono Negrini de 200 KVA -----	71
3.30. Volante de inercia -----	72
3.31. Controladores electrónicos de carga -----	73
4.1. Potencial hidroeléctrico del estado de Michoacán -----	77
4.2. Arroyo utilizado para la instalación de la central -----	79
4.3. Obra de captación del rio de arroyo -----	82
4.4. Canal en forma rectangular de hormigón -----	84
4.5. Rejilla móvil protectora -----	85
4.6. Cámara de carga -----	86
4.7. Tubería de presión de 55cm de diámetro -----	88

4.8.	Casa de máquinas -----	89
4.9.	Mini-central hidroeléctrica -----	91
4.10.	Distribución monofásica con retorno por tierra -----	101

## Lista de Tablas

2.1.	Resumen de las centrales en operación en México -----	10
2.2.	Resumen de las posibilidades de la energía mini-hidráulica en el país ----	10
3.1.	Medición del caudal respecto a la altura del remanso -----	40
3.2.	Parámetros característicos de diferentes turbinas ensayadas -----	56
4.1.	Relación entre velocidad y diámetro de la tubería -----	87
4.2.	Datos de altura y caudal para diferentes tipos de turbinas -----	91
4.3.	Características de la turbina utilizada -----	94
4.4.	Características del generador -----	97
4.5.	Cuadro de consumo energético -----	103
4.6.	Potencia máxima y mínima generada -----	108

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1 La energía mini-hidráulica

La energía hidráulica es una energía derivada indirectamente de la energía solar, ya que es el sol, en último término, es el que regula el ciclo hidrológico. El agua, fuente utilizada para conseguir energía hidráulica, llega a la tierra de forma continua y es de carácter inagotable. Sin embargo, aunque el agua es un recurso renovable, la energía hidráulica en sí misma no es considerada como tal debido al gran impacto ambiental que producen las instalaciones necesarias para su obtención.

La energía hidráulica es la energía que posee el agua de un río, al realizar un salto o al desplazarse por un desnivel.

Esta energía puede aprovecharse con una turbina y transformarse a electricidad mediante un generador. Tanta más potencia eléctrica tendrá como mayor sea el desnivel efectuado por el agua.

Para conseguir centrales hidroeléctricas de gran potencia, algunas superan los 6000 MW, se construyen enormes presas en que elevan este desnivel a centenares de metros, cortando por completo el curso del río y anegando miles de hectáreas, llegando incluso a desalojar forzosamente pueblos enteros.

Las centrales mini-hidráulicas, en cambio, tienen un impacto ambiental muy reducido ajustándose mejor a la morfología del río y pudiendo producir energía con aguas pasantes, evitando así la construcción de grandes presas.

Las centrales hidroeléctricas con potencia inferior a 10 MW se denominan centrales mini-hidráulicas. La energía mini-hidráulica sí se considera, sin embargo, como una energía renovable ya que los sistemas de distribución y gestión empleados son diferentes a los de las centrales de elevada potencia. Para la obtención de energía mini-hidráulica no siempre es necesario incluir una presa en la instalación y si esta existe no debe superar los 15 metros de altura.

La mini-hidráulica es muy útil para abastecer pueblos o regiones montañosas alejadas de la red, o para aprovechar mejor los recursos hídricos, sobre todo de ríos no muy caudalosos, y vender la electricidad generada a la red.

A principios del siglo XX se construyeron numerosas centrales mini-hidráulicas para abastecer a pequeños municipios o industrias, aunque en el último cuarto de siglo éstas se sustituyeron por otras centrales de mayor tamaño y con mayor poder de distribución. Actualmente se está intentando volver a poner en marcha antiguas instalaciones, además de implantar otras nuevas, ya que están demostradas las ventajas de carácter medioambiental de este tipo de instalaciones.

Las instalaciones mini-hidráulicas contribuyen a la diversificación de las fuentes, permiten el acercamiento al usuario, convirtiendo la energía en un recurso gestionado de manera local, y dan servicio a zonas aisladas, como en el caso de las micro-centrales, de escaso impacto ambiental y múltiples posibilidades de localización.

La tecnología empleada en todos estos procesos es ya una tecnología madura debido a su larga trayectoria por lo que a nivel técnico no se esperan novedades importantes, lo que aporta seguridad y conocimiento en su aplicación. Nuestro país cuenta con un gran número de empresas que disponen a tecnología moderna que ofrece en el mercado una amplia gama de bienes de equipo de alta calidad y prestaciones, que van incorporando los últimos avances tecnológicos para incrementar los rendimientos, disminuir los costes y el impacto ambiental.

## **1.2 Antecedentes**

Se tiene conocimiento que los egipcios, 3000 años a. de C. fueron de los primeros pueblos en aprovechar la energía del agua al construir ruedas hidráulicas, los pueblos del medio oriente contaban con ruedas similares para abastecimiento de agua y molienda de granos, 1000 años a. de C.

Para el año 1806 había en Inglaterra medieval más de 5,000 molinos de agua y otros tantos en Europa continental, posteriormente fueron también utilizados para sierras madereras, telares, sistemas de bombeo, fuelles para hornos, trituradoras de madera, etc. Estas ruedas hidráulicas eran muy ineficientes ya que sólo transmitían la fuerza mecánica

mediante engranes rudimentarios, posteriormente el eje de transmisión se colocó en forma vertical acoplado directamente la rueda del molino lo que al eliminar los engranes se logró mayor eficiencia.

Para el año de 1837 ya se utilizaban las ruedas de choque en Francia y le siguió la rueda de reacción de eje vertical la cual opera en forma similar a la de un molino rociador giratorio para riego de jardines. Posteriormente, Segner modificó el diseño colocando ocho brazos curvos horizontales por donde pasaba el agua, Mannoury DEctot la modificó dejando solamente dos brazos. En 1824 Claude Burdin perfeccionó el diseño y dio a conocer una rueda hidráulica horizontal a la que se le dio el nombre de turbina de reacción. Con el tiempo esta turbina de Burdin fue sufriendo modificaciones y dio lugar a las de impulso, a las de presión o también conocidas como de reacción. Las de impulso dieron origen a las Pelton (1889, USA, Lester Allen Pelton) y las de reacción a las Francis (1847, Inglaterra, James Bicheno Francis) y las Kaplan (1914, Checoslovaquia, Victor Kaplan).

Las tres turbinas citadas, son las más conocidas en la actualidad; recientemente se han introducido nuevos diseños tipo tubular, de bulbo, y de pozo para cargas reducidas y grandes caudales además de las Michel-Banki de acción y de flujo cruzado. Para 1905 existían 7.35 MW de potencia instalada, 50 años mas tarde el récord era de 320 MW.

En México se han instalado un gran número de hidroeléctricas de mediana y baja potencia durante mucho tiempo como el medio de electrificación más fácil para aquellos lugares donde el recurso y las condiciones lo permitan, tal es el caso del poblado de Batopilas en el estado de Chihuahua donde se instaló una de las primeras hidroeléctricas de México, pero actualmente no cuenta con servicio eléctrico.

En diciembre de 1997, la capacidad instalada para la generación de electricidad en México, ascendió a 34,815 megawatts (MW), de los cuales 57.8% correspondieron a centrales térmicas convencionales; 28.8% a hidroeléctricas; lo que corresponde a alrededor de 10,000 MW instalados, 7.5% a carboeléctricas; 3.8% a la central nucleoeléctrica; 2.1 % a geotérmicas y una parte no significativa a la energía eólica.

Respecto a otros países, tal vez China sea un líder en sistemas mini-hidroeléctricos, donde existen 60,200 turbinas dando un total de 12,600 MW de potencia instalada y

produciendo 36 TWh anualmente siendo una tercera parte del total de energía generada por este medio en ese país.

### **1.3Objetivo**

El objetivo del presente trabajo es dar las bases teóricas bien fundamentadas sobre el diseño, funcionamiento y características de una micro-turbina para desarrollar una central mini-hidroeléctrica y así proponer un proyecto, para aprovechar el potencial hidráulico existente en Michoacán y en nuestro país.

### **1.4Justificación**

En la actualidad, los hidrocarburos son una de las grandes bases energéticas de nuestra sociedad. Pero son energías no renovables; es decir, una vez que se terminen, no podrán ser repuestas. Por lo tanto, científicos de todo el mundo se han dedicado a investigar la utilización de otros recursos energéticos para seguir "moviendo al mundo". Uno de estos recursos es la energía mini-hidráulica.

Otro motivo que me llevo a elegir este tema es que debido a la diversidad de grupos étnicos y de zonas rurales aisladas en nuestro país y en nuestro estado, además del potencial hídrico con el que contamos en Michoacán se han buscado darle un mayor impulso a fuentes de energía renovables dependientes de un salto de agua para abastecer de energía eléctrica a la población ya mencionada. Sería muy costoso y muy difícil para las empresas suministradoras de energía llegar a dichas zonas con líneas tradicionales de transmisión y distribución, esto debido a las grandes distancias y a la rugosidad del terreno. Por tal causa en este trabajo se busca desarrollar el modelado de un nuevo tipo de micro-turbina para implementar una central mini-hidroeléctrica y aprovechar con esto la diversidad de arroyos y pequeños ríos existentes en todo el estado ya que de acuerdo con estudios realizados se aprovecha menos del 50% del potencial hidráulico en Michoacán.

## **1.5 Metodología**

La metodología que se utilizará para llevar a cabo esta investigación será la de recabar toda la información necesaria sobre el tema en libros, folletos, en el internet para comprender el funcionamiento de una central hidroeléctrica basada en una micro-turbina.

A partir de esta información dar el diagrama de una central mini-hidroeléctrica y finalmente proponer una central de este tipo para una localidad en Michoacán.

## **1.6 Descripción de la Tesis.**

En el capítulo 1 se desarrolla una breve introducción a lo que es la energía hidráulica y a las centrales mini-hidráulicas, donde se instauraron las primeras plantas de generación, así como los antecedentes históricos de cómo se fueron desarrollando dichas plantas.

Los antecedentes de ésta tesis se presentan en el capítulo 2 en el cual se dan los elementos de las plantas mini-hidráulicas en el mundo y en México, los países con mayor capacidad instalada en este tipo de plantas, así como las posibilidades reales que existen en nuestro país. De igual manera se aborda las ventajas y desventajas para la instalación de las micro-turbinas y se describen los elementos que componen a una central mini-hidráulica.

En el capítulo 3 se describen todos los componentes de la micro-turbina, se hace una descripción del proceso de su fabricación y se modela dicha turbina para que se pueda obtener su máxima eficiencia.

Un proyecto de generación se propone en el capítulo 4 basado en una micro-turbina, y se realiza una análisis de éste para que produzca el mínimo daño ambiental y sea lo mas eficiente posible para que sea costeable su instalación.

Por ultimo en el capítulo 5 en base a lo investigado y a lo experimentado se redactan las conclusiones del trabajo realizado y se dan algunas recomendaciones al lector para trabajos futuros.

# Capítulo 2

## Antecedentes

### 2.1 La energía hidráulica

La energía hidráulica tiene como fuente la energía potencial del agua que está a cierta altura. Esta se transforma en energía mecánica al pasar por una turbina y posteriormente en energía eléctrica por medio de un generador eléctrico.

La energía hidráulica se ha usado durante años para la obtención tanto de energía mecánica, como para uso directo en energía eléctrica. Las ventajas que presenta este tipo de aprovechamiento energético son, su bajo costo de generación, bajo costo de mantenimiento, no requiere abastecimiento de combustibles, no presenta problemas de contaminación, puede compatibilizarse con el uso del agua para otros fines, y una larga vida útil. Tiene limitaciones en cuanto a la disponibilidad de los recursos hidráulicos, dependencia de factores meteorológicos y estacionales, además se requiere de una importante inversión, considerando las obras civiles e instalaciones de la micro-central. Todos estos factores al ser analizados para un proyecto en particular, determinan la factibilidad técnica y económica de la instalación de una micro-central hidroeléctrica.

### 2.2 Evolución histórica de la mini-hidráulica

En los inicios del siglo XX se comenzó la producción de energía hidráulica basándose en pequeñas instalaciones, las cuales se conocen como mini-hidráulicas, el posterior desarrollo económico industrial llevó a nuevas instalaciones de mayor tamaño y potencia energética, media y gran hidráulica, esto supuso la aparición de problemas ambientales y sociales que frecuentemente han sido de magnitud significativa.

El origen de las pequeñas centrales hidroeléctricas tiene su fundamento en los antiguos molinos y ferrerías que eran formas ancestrales de aprovechamiento de la energía hidráulica.

A finales del siglo XIX aparecen las primeras "casas de la luz" que no eran más que la transformación de la energía mecánica de un molino tradicional en energía eléctrica mediante una dinamo.

Estas "casas de la luz" se situaban en la proximidad de los núcleos rurales de población, hasta que la aparición de la corriente alterna pudo permitir el transporte de energía eléctrica a grandes distancias y, por lo tanto, la realización de aprovechamientos hidroeléctricos de gran envergadura.

La construcción de grandes presas, así como la creación de centrales térmicas en el entorno de las explotaciones extractivas de mineral, provocaron la no competitividad de las pequeñas centrales, ya que, los costes de producción eran muy altos, comparados con otros complejos generadores de energía. Esto provocó el cierre de más de mil minicentrales entre las décadas de los años sesenta y setenta.

A principios de los años ochenta, como consecuencia de las crisis del petróleo y la búsqueda de fuentes de energía alternativas, que paliaran los efectos negativos de la subida de los precios del crudo, se volvió a considerar la puesta en explotación de antiguas minicentrales. En efecto, al abrigo de la X Conferencia Mundial de la Energía, celebrada en Estambul y la aparición de la Ley 82/80 de 30 de diciembre, sobre Conservación de la Energía y el Real Decreto 1.217/1.991 de 10 de abril, para el fomento de la producción hidroeléctrica de pequeñas centrales, se impulsó la restauración o creación de este tipo de instalaciones, con un límite de potencia de 5,000 Kw., dándose licencia a una primera partida de un centenar de minicentrales.

La necesidad de promocionar el uso de las llamadas energías renovables, así como de cubrir la demanda de los picos u "horas punta" en la curva de demanda energética diaria, provoca la aparición del I Plan de Energías Renovables en México (PER - 86) que estimuló sensiblemente la rehabilitación de minicentrales, hasta llegar a la puesta en producción de 105 de ellas en los dos años siguientes y activar enormemente la solicitud de concesiones de nuevos aprovechamientos.

En el año 1989 aparece el II Plan de Energías Renovables, con una vigencia de siete años que adecuaba la rehabilitación de minicentrales a un marco económico y temporal más

favorable para sus promotores. Consecuencia de ello se pusieron en marcha un total de 82 nuevas explotaciones en los años 89 y 90.

En la actualidad se hace distinción en esta energía en función de su tamaño y potencia Media y gran hidráulica, por encima de 10 MW. Su impacto ambiental y social puede ser alto. En general los grupos ecologistas no la consideran renovable.

La central Mini-hidráulica es aquella que genera una potencia menor de 10 MW. Su impacto ambiental se considera moderado. Se la suele considerar renovable en todos los ámbitos. Puede conectarse a las redes eléctricas existentes o utilizarse en aplicaciones aisladas de la red.

### **2.3 Mini-hidráulica en el mundo**

La hidroenergía es quizás la forma más antigua de aprovechamiento de energía para el desarrollo de las actividades productivas de la humanidad. Las ruedas hidráulicas se utilizaron desde el tiempo de los antiguos romanos para actividades como la molienda de granos, los aserraderos o simplemente como fuerza mecánica.

A principio del siglo XX proliferaron en Europa, las centrales hidroeléctricas *pequeñas* con capacidades instaladas de varias decenas o centenas de kilowatts. Después de la segunda guerra mundial se dio un gran auge al desarrollo de la hidroelectricidad de gran capacidad, con centrales en el orden de los cientos de megawatts. La construcción de minicentrales se siguió dando principalmente en varios países de Europa y en algunos de Asia.

A la fecha, existen en todo el mundo cerca de 35,500 MW de potencia global instalada en pequeñas centrales. Para el siglo XXI se espera contar con alrededor de 38,700 MW. De estos totales, China cuenta con la mayor capacidad instalada del mundo con alrededor de 14,300 MW, lo cual representa aproximadamente 43% del total, para la capacidad actual y la que se encuentra en construcción y planeada. A éste le siguen Japón y Estados Unidos con 3,381 y 3,019 MW instalados respectivamente. De los países latinoamericanos Brasil se encuentra a la cabeza con alrededor de 950 MW, lo cual lo coloca en octavo lugar mundial en aprovechamiento de pequeños saltos hidráulicos, como se muestra en la figura 2.1.

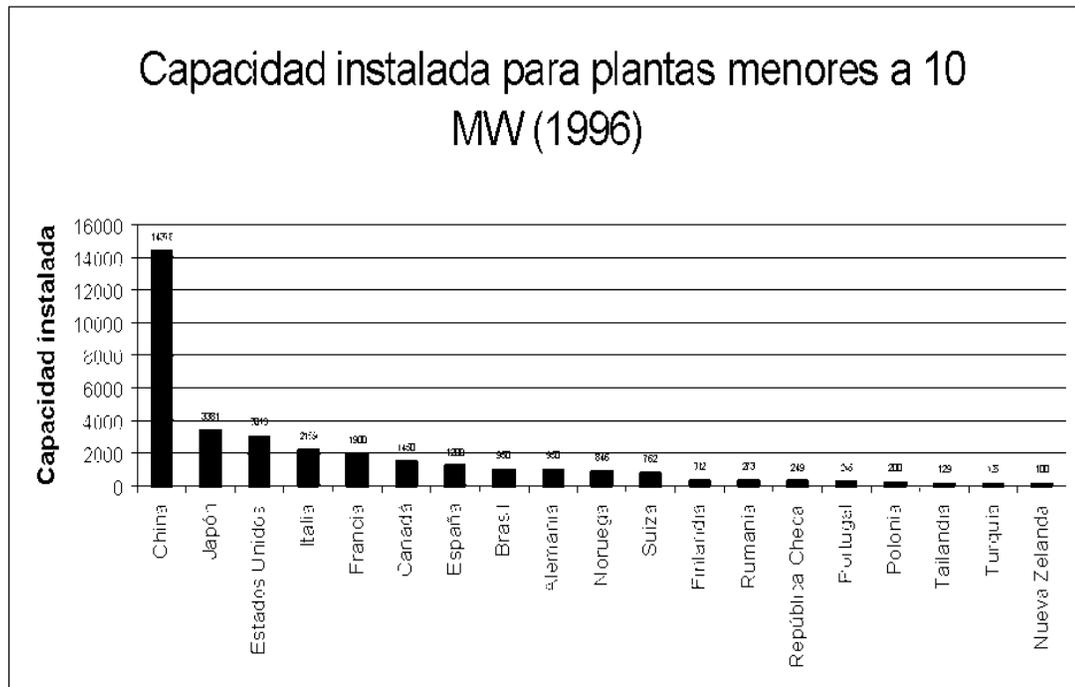


Figura 2.1 Países con plantas hidroeléctricas con capacidades menores de 10MW.

## 2.4 Mini-hidráulica en México

En 1999, la energía hidráulica aportaba 14.4 % de la generación de electricidad en nuestro país. El potencial nacional mini-hidráulico, es decir, de pequeñas centrales hidroeléctricas de menos de 5 MW es de acuerdo con estudios realizados por la CONAE y la CFE, de alrededor 3,000 MW. Tan sólo para una importante región montañosa de México, comprendida entre los estados de Veracruz y Puebla, se han identificando 100 sitios de aprovechamiento que alcanzarían una generación de 3,570 GWh anuales, equivalentes a una capacidad media de 400 MW. Es importante señalar que las condiciones del entorno a esta tecnología han cambiado, permitiendo que su aplicación sea una alternativa viable en muchos casos. Los cambios en la Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica y su Reglamento así como el incremento en los costos de los energéticos convencionales y la demanda creciente de energía eléctrica así lo indican.

Actualmente, en México existen minicentrales en operación en la CFE, Luz y Fuerza del Centro, LFC, y en los sistemas independientes de particulares.

Tabla 2.1 Resumen de las centrales en operación en México

<b>Institución o empresa</b>	<b>Número de centrales</b>	<b>Número de unidades</b>	<b>Potencia instalada(MW)</b>	<b>(%)</b>	<b>Generación Media (GWh)</b>	<b>(%)</b>
<b>CFE</b>	13	30	21.7	28.4	70.3	32
<b>L y FC</b>	9	14	11	14.4	32	14.4
<b>Independientes</b>	61	77	43.5	57	118	53.5
<b>Total</b>	83	121	76.3	100	220.2	100

Las cifras que se dan en la tabla 2.1 indican que en México la producción mini-hidroeléctrica es mayoritariamente privada y que lo ha sido desde principio de siglo. Este es un factor en favor de la futura constitución de nuevas empresas particulares que decidan dedicarse al autoabastecimiento de energía eléctrica por este medio.

De las minicentrales fuera de servicio, sólo se conocen con certeza los datos de la CFE. Se sabe de 36 centrales que han dejado de operar debido, principalmente, a sus altos costos operativos y la obsolescencia de su equipo principal. Su potencia conjunta asciende a 36.78 MW, con una generación estimada en 125.65 GWh.

En resumen, hasta 1994, las posibilidades en el país de aumentar la participación de la energía mini-hidráulica en la producción de electricidad eran de 158 MW, lo cual se muestra en la tabla 2.2.

Tabla 2.2 Resumen de posibilidades de la energía Mini-hidráulica en México.

<b>Concepto</b>	<b>Potencia (MW)</b>	<b>Generación media Anual (GWh)</b>	<b>Comentario</b>
Centrales fuera de Servicio	36.78	125.65	Capacidad instalada
Proyectos de rehabilitación (con estudio)	8.50	37.67	Incremento de potencia y generación
Proyectos de rehabilitación (por estudiar)	21.40	63.00	Capacidad instalada
Proyectos para equipamiento CNA	91.60	323.20	Capacidad instalada
<b>Totales</b>	<b>158.28</b>	<b>549.52</b>	

Finalmente, se tienen 12 permisos de la CRE para instalar 184 MW en plantas mini-hidráulicas.

## 2.5 Micro-turbinas Hidráulicas

En la Provincia de Misiones en Argentina, se ha utilizado la energía hidráulica desde la llegada de los inmigrantes europeos en la primera mitad del siglo XX. Estos utilizaban martillos hidráulicos para moler yerba mate y maíz, bombas de ariete para instalaciones de agua corriente y riego y ruedas hidráulicas para mover aserraderos y molinos de piedra, con el fin de producir harina de maíz.

Dichos antecedentes demuestran la capacidad de los cauces de agua que existen en la zona para su aprovechamiento, ya sea para la generación de energía mecánica o de energía eléctrica. ¿Cómo se logra esto? Mediante la implementación de las denominadas micro-turbinas.

La más antigua de las turbinas hidráulicas es la llamada rueda hidráulica, esta rueda gira lentamente, pero utilizando un multiplicador se consiguen las revoluciones necesarias para hacer funcionar un alternador. La rueda hidráulica está formada en su periferia por una serie de cangilones inclinados en el sentido contrario al de giro y enfrentados en su boca a la corriente de agua; las ruedas pueden ser de alimentación superior o de alimentación inferior. Con esta turbina simple y clásica pueden conseguirse potencias eléctricas del orden de 10 Kw con un caudal de  $0.5\text{m}^3/\text{s}$  y un diámetro de la rueda de 5 metros, si es de alimentación superior. En la figura 2.6 se muestran los diferentes tipos de ruedas hidráulicas.

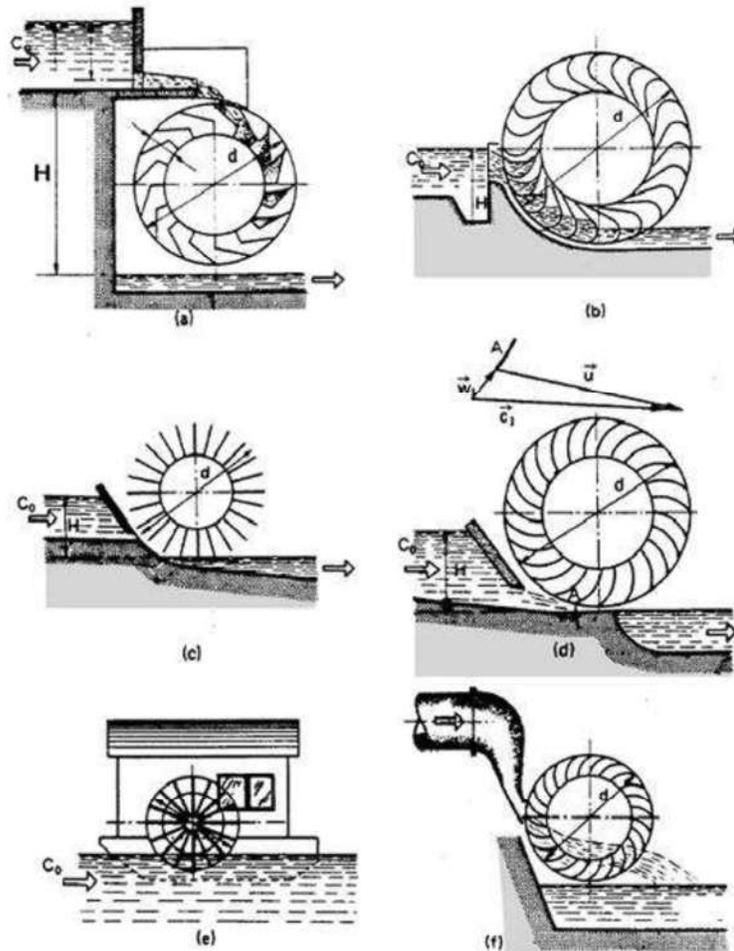


Figura 2.2 a) Alimentación superior (rueda gravitatoria pura) b) alimentación lateral; c) de paletas planas; d) de impulsión inferior; e) paletas de alimentación inferior; f) turbina Banki.

La energía hidráulica es una energía renovable, prácticamente gratuita y limpia. En la producción de electricidad sustituye a los combustibles de origen fósil y nuclear con todos los problemas de eliminación de desechos que traen consigo. No hay forma más limpia de producir energía eléctrica que la basada en la energía hidráulica, ya que el agua como “combustible” no se consume, sólo es explotada a su paso y no empeora su calidad ni se producen emisiones contaminantes.

En muchos países la hidrogenación ha sido empleada para disminuir la declinación rural y desarrollar regiones aisladas. En general cuando se habla de instalaciones hidroeléctricas se piensa en grandes emprendimientos, es decir, grandes

presas y reservorios, grandes extensiones de agua embalsada; y por supuesto ha habido muchos de tales proyectos en todo el mundo. Pero son otros en una escala más pequeña los que nos ocupan en este trabajo. Muchos de estos pequeños proyectos son del tipo “de pasada”, esto es, son diseñados para usar el caudal del río ó arroyo tanto como sea posible mediante una desviación del total ó parcial del caudal hacia un canal para dirigirse luego hacia la turbina por medio de una tubería. En el esquema de la figura 2.3 se muestra una instalación prototipo de este tipo de turbina.

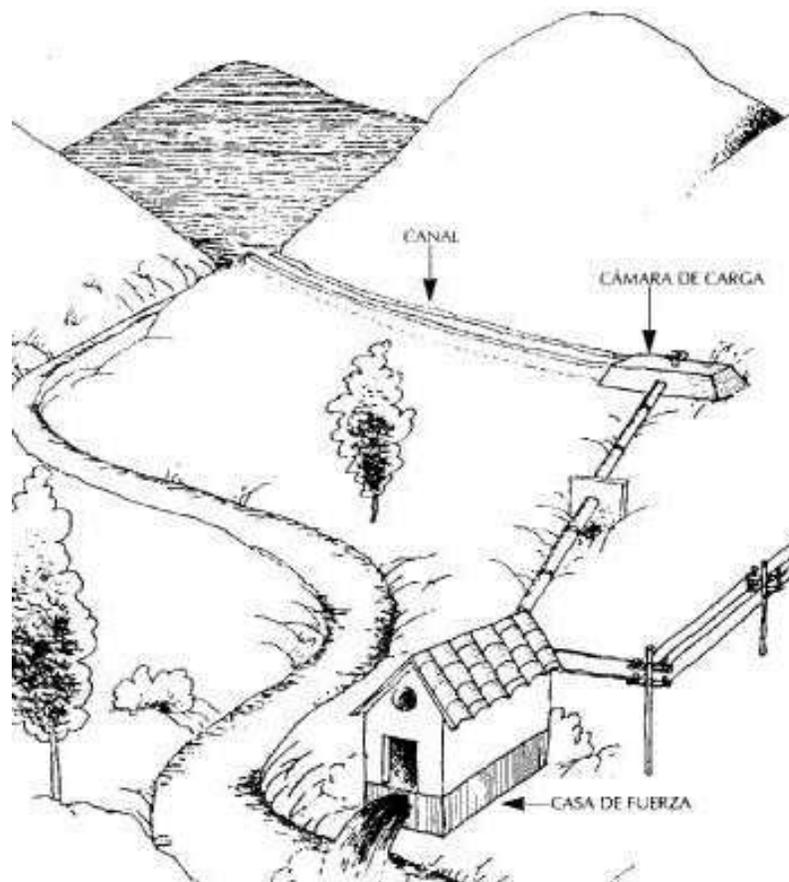


Figura 2.3 Esquema general de una MiniHidroeléctrica.

A través de este documento se busca brindar al pequeño productor conocimientos básicos que le permitan:

- Medir las características del curso de agua disponible, para así determinar la conveniencia de instalar una micro-turbina.
- Conocer los sistemas y elementos comúnmente utilizados.

- Construir en un taller básico de herrería, una micro-turbina adecuada a las condiciones disponibles.

Se debe fomentar el uso de energías renovables como opciones energéticas para las zonas rurales aisladas, y poner particular énfasis en la promoción de la hidroenergía a pequeña escala (micro y mini) como una opción apropiada para facilitar el acceso de un amplio sector de la población rural a la electricidad.

Diversas áreas rurales marginales presentan inconvenientes en el suministro de energía eléctrica por medio de líneas convencionales de transmisión y distribución, este hecho se debe a que las mismas poseen un alto costo, agravado por el hecho de poseer una baja densidad de utilización (son zonas de baja densidad de carga). Todo ello conduce a la privación a los habitantes de dichas zonas, de los beneficios que provee la electricidad: iluminación, refrigeración, radio, televisión, comunicaciones, computadoras, generación de fuentes de trabajo, etc.

La producción de energía eléctrica en las zonas rurales marginales puede realizarse, precisamente, aprovechando la energía disponible en un salto hidráulico. Para ello se utiliza una máquina llamada turbina hidráulica, cuya función es convertir la energía del salto hidráulico en trabajo mecánico, y un generador eléctrico, cuya función es convertir dicha energía mecánica en energía eléctrica. La turbina hidráulica producirá más energía mecánica mientras mayor sea el producto entre la altura del salto hidráulico y el caudal disponible. Las turbinas de reducida potencia, utilizadas en zonas de bajo consumo eléctrico, se denominan micromáquinas o microturbinas hidráulicas.

Unos de los principales inconvenientes encontrados en la producción de dichas micromáquinas hidráulicas es su elevado costo de producción. Esto se debe que para lograr un alto rendimiento en la conversión de la energía hidráulica y un buen aprovechamiento del salto hidráulico, debe utilizarse una máquina de la potencia adecuada al salto disponible, además esta máquina debe ser de determinado tipo constructivo, de acuerdo a la combinación altura / caudal disponible en el sitio de emplazamiento. Esto hace que la estandarización sea compleja, y la fabricación de máquinas especiales para cada tipo de emplazamiento conduzca a costos elevados.

La zona de influencia de la Universidad Nacional de Río Cuarto (UNRC en Argentina), que incluye la zona serrana del sur de la Provincia de Córdoba, está caracterizada por grandes extensiones de territorios rurales que poseen baja densidad poblacional y de consumo eléctrico, lo que hace que muchos habitantes de estas zonas se encuentren económicamente excluidos de contar con redes de suministro eléctrico provenientes del Sistema Interconectado Nacional.

En algunos casos la generación de energía eléctrica, en estas áreas, se suple con grupos electrógenos a combustibles fósiles o generadores eólicos, siendo estos últimos dependientes del viento de la zona y de sus variaciones estacionales, los grupos electrógenos utilizan un recurso oneroso, no renovable y altamente contaminante.

Particularmente la zona de las sierras del Sur de Córdoba Argentina está surcada por gran cantidad de pequeños ríos y arroyos, que presentan un potencial hidráulico muy interesante desde el punto de vista de la microgeneración de energía eléctrica, aún escasamente explotado. Llevando este análisis a un nivel nacional e internacional podemos apreciar que esta situación se repite para países en vías de desarrollo que presentan grandes extensiones de territorio escasamente poblado.

El desarrollo de micromáquinas hidráulicas destinadas a la generación de energía eléctrica posibilita el suministro de energía eléctrica a un grupo de viviendas o a un pequeño emprendimiento productivo, teniendo en cuenta las características típicas de la zona, y sus disponibilidades hidráulicas, costos y necesidades energéticas.

En el Laboratorio de Máquinas Térmicas e Hidráulicas (LMTH) dependiente de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Río Cuarto en Argentina se está trabajando para sistematizar una metodología de cálculo, diseño, fabricación y ensayos de micro turbinas hidráulicas destinadas a generación de energía eléctrica o bombeo de agua para consumidores aislados. En esto se utilizan nuevas tecnologías de fabricación, disponibles industrialmente y otras desarrolladas por miembros del grupo de trabajo, todo ello conducente a obtener una disminución de costos de producción de micro-máquinas hidráulicas. Estas micro-turbinas son aplicables a pequeñas instalaciones que presenten distintas combinaciones de altura – caudal en su salto hidráulico, y en consecuencia, satisfacer los requerimientos energéticos de zonas rurales marginales.

Los dispositivos se diseñan con el fin de hacer sus costos accesibles, tanto de adquisición como de explotación, asegurando además que posean un adecuado rendimiento en la conversión de energía para disminuir los tiempos de amortización de equipos y el costo del KW-h producido.

Para el diseño de los distintos tipos de microturbinas hidráulicas, de potencias menores de 10 Kw en el eje; se estudia la factibilidad de utilización de nuevas tecnologías de fabricación de piezas de polímeros termoplásticos, para la elaboración de partes componentes de dichas micro-turbinas.

Esto incluye:

- Cálculo y diseño del rodete y corona de alabes fijos o inyector, árbol, rodamientos y sellos de cada microturbina.
- Diseño y construcción de la voluta o carcasa.
- Puesta a punto del procedimiento de fabricación de las microturbinas.
- Simulación asistida por ordenador del funcionamiento de la microturbina, para predecir determinados comportamientos en servicio.
- Ensayos en banco: para la realización de los ensayos de laboratorio a fin de validar el equipo producido.
- Análisis de los resultados de los distintos ensayos.
- Acciones correctivas sobre el diseño y su evaluación.

Con el desarrollo de una que es una nueva tecnología de soldadura de materiales termoplásticos, así como del curado de adhesivos utilizados para la unión de diversos tipos de polímeros. Dichas tecnologías se basan en la utilización de polímeros conductores de la electricidad, y a la acción de energía de microondas para promover la unión por soldadura de dichos materiales, en tiempos muy reducidos, y con un bajo costo operativo, operando a distancia.

Dichas técnicas forman parte de líneas de trabajo de proyectos y programas de investigación, oportunamente presentados en SECYT Universidad Nacional de Río Cuarto y Foncyt, habiendo tenido como resultado la publicación de una tesis de maestría, así como la presentación de artículos en diversos congresos y reuniones científicas.

La Empresa Riocuartense GIACOBONE División ENERGIA, dedicada a la fabricación y comercialización de generadores eólicos y sus partes componentes, mantiene constante interacción con el LMTH (Laboratorio de Maquinas Térmicas e Hidráulicas) en lo que hace a micro emprendimientos hidroeléctricos. Por medio de un convenio de transferencia tecnológica, fruto del cual dicha empresa realizó la construcción de distintos tipos de micro-turbinas, según lo que podemos observar en la figura 2.4. Dichas micro-máquinas se encuentran actualmente en operación, y han resultado en un alto impacto social en las zonas donde han sido instaladas.



a).-



b).-

Figura 2.4 a) Micro-turbina tipo hélice de 1 KW de potencia eléctrica que opera con 3 m de altura y un caudal de 50 litros /segundo; b) Micro-turbina tipo Francis de 1,5 KW de potencia eléctrica que opera con 17 m de altura y un caudal de 15 litros /segundo.

En el LMTH, se realizó el diseño, cálculo y selección de equipos, elementos de medición y accesorios del banco hidráulico de ensayos para la microturbina Hidráulica de 1 KW construída previamente. Dicho banco de ensayos está actualmente en condiciones operativas de funcionamiento, con el que se han obtenido interesantes conclusiones y básicamente está constituido por los elementos esquematizados en la figura 2.5.

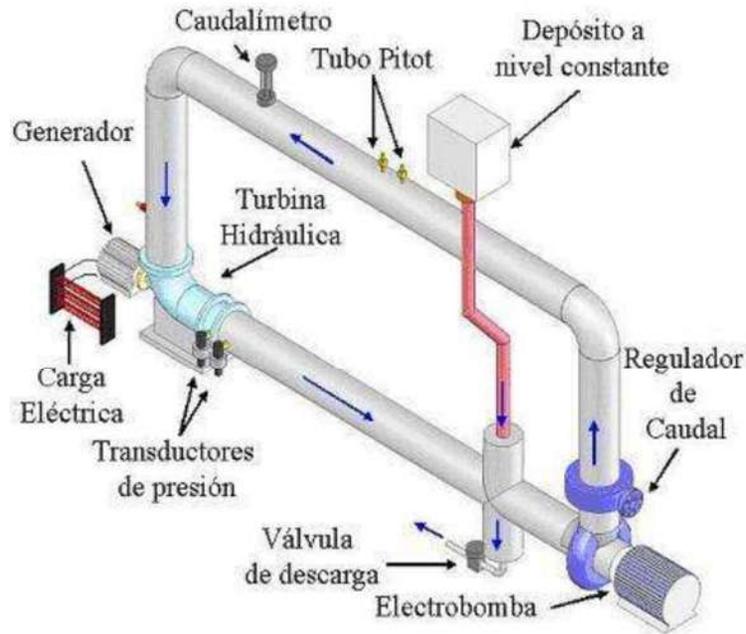


Figura 2.5 Elementos que componen a una micro-turbina.

Podemos decir que con el trabajo mancomunado Universidad – Empresa, se puede desarrollar un producto adecuado desde el punto de vista técnico y económico, de gran importancia regional, empleando tecnología de desarrollo local y nacional, minimizando la utilización de materias primas de importación, brindando a los pobladores de zonas excluidas del sistema de distribución eléctrica la posibilidad de contar con tal suministro de manera autónoma.

Esta tecnología se ha utilizado en Chile exitosamente, existiendo 192 micro-centrales hidroeléctricas operando con una capacidad instalada de 33 MW. Entre las últimas construidas están las de Pallaco (10 kW), en la VIII Región, y 3 en localidades precordilleranas de la II Región (80 kW en Socaire, 50 kW en Río Grande y 12 kW en Talabre).

Actualmente, existe una cartera de 30 micro-centrales en todo Chile, principalmente en el sector cordillerano de la X Región. En este sentido, se está haciendo la ingeniería de detalle para tres de ellas en Cochamó, en localidades fronterizas y aisladas, como Valle del Frío, Segundo Corral y Paso El León. En igual estado, se encuentra la minicentral para la localidad de Llanada Grande, que abastecerá a cerca de 100 hogares y establecimientos públicos.

Actualmente, se está terminando un catastro en las X y XI Regiones, donde se han identificado alrededor de 150 viviendas aisladas y dispersas que pueden ser abastecidas mediante micro-centrales hidroeléctricas.

El número de hogares en Chile que se abastecen de energía eléctrica mediante sistemas de autogeneración o pequeños sistemas eléctricos son del orden de 20.000, y si solamente se suman aquellos que se encuentran en cartera actualmente, se podría estimar que mediante estas tecnologías se abastecería en un futuro cercano a una población aproximada de 30.000 familias. La condición de aislamiento es tal, en la mayoría de estos poblados, o alta dispersión de las viviendas, que no hace factible económicamente su conexión a los sistemas interconectados del país.

## **2.6 Centrales Mini-hidráulicas**

En función del tipo de ubicación y la forma de las tomas e instalaciones añejas, se pueden clasificar las micro-centrales de la siguiente manera:

### **1. Central de canal hidráulico:**

Este tipo de central se implanta al abrigo de infraestructuras ya existentes de canales de trasvase de agua de abastecimiento o de regadío, aprovechando las diferencias de cota entre los distintos tramos del canal.

Las instalaciones necesarias para realizar este tipo de centrales son:

- Toma de agua en el canal
- Tubería forzada
- Edificio de la central con equipo
- Canal de retorno

### **2. Central de pie de presa:**

Se implanta este tipo de central en la base del paramento de una presa ya existente cuyos fines sean distintos al de producción hidroeléctrica.

Su construcción dependerá de la regulación de dicho embalse, la cota hidrostática, la capacidad del embalse y la adecuación a la obra civil ya construida.

Las instalaciones a realizar serán por tanto:

- Adecuación de obra civil
- Toma de agua
- Tubería forzada
- Edificio
- Canal de desagüe

### 3. **Central derivada o fluyente:**

Se implanta aprovechando la diferencia de cota en un cauce fluvial. Para ello se deriva una parte del caudal de dicho río para, ganando altura antes de llegar a la central, ser turbinado y devuelto al río. Este es el tipo de minicentrales de más frecuente construcción.

Son instalaciones básicas las siguientes:

- Azud de retención
- Toma y canal de derivación
- Cámara de carga
- Tubería forzada
- Edificio y equipamiento
- Canal de desagüe

## 2.7 Tipos de centrales mini-hidráulicas

Existe una gran variedad de instalaciones diferentes para realizar esta transformación energética. Una primera clasificación según el tipo de central es:

- **Centrales de agua fluyente**
- **Centrales de pie de presa**
- **Centrales de canal de riego o abastecimiento**

Existen fundamentalmente dos tipos de centrales hidroeléctricas:

- **Centrales de agua fluyente**

Son aquellos aprovechamientos que mediante una obra de toma, captan una parte del caudal circulante por el río y lo conducen hacia la central para ser turbinado. Después, este caudal es devuelto al cauce del río. Estas centrales se caracterizan por tener un salto

útil prácticamente constante, y un caudal turbinado muy variable, dependiendo de la hidrología. Por tanto, en este tipo de aprovechamiento, la potencia instalada está directamente relacionada con el caudal que pasa por el río.

- **Centrales de pie de presa o de regulación propia**

Son aquellas situadas aguas abajo de los embalses destinados a usos hidroeléctricos o a otros fines como abastecimiento de agua a poblaciones o riegos, susceptibles de producir energía eléctrica, ya que no consumen volumen de agua. Tienen la ventaja de almacenar la energía (el agua) y poder emplearla en los momentos en que más se necesiten. Normalmente son las que regulan la capacidad del sistema eléctrico y con las que se logra de mejor forma el balance consumo/producción.

- **Centrales de canal de riego o abastecimiento**

Las canalizaciones de conducción de agua para riego o para consumo humano pueden aprovecharse para colocar en paralelo una tubería forzada y turbinar el agua devolviéndola de nuevo al canal en un tramo de menor cota o a otro cauce fluvial, utilizándose, en este último caso, sólo los excedentes de consumo.

Dados los problemas medioambientales que produce la construcción de nuevos embalses, parece que no deben construirse con el fin exclusivo de su aprovechamiento energético, aunque existentes estos, o necesarios para otros fines, por que no aprovechar su potencial hidroeléctrico renovable. La potencia máxima para ser consideradas minicentrales eléctricas no suele superar los 10 MW, aunque esto puede diferir según los países y los avatares políticos.

En las centrales de agua fluyente el esquema básico de las mismas suele contar con todos o algunos de los siguientes elementos: un azud o **presa de derivación**, que desvía parte del caudal a través de un canal o tubería hacia una **cámara de carga**; desde ésta parte una **tubería forzada** que conduce el agua hasta la **turbina**. Ésta se encuentra en el edificio de la central junto con el **generador eléctrico y los elementos auxiliares**. Por último, un **canal de descarga** devuelve el agua al cauce del río. En la figura 2.6 se muestran estos elementos además de otros componentes que conforman a una central mini-hidráulica.

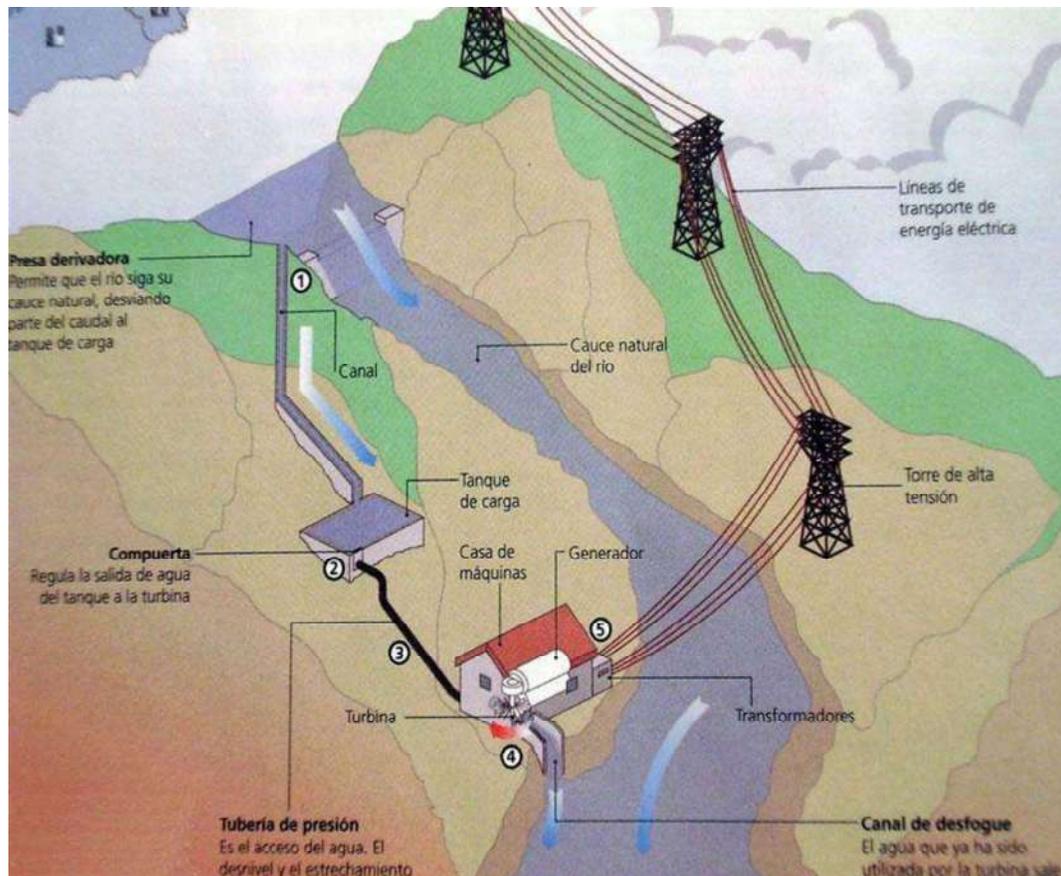


Figura 2.6 Componentes de una central Mini-hidráulica.

La potencia de una central hidroeléctrica depende del caudal que pueda turbinar y del salto, es decir, de la diferencia de cotas del agua a la entrada y la salida de la central. En función de dichos parámetros (salto y caudal) se elegirá el tipo de turbina más adecuada. Para conocer correctamente las características de determinado aprovechamiento, es necesario disponer de datos de al menos veinte años hidrológicos.

Hay tres tipos principales de turbinas, las Pelton, las Kaplan y las Francis, siendo las del tipo Pelton las más populares debido a su versatilidad para operar en amplios rangos de caudales y presiones.

Los sistemas hidroeléctricos relativamente pequeños pueden abastecer a pueblos enteros. Por ejemplo, una central de 500 kW puede abastecer de electricidad a 800 personas. La fuente de energía puede ser un arroyo, un canal u otra forma de corriente que pueda suministrar la cantidad y la presión de agua necesarias, a través de la tubería de alimentación, para establecer la operación del sistema hidroeléctrico.

## 2.8 Turbina

La turbina es el equipo en el cual se transforma la energía hidráulica en mecánica, está acoplada directamente con el generador y en conjunto atienden la demanda de energía eléctrica.

Según la forma como la turbina transforma la energía la energía cinética en mecánica, pueden agruparse de la siguiente forma:

- *Turbina de reacción*: el agua entra a presión y en los conductos móviles del rodete cambia de dirección y aceleración. En ella, la presión estática disminuye entre la entrada y la salida del rodete.
- *Turbina de acción*: el agua entra sin presión (a presión atmosférica) y cambia solamente de dirección más no de aceleración. En ella, la presión estática permanece constante entre la entrada y la salida del rodete.

En función del sentido en que se mueve el agua dentro de las turbinas, estas se clasifican en:

- *Axiales*: cuando el agua va paralela al eje.
- *Radiales*: si tienen su movimiento en la dirección del radio.
- *Centrífuga*: cuando el agua va de adentro hacia fuera.
- *Centrípeta*: cuando el agua va de afuera hacia adentro.
- *Mixtas*: cuando el agua entra radialmente y sale axialmente.

Por el modo de admisión se clasifican en:

- *Admisión total*: cuando el agua entra por todo el contorno del rodete.
- *Admisión parcial*: cuando el agua entra por parte del rodete.
- *Admisión interior*: cuando el agua se admite por el contorno interior del rodete (turbinas centrífugas).
- *Admisión exterior*: cuando el distribuidor está colocado en el contorno exterior del rodete (turbina centrípeta)

Por la posición del eje de las turbinas se clasifican en:

- *De eje horizontal*
- *De eje vertical*

Por la disposición de la cámara, se clasifican en:

- *De cámara abierta*
- *De cámara cerrada*

Además, según la cámara también se subdividen en:

- *De cámara cilíndrica*
- *De cámara espiral*
- *De cámara cónica*
- *De cámara esférica*

Por el número de revoluciones relativas se subdividen en:

- *Normales*
- *Rápidas*
- *Extrarápidas*

Por el número de rodetes se clasifican en:

- *De un solo rodete*
- *De dobles o gemelas*

### **2.8.1 Elementos de una turbina hidráulica.**

Los elementos fundamentales de una turbina hidráulica son los siguientes:

**El distribuidor.** Es un elemento estático que no posee velocidad angular y en el no se produce el trabajo mecánico. Sus funciones son:

- Acelerar el flujo al transformar total (turbinas de acción) o parcialmente (turbinas de reacción) la energía potencial del agua en energía cinética y energía de presión.
- Dirigir el agua hacia el rodete, siguiendo una dirección adecuada.
- Actuar como un órgano regulador de caudal.

El distribuidor adopta diferentes formas: puede ser de tipo inyector en las turbinas de acción, o de forma radial, semiaxial y axial en las turbinas de reacción.

**El rodete.** Llamado también rotor de rueda, este elemento es el órgano fundamental de las turbinas hidráulicas. Consta, en esencia, de un disco provisto de un sistema de alabes, paletas, o cucharas, el cual está animado por cierta velocidad angular. La transformación de la energía hidráulica del salto en energía mecánica se produce en el rodete, mediante la

aceleración y desviación, o por la simple desviación del flujo de agua a su paso por los alabes.

**Tubo de aspiración.** Este elemento, muy común en las turbinas de reacción, se usa en ocasiones en las turbinas de acción, como las de tipo Michell-Banki, donde adopta la forma cilíndrica. Se instala a continuación del rodete y, por lo general, tiene la forma de un conducto divergente, puede ser recto o acodado, y cumple las siguientes funciones.

- Recupera la altura entre la salida del rodete y el nivel del canal de desagüe.
- Recupera una parte de la energía cinética correspondiente a la velocidad residual del agua en la salida del rodete, a partir de un diseño del tipo difusor.

**Carcaza.** Este elemento tiene la función general de cubrir y soportar las partes de la turbina. En las turbinas Francis y Kaplan, por ejemplo, tiene forma de espiral.

## 2.8.2 Clases de turbinas

Las turbinas características conocidas y utilizadas ampliamente tanto en las centrales hidráulicas como en las centrales mini-hidráulicas son:

### 2.8.2.1 Turbina Pelton

Fue inventada por Lester A. Pelton (E.U., 1829-1908) y fue patentada en 1880. Puede definirse como una turbina de acción, de flujo tangencial y de admisión parcial. Opera de forma eficiente en condiciones de grandes altos y bajos caudales y también en el caso de cargas parciales (véase figura 2.7). El proceso de flujo se realiza a presión atmosférica. Se emplea en pequeñas y en grandes centrales hidroeléctricas. Sus principales elementos son:

- **Distribuidor.** Está constituida por uno o varios inyectores que pueden llegar a seis. Un inyector consta por lo general de una tobera de sección circular provista de una aguja de regulación que se mueve axialmente, variando así la sección del flujo. En el caso de que se requiera una operación rápida para dejar al rodete sin acción del chorro, se adiciona una placa deflector. De este modo, la aguja se cierra en un tiempo mas largo, reduciendo así el golpe de ariete.

- **Rodete.** Es de admisión parcial, lo cual depende del número de chorros o de inyectores. Consta de un disco provisto de una serie de cucharas montadas en su periferia. Las cucharas pueden estar empernadas al disco, unidas por la soldadura o fundidas en una sola pieza con el disco. La turbina Pelton puede instalarse con el eje horizontal con 1 ó 2 inyectores, y con el eje vertical con 3 a 6 inyectores.

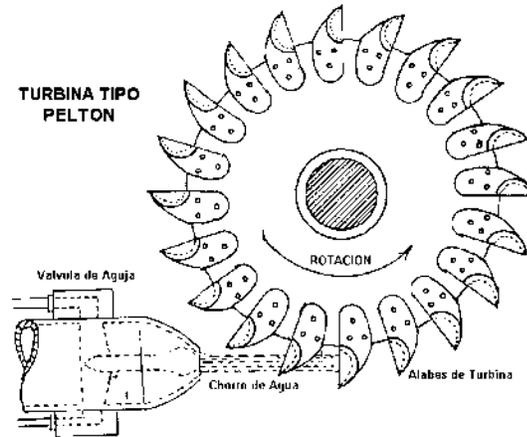


Figura 2.7 Turbina Pelton.

En la figura 2.8, vemos una rueda de una turbina hidráulica de la central de Sharavathi (India), con una caída de 440 m. Su potencia es de 104500 kW y la velocidad de giro es de 300 r.p.m. Puede compararse su tamaño con el de la persona situada junto a ella.



Figura 2.8 Rodete de una turbina Pelton

### 2.8.2.2 Turbina Turgo

Esta turbina fue inventada por Eric Crewdson (Gran Bretaña) y patentada en 1919. Posteriormente fue perfeccionada por E. Jackson (Gran Bretaña) en 1936. Puede definirse como una turbina de acción, de flujo Axial y de admisión parcial.

- **Distribuidor.** Consiste básicamente en un inyector del tipo Pelton que proyecta un chorro de agua inclinado respecto al plano del rodete, en un cierto ángulo de  $20^\circ$  a  $22.5^\circ$ .

- **Rodete.** Se asemeja a un medio rodete de la turbina Pelton, como si a este se le dividiera mediante un plano que pasa por las aristas de las cucharas y es perpendicular al eje. Es de admisión parcial y puede instalarse con eje horizontal y con eje vertical. En general, se emplea en pequeñas centrales.

En comparación con la turbina Pelton, esta ofrece la ventaja de que, a igualdad de diámetro del rodete, puede operar con mayor caudal, ya que el chorro de agua ingresa por un lado y sale por otro. En la turbina Pelton existe una limitación en el caudal debido a que, al abandonar una cuchara, el chorro puede interferir con las cucharas adyacentes. De este modo, para un mismo diámetro de chorro, así como de potencia, el rodete resulta ser más pequeño que el de una Pelton, por lo que puede rotar a mayor velocidad; esto trae consigo la posibilidad de acoplar la turbina directamente con el generador y disminuir así el costo del grupo. Estas turbinas cubren el campo de aplicación de las turbinas pelton rápidas, Michell-Banki y Francis lenta y normal. Respecto a la Pelton, posee las mismas características: operación con alta eficiencia a cargas parciales, escaso riesgo de cavitación, fácil acceso a sus partes, buena tolerancia a la erosión, pero tiene el inconveniente de su baja eficiencia y la existencia de un empuje axial debido al chorro inclinado, por lo que se le usa en pequeñas centrales. La figura 2.9 muestra una turbina Turgo con cuatro inyectores. La figura muestra claramente como los alabes del rodete de esta turbina están inclinados un determinado ángulo como ya se había mencionado anteriormente.



Figura 2.9 Turbina Turgo.

### 2.8.2.3 Turbina Michell-Banki

Esta turbina fue inventada por A. G. Michell (Australia) y patentada en 1903. Posteriormente, entre 1917 y 1919 fue estudiada por Donat Banki (Hungría), en la universidad de Budapest.

Se trata de una turbina de acción de flujo radial centrípeto-centrifugo, de flujo transversal, de doble paso y de admisión parcial. Sin embargo, recientes ensayos han indicado que existe una pequeña reacción en el primer paso, a causa de una presión ligeramente superior a la atmosférica, debido a la cercanía del inyector del rodete.

**Distribuidor.** Consiste en una tobera de sección rectangular que abarca el rodete en cierto ángulo de admisión parcial. Esta dotado de una paleta directriz para la regulación del caudal.

**Rodete.** Tiene forma de tambor o cilindro y está compuesto por una par de discos, entre los cuales se fijan periféricamente una cierta cantidad de alabes de perfil circular y de simple curvatura. Por lo común, los alabes se fijan a los discos mediante soldadura.

La forma cilíndrica del rodete permite que la turbina pueda trabajar mediante grandes rangos de variación del caudal solo con darle la longitud conveniente. La característica de la turbina Michell-Banki consiste en que un amplio chorro de agua de sección rectangular incide dos veces, cruzando el interior, sobre los alabes del rodete.

La diferencia fundamental respecto a las otras turbinas radica en que no hay deflexión axial del chorro, ya que el flujo discurre sobre planos perpendiculares al eje. La

turbina opera en general a presión atmosférica. No obstante, en el caso de saltos bajos suele dotársele de un tubo de aspiración cilíndrico para recuperar parte de la altura del montaje. Esto crea una depresión en el interior, por lo que debe impedirse que el agua inunde el rodete, por lo cual se utiliza una válvula automática regulada, de manera que permita la entrada de una cierta cantidad de aire al interior de la carcasa.

La eficiencia de la turbina Michell-Banki es buena dentro de un amplio rango de caudales, aunque no muy alta si se le compara con la turbinas Pelton y Francis. Sin embargo, debido a su bajo costo y fácil construcción local, es una alternativa interesante para las pequeñas centrales.

En la figura 2.10 se muestra una micro-turbina Michell-Banki utilizada para pequeños ríos y en saltos no mayores a 20 metros.



Figura 2.10 Micro-turbina Michell-Banki

#### 2.8.2.4 Turbina Francis

Esta turbina fue inventada en 1838 por Samuel Howd (EE. UU.); posteriormente fue perfeccionada por James B. Francis (Gran Bretaña, 1815-1892), hacia 1848 en los Estados Unidos.

La turbina puede definirse como de reacción, de flujo mixto centrípeto y de admisión total

- **Distribuidor.** Fue inventado por Fink (Alemania) en 1860. Consta de una serie de alabes de posición variable y de perfil aerodinámico, dispuestos conformando conductos convergentes del tipo tobera. De este modo, el flujo de agua se acelera y orienta hacia el

rodete bajo diferentes ángulos de inclinación y permite una regulación del caudal. Los alabes del distribuidor pueden ser operados manual o automáticamente mediante un regulador.

**-Rodete.** Consta de una serie de alabes fijos colocados entre un disco y una corona exterior; por lo general poseen doble curvatura. El agua ingresa radialmente por la periferia externa y abandona el rodete en dirección axial para dirigirse hacia el tubo de aspiración.

**- Tubo de aspiración.** Su forma básica es la de un difusor. Puede ser del tipo recto o del tipo acodado. La adopción de uno o de otro de estos tipos dependerá de la llamada altura de aspiración, cuyo valor se calcula con base a la teoría de la cavitación.

**Carcaza.** Consiste en una cámara espiral que puede ser construida por fundición o segmentos de plancha soldada. Su función es dirigir el agua hacia el distribuidor.

En turbinas pequeñas que operan con bajo salto se puede prescindir de la espiral, trabajando la turbina en la modalidad de cámara abierta o del tipo pozo. En las zonas de coincidencia, la turbina Francis presenta ventajas respecto a la turbina Pelton; tiene dimensiones más pequeñas, debido a que presenta mayores secciones de flujo y es de admisión total; además puede operar a mayor velocidad de rotación dado que es una turbina de reacción.

Sin embargo, presenta algunas desventajas como la baja eficiencia a cargas parciales, el estar sometida a un gran riesgo de cavitación y a un alto costo de reparación de los elementos desgastados por erosión.

En la figura 2.11 se muestra el esquema general donde se emplea una turbina Francis para grandes saltos. Se muestra también en la figura el distribuidor, el rodete y el tubo de aspiración ya explicados anteriormente.

En la figura 2.12 se muestra el rodete de una turbina Francis. La foto fue tomada en julio del 2008 en la central hidroeléctrica Plutarco Elías Calles en Infiernillo Michoacán durante la remodelación de dos de las 4 turbinas para ampliar su capacidad de generación.

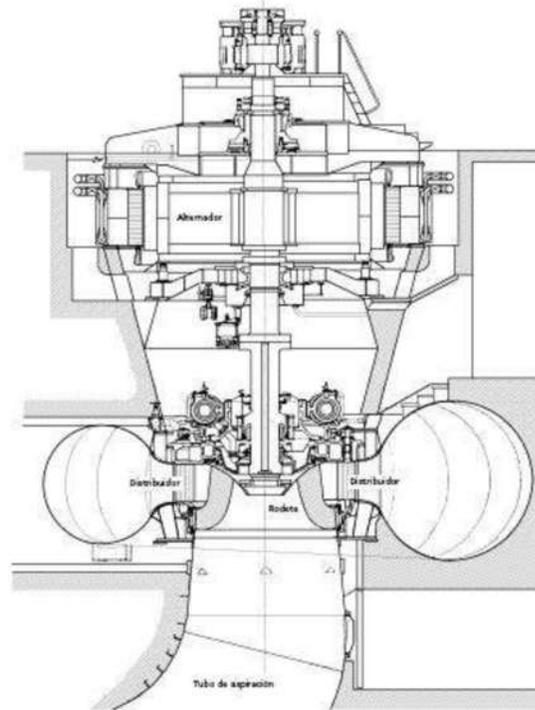


Figura 2.11 Esquema general de una turbina Francis.



Figura 2.12 Rodete de una turbina Francis.

### 2.8.2.5 Turbina Kaplan y de hélice

Esta turbina fue desarrollada por Víctor Kaplan (Austria 1876-1934) en la Universidad de Burno (Checoslovaquia) y patentada en 1912.

La turbina Kaplan puede definirse como una turbina de flujo axial, de reacción y de admisión total. La principal característica de la turbina kaplan es el rodete, el cual tiene

alabes de perfil de ala de avión orientables mediante un mecanismo situado en el interior del cubo.

El distribuidor es del tipo Fink, similar al de la turbina Francis. Consta además de una carcaza-espiral de sección circular o rectangular y de un tubo de aspiración del tipo recto o acodado, según el requerimiento de la altura de aspiración.

Debido a los alabes orientables del rotor, puede operar con muy buena eficiencia dentro de un amplio rango de caudal. La turbina de hélice es una variante de la turbina Kaplan, pues posee un rodete con alabes fijos. Con ello se abarata el rodete pero decrece la eficiencia a cargas parciales por la imposibilidad de contar con una doble regulación como en la turbina Kaplan convencional, cuyo rodete tiene alabes orientables. En la figura 2.13 se muestra el esquema general de una turbina Kaplan.

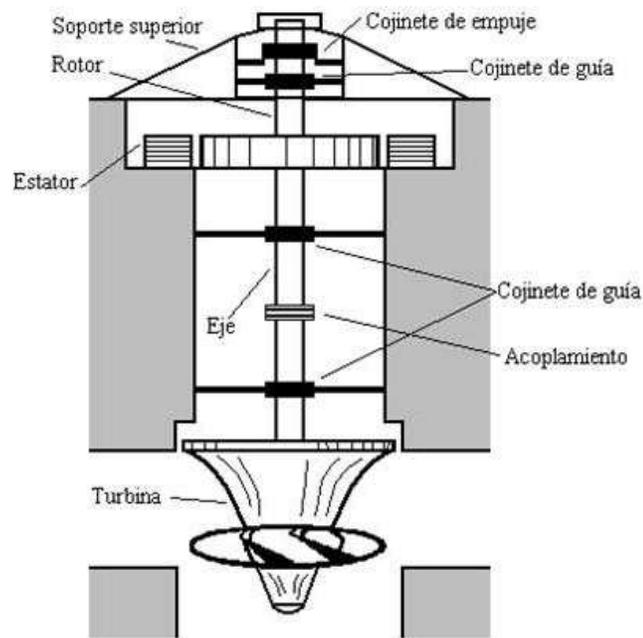


Figura 2.13 Turbina Kaplan.

En la figura 2.14 se muestra un rodete de una micro-turbina del tipo kaplan que se utiliza en centrales mini-hidráulicas para saltos de agua den entre 15 y 20 metros.



Figura 2.14 Micro-turbina Kaplan

### 2.8.2.6 Turbina axial

Esta turbina utiliza un rodete Kaplan con un distribuidor Fink adaptado al flujo axial. En lugar de la cámara-espiral posee una carcasa tronco-cónica de sección convergente en la dirección del flujo. Se presenta en tres versiones.

- **Turbina tubular.-** Esta turbina fue desarrollada por Khune, quien la patentó en 1930. Se caracteriza por que el accionamiento del generador se hace mediante una extensión del eje hasta la sala de máquinas, lo cual constituye una dificultad por el alto costo de la obra civil. Sin embargo, este diseño se utiliza con éxito en pequeñas turbinas, en donde la extensión del eje es más corta.
- **Turbina tipo bulbo.-** Esta turbina fue patentada por Hugenin en 1933, y utiliza también un rodete Kaplan. Su característica más notable radica en que el generador está ubicado dentro del cubo, con lo cual se ahorra una gran extensión del eje de la turbina tubular. El resultado es un grupo más compacto y más barato (para grandes potencias), así como un menor riesgo de vibración en el eje.

En la figura 2.15 se ve el corte de una central con turbinas de *tipo bulbo*. En este tipo de central, el alternador está en un bulbo rodeado por el agua. La extracción de dicho bulbo se hace desagotando totalmente los conductos, por medio de las compuertas.

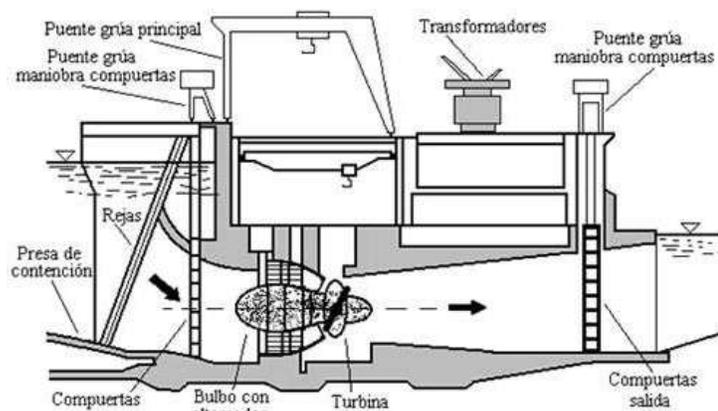


Figura 2.15 Turbina tipo bulbo.

- **Turbina de generador periférico.**- Fue patentada por Leroy Harza (EE.UU.), en 1930, aunque fue desarrollada posteriormente. Reduce de manera considerable la distancia axial del grupo, ya que el rotor del generador va instalado en la periferia del rodete, eliminándose el eje de transmisión; con ello se logra, entre otras ventajas, una notable reducción de los costos en la obra civil, por lo que es usada en medianas y grandes centrales hidroeléctricas.

### 2.8.2.7 Bombas que operan como turbinas

A lo largo de los últimos años se han desarrollado una orientación hacia el uso de las bombas rotodinámicas en las pequeñas centrales hidráulicas que operan como turbinas, mediante la inversión del sentido de giro y de la rotación. Dado que las bombas carecen de un distribuidor, pueden operar a plena carga; la regulación se realiza mediante la disipación de energía, calentando agua o irradiando calor al ambiente, operación que es controlada por un regulador electrónico de carga.

Al parecer, la ventaja de usar bombas es la reducción del costo en comparación con el de las turbinas, ya que son fáciles de adquirir y de reparar, puesto que se producen en serie; sin embargo, es necesario señalar que se requiere una adecuada selección. Sin embargo la eficiencia no es muy alta, por lo que su uso es recomendable para bajas potencias. En la figura 2.16 se muestra una bomba que opera como una turbina.

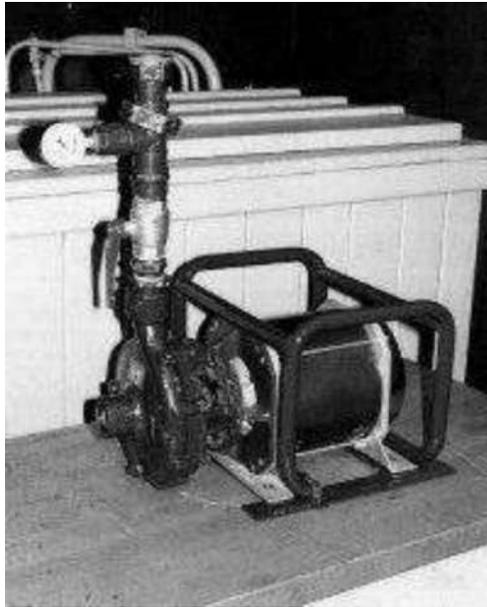


Figura 2.16 Bomba-turbina.

## Capítulo 3

# Modelado de la micro-turbina Michell-Banki

### 3.1 Turbinas hidráulicas

Una máquina hidráulica es un dispositivo capaz de convertir energía hidráulica en energía mecánica; pueden ser motrices (turbinas), o generatrices (bombas), modificando la energía total de la vena fluida que las atraviesa. En el estudio de las turbomáquinas hidráulicas no se tienen en cuenta efectos de tipo térmico, aunque a veces habrá necesidad de recurrir a determinados conceptos termodinámicos; todos los fenómenos que se estudian serán en régimen permanente, caracterizados por una velocidad de rotación de la máquina y un caudal, constantes.

En una máquina hidráulica, el agua intercambia energía con un dispositivo mecánico de revolución que gira alrededor de su eje de simetría; este mecanismo lleva una o varias ruedas, (rodetes o rotores), provistas de álabes, de forma que entre ellos existen unos espacios libres o canales, por los que circula el agua. Los métodos utilizados para su estudio son, el analítico, el experimental y el análisis dimensional.

El *método analítico* se fundamenta en el estudio del movimiento del fluido a través de los álabes, según los principios de la Mecánica de Fluidos.

El *método experimental*, se fundamenta en la formulación empírica de la Hidráulica, y la experimentación.

El *análisis dimensional* ofrece grupos de relaciones entre las variables que intervienen en el proceso, confirmando los coeficientes de funcionamiento de las turbomáquinas, al igual que los diversos números adimensionales que proporcionan información sobre la influencia de las propiedades del fluido en movimiento a través de los órganos que las componen.

## 3.2 Potencia del salto de agua

Si el interesado en este tipo de tecnología se encuentra ubicado cerca de un curso, por donde baja una cantidad importante de agua, seguramente se trata de un buen lugar para la instalación de una micro-turbina.

Pero de todas formas, como primera medida debemos asegurarnos que la potencia que podemos obtener sea suficiente para el fin que le queremos dar a la microturbina, aunque más no sea para la obtención de iluminación eléctrica. Por ejemplo, si un arroyo nos puede entregar una potencia de 400 W, podremos instalar 6 focos de 60 W en nuestra casa.

La potencia disponible se puede determinar fácilmente conociendo dos parámetros del curso de agua y dos parámetros ya conocidos:

**Altura (H):** Como se mencionó anteriormente, para disponer de potencia, una cantidad suficiente de agua debe estar disponible a través de un salto. La distancia vertical entre dos puntos de un desnivel se denomina altura, generalmente medida en metros.

**Caudal (Q):** La cantidad de agua se denomina caudal y es medido en metros cúbicos por segundo ( $m^3/s$ ), o litros por segundo ( $l/s$ ).

**Gravedad (g):** aceleración de la gravedad en  $m/s^2$

**Rendimiento (r):** rendimiento del sistema, que depende del tipo de turbina, adimensional.

Estos cuatro parámetros determinan la potencia instalable, mediante la siguiente fórmula:

$$P = r \times g \times Q \times H \quad (3.1)$$

Generalmente se tiende a sobrestimar el potencial energético de un recurso hídrico, por lo que se deben siempre realizar mediciones en el lugar que se estime adecuado para la instalación de la micro-turbina.

Póngase por caso una válvula que efectúa una reducción de presión de 4 bar. Para un caudal ejemplo típico en la red de 300  $l/s$ , se producirían unos 100kW si el rendimiento alcanzara el 100%. Obtener dicha potencia mediante otras energías renovables como, por ejemplo, la energía fotovoltaica, es mucho más costoso y requeriría una superficie equivalente mucho mayor. En esto reside uno de los principales incentivos para realizar este proyecto.

El dato de potencia generada, 100kW en este caso, revela que es posible obtener una cantidad interesante de energía, puesto que el número total de válvulas susceptibles a dicho cambio es relativamente elevado; se trata de unas 650 válvulas, localizadas a lo largo de toda la red de suministro de agua del Canal de Isabel II en distintos municipios de la Comunidad de Madrid.

Además los rendimientos de este tipo de instalaciones son muy elevados, rozando valores del orden del 90%.

A continuación, se explican algunos métodos prácticos para la determinación en forma aproximada de **Q** y **H** en el cauce de agua.

### **3.3 Determinación del caudal Q**

Este valor suele variar en algunas regiones de acuerdo a las estaciones y a otros fenómenos climáticos. Es importante establecer que la medición del caudal sea representativa del valor medio.

Por tal motivo, para estudiar el comportamiento de los arroyos, es de suma importancia la información que puedan aportar los pobladores, especialmente las personas que han vivido muchos años en el lugar y que conocen por observación los niveles y variaciones en el caudal del arroyo, tanto los valores medios y normales, como los de períodos de seca y de grandes crecidas. No es lo mismo medir caudales en períodos de poca precipitación que en los de abundantes lluvias, y ambos valores no son representativos del módulo, o caudal medio anual, necesario para estimar la potencia disponible.

#### **3.3.1 Método del llenado del tambor**

Se trata de desviar el caudal del cauce y medir el tiempo que tarda en llenarse. Conociendo la capacidad (V) del tambor en litros y el tiempo (t) empleado, se puede conocer el caudal de forma aproximada tal y como se muestra en la figura 3.1. Lógicamente este método es útil en pequeños cauces que puedan desviar su caudal de una forma sencilla.

$$Q \left( \frac{lbs}{seg} \right) = \frac{V(lbs)}{t(seg)} \quad (3.2)$$



Figura 3.1 Medida del caudal usando un tambor.

### 3.3.2 Método del vertedero

Este método fue desarrollado en Misiones por la Facultad de Ingeniería de Oberá, y aplicado en los micro emprendimientos realizados. Es un método útil para arroyos medianos, de más de 20 l/s.

En primer lugar se ha de buscar un lugar propicio en el arroyo o cauce que se desea medir. Se colocan unas tablas como dique de modo que se produzca un pequeño remanso, tapando con barro (preferentemente ñaú) las juntas de las tablas, los costados y por debajo, para evitar fugas. En la parte media de las tablas se ha de realizar previamente a su colocación, un corte de un metro de largo. Por esta garganta verterá el arroyo en forma de cascada. La abertura del vertedero debe tener los cortes en forma sesgada, con los bordes agudos en el lado de la corriente arriba, es decir, en el lado en que va a quedar el agua estancada. Se han de colocar dos tablas según las indicaciones de la figura para poder medir la altura del sobre flujo ( $h$ ) que atraviesa el vertedero.

El caudal  $Q$  del arroyo se obtiene a través de la tabla de valores adjunta, en función de la altura  $h$  que se obtiene midiendo la distancia entre el borde inferior del vertedero y el nivel de la superficie del espejo de agua del remanso.

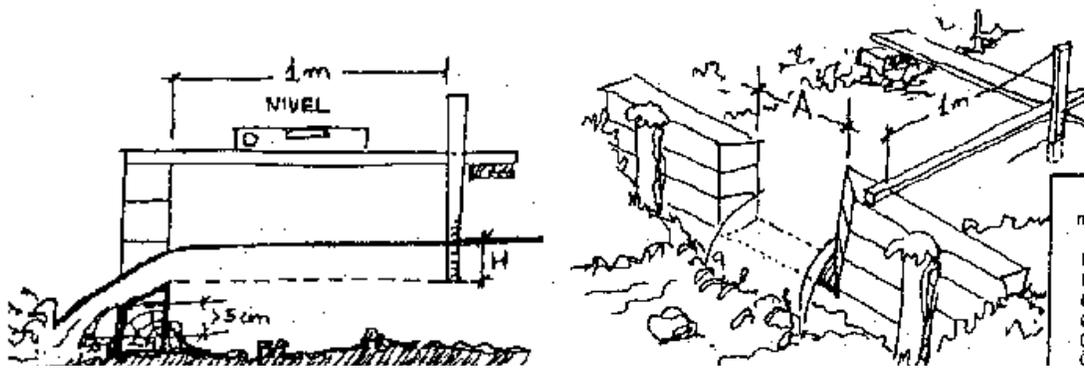


Figura 3.2 Vertedero con escotadura rectangular.

Tabla 3.1 Medición del caudal respecto a la altura del remanso

H metros	litros (seg)	H metros	litros (seg)	H metros	litros (seg)
0.01	1.8	0.27	249	0.56	742
0.02	5	0.28	263	0.58	783
0.03	9.3	0.29	271	0.6	823
0.04	14	0.3	291	0.62	865
0.05	20	0.31	309	0.64	907
0.06	25	0.32	321	0.66	950
0.07	33	0.33	330	0.68	994
0.08	40	0.34	351	0.7	1038
0.09	48.6	0.35	367	0.72	1087
0.1	56	0.36	383	0.74	1128
0.11	65	0.37	399	0.76	1174
0.12	74	0.38	416	0.78	1227
0.13	83	0.39	432	0.8	1288
0.14	93	0.4	448	0.82	1316
0.15	103	0.41	455	0.84	1384
0.16	113	0.42	482	0.86	1413
0.17	124	0.43	500	0.88	1463
0.18	135	0.44	517	0.9	1513
0.19	147	0.45	535	0.92	1583
0.2	158	0.46	553	0.95	1640
0.22	183	0.48	589	1	1774
0.23	195	0.49	608	1.26	2418
0.24	208	0.5	625	1.5	3275
0.25	228	0.52	664	1.75	4101
0.26	239	0.54	703	2	5011

### 3.3.3 Método del flotador

Para ríos, acequias, canalizaciones y corrientes de poca velocidad y gran caudal se puede utilizar este sencillo método.

En primer lugar se debe medir la sección de cauce, de la siguiente forma: se recomienda realizar una serie de mediciones como muestra la figura (3.3).

Midiendo sus lados con ayuda de unas reglas graduadas, colocadas en la forma que indica la figura 3.3, el área de la sección mojada del cauce está dada por la ecuación:

$$A(cm^2) = b(cm) \cdot \left[ \frac{h_1 + h_2 + h_3 + \dots + h_n}{n} \right] \quad (3.3)$$

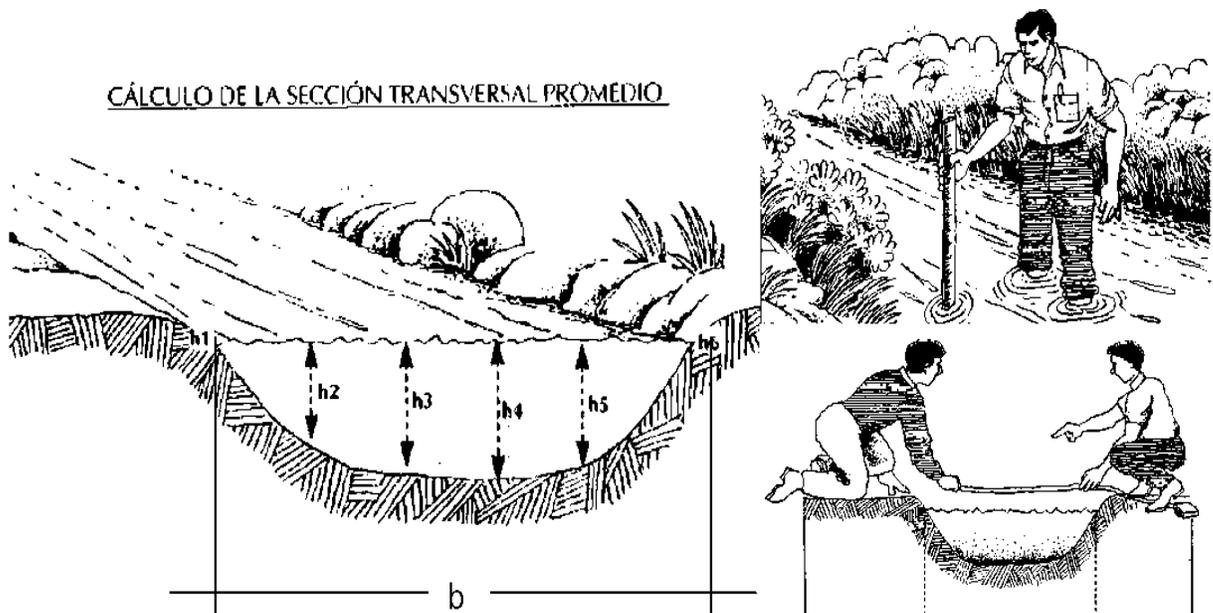


Figura 3.3 Método del flotador para medir el caudal.

Luego, se elige una parte del arroyo lo más uniforme posible y se colocan dos cordeles separados una distancia de 10 metros. Se echa un flotador (puede ser una botella plástica vacía) más arriba y en el centro del río, y se mide el tiempo (t) que tarda en pasar la botella entre los cordeles tal y como lo muestra la figura 3.4.

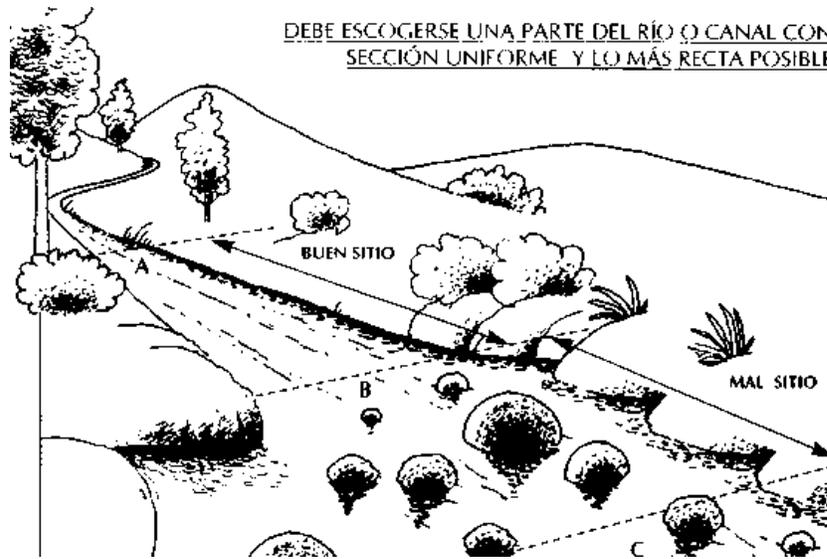


Figura 3.4 Parte del río o canal lo mas recto posible.

El caudal aproximado quedará determinado por:

$$Q \left( \frac{lbs}{seg} \right) = \frac{0.75 * A(cm^2)}{t(seg)} \quad (3.4)$$

Siendo A la sección del cauce en  $cm^2$ . Se consigue así el valor de la velocidad superficial, es decir, de la capa de agua exterior en contacto con la atmósfera.

El coeficiente 0.75 se introduce para corregir la velocidad superficial y aproximarla a la velocidad media, pues tanto en la orilla como en el fondo la velocidad es menor.

### 3.4 La curva de duración de caudal

La curva de duración de caudales nos indica el comportamiento de los caudales a lo largo de un período anual y una serie de curvas anuales, también permite visualizar el comportamiento de los caudales en años particulares como ricos, secos o extrasecos.

### MEDICIONES DE CAUDALES EN UNA CUENCA

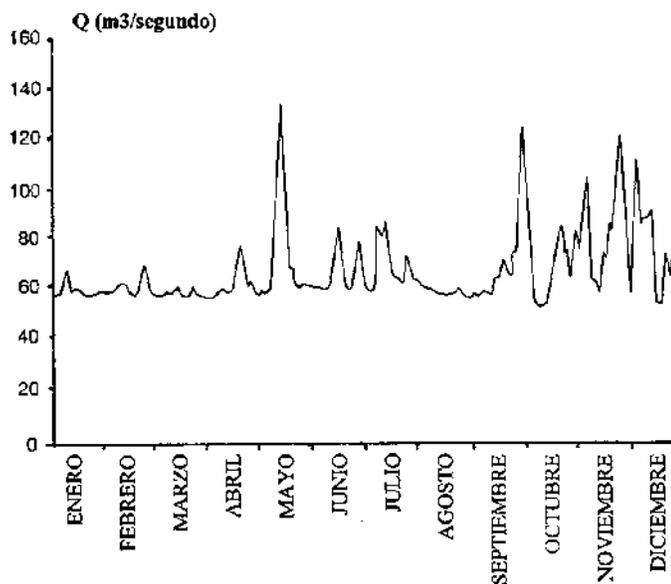


Figura 3.5 Medición de caudales en una cuenca

En la figura 3.5 se muestra un curva típica que nos indica la probabilidad de que durante un porcentaje de tiempo del año los caudales excedan los indicados en la curva.

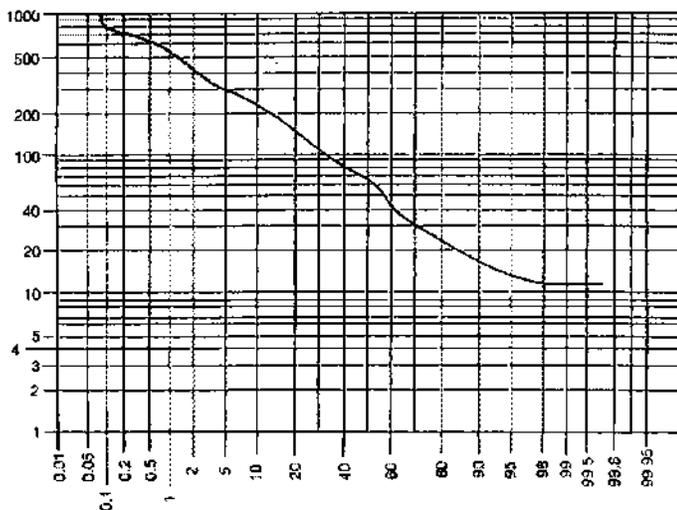


Figura 3.6 Curva de duración de caudales por correlación.

Estas curvas pueden construirse cuando existen registros (aforos) durante largos períodos de tiempo. También puede construirse para cuencas no aforadas, cuando existen

registros en otras cuencas dentro de un área general de características ambientales homogéneas mediante correlación de caudales.

Este método de determinación de la curva de duración de caudales por correlación, requiere realizar mediciones (10 días como mínimo) distribuidas durante un ciclo anual, con mayor densidad de medidas en la estación seca, y compararlos con los registros, de los mismos días en la cuenca aforada.

Con una curva ajustada de correlación entre los caudales circulantes en la cuenca aforada y los que circulan en la cuenca sin aforo, se puede construir la curva de duración de caudales de la cuenca en estudio a partir de los datos de la cuenca aforada tal y como se muestra en la figura 3.6.

Cuando no se dispone de información estadística de cuencas aforadas, lo mejor es recurrir a la memoria del poblador local. En este caso debe buscarse información sobre el comportamiento del arroyo en las estaciones secas y en las más ricas.

Ambos datos son necesarios, ya que el proyecto de una MCH (Micro-Central Hidroeléctrica) requiere un buen conocimiento del caudal mínimo que dispondrá (para evaluar la potencia mínima firme) y del caudal máximo que deberá evacuarse (seguridad de las obras sobre el arroyo).

Para ello debe consultarse a los pobladores locales sobre los niveles que alcanza el arroyo en el lugar donde se mide el caudal, tanto en las máximas crecidas como las mayores sequías que recuerden.

La medición realizada en el emplazamiento elegido, complementada con la información suministrada por los pobladores locales y los registros de lluvias de la zona permitirán estimar valores para los caudales mínimo, máximo y medio en el sitio del emplazamiento.

### **3.5 Determinación de la altura $H$ del salto**

Considerando como altura  $H$  la diferencia de altura que existe entre el nivel de la superficie del agua y el nivel de la salida de agua de la turbina.

Una manera rudimentaria para medir la altura, es utilizando dos elementos: un nivel de albañil para fijar el plano horizontal y una caña o vara de cuatro o cinco metros de largo,

en cuya punta se atará un paño rojo para facilitar la visualización, tal y como se muestra en la figura 3.7

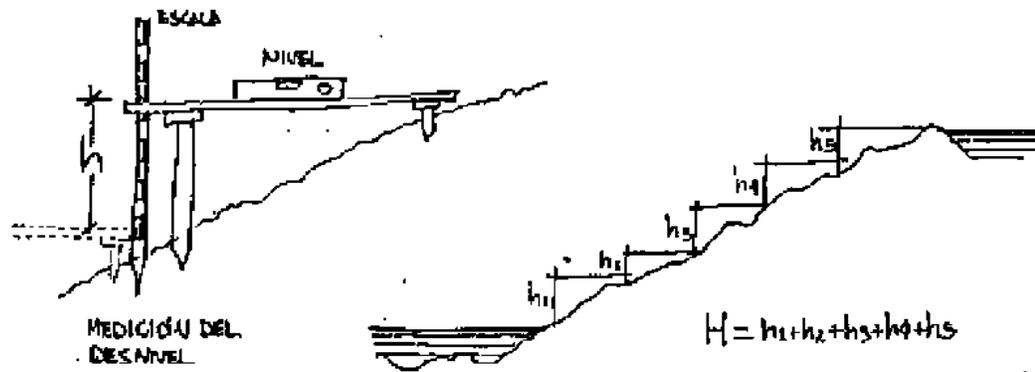


Figura 3.7 Medición de la altura del salto

Por medio de sucesivas mediciones parciales, se llega a valores aceptables como para tener una estimación más real de la altura del salto.

$$H = h_1 + h_2 + h_3 + h_4 + \dots + h_n \quad (3.5)$$

### 3.6 Modelado de la Micro-turbina Michell-Banki

La turbina es el elemento que transforma la energía contenida en el agua a la energía que es requerida, ya sea para mover un generador eléctrico o para accionar alguna herramienta, bomba de agua, etc.

El tipo más adecuado para las características de los pequeños arroyos de la zona es el diseño denominado Michell-Banki, por el nombre de sus inventores. Este tipo de turbinas posee un buen funcionamiento con caudales de 20 a 9000 l/s y caídas de 1 a 200 mts.

Sus ventajas principales están en su sencillo diseño y su fácil construcción lo que la hace atractiva en el balance económico de un aprovechamiento a pequeña escala. No obstante esto no impide que la turbina se utilice en grandes instalaciones. Aunque la turbina de flujo transversal se conoce como una máquina de pequeña escala, existen actualmente máquinas de este tipo de hasta 6 MW.

Diseños de este tipo se encuentran funcionando correctamente en los emprendimientos desarrollados por la Facultad de Ingeniería de Oberá en Argentina.

Las principales características de esta máquina son las siguientes:

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

A continuación y antes de entrar en el diseño de un modelo apropiado, obsérvense las partes constitutivas de un modelo de fabricación comercial. Consta de muchos elementos optimizados, pero en la fabricación apropiada se utilizarán los estrictamente necesarios

### **3.6.1 Descripción de una turbina Michell-Banki**

La turbina consta de dos elementos principales: un inyector y un rotor. El agua es restituida mediante una descarga a presión atmosférica. Una vez que el agua hace su entrada, la pala directriz móvil, o distribuidor, regula la cantidad de fluido que penetra en el interior, según gire sobre su eje, habilitando una entrada mayor o menor. Además se encarga de direccionar el flujo para el agua incida sobre el rodete, sobre los primeros álabes o “paletas” que encuentra en su camino, propiciando así el giro del mismo. Una vez atravesados estos álabes, el fluido continúa su camino en el interior y reincide sobre los álabes inferiores, ayudando al giro.

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, por lo que su construcción artesanal es factible, aunque naturalmente nunca alcanzarán los rendimientos de las unidades construidas con los medios técnicos adecuados.

Un aspecto muy atractivo derivado de la constitución de la máquina y su forma de funcionamiento consiste en que el follaje, hierbas, lodos, etc. que durante la entrada del agua se quedan entre los álabes, vuelven a ser expulsados después de medio giro del rodete con el agua de salida por el efecto de la fuerza centrífuga. De este modo el rodete tiene un funcionamiento poco sensible a elementos no deseados, que es una de las ventajas que posee respecto a otras turbinas.

Los rulemanes (elemento mecánico que reduce la fricción entre un eje y las piezas conectadas a éste, sirviéndole de apoyo y facilitando su desplazamiento) de las turbinas son del tipo de rodillos. Es importante que a la hora de diseñar la carcasa se tenga muy en cuenta el aspecto de aislamiento de los rodamientos respecto al paso del agua. Por ello la carcasa está preparada con alojamientos y un sistema de prensaestopas que evita las fugas de forma eficiente. Excepto el cambio anual de grasa, los cojinetes no requieren ningún trabajo de conservación.

Obsérvese que la simplicidad de éste diseño permite una realización apropiada del mismo. El elemento principal, el rodete, consta de un par (o más) discos en los que se sueldan los álabes, que son de curvatura lineal. Tanto el rodete como el ingreso de agua se pueden fabricar con láminas de acero soldadas requiriendo herramientas y técnicas de armado simples, con lo que cualquier taller agrícola podría hacer frente a su construcción. En la figura 3.8 se muestra todos los elementos que anteriormente se describieron de una turbina Michell-Banki.

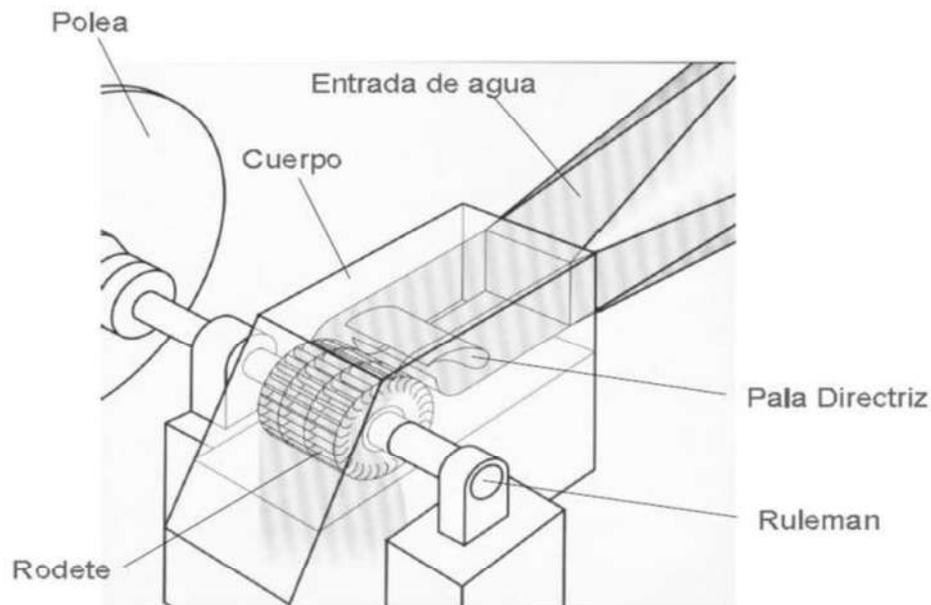


Figura 3.8 Principales elementos de una turbina Michell-Banki.

### 3.6.2 Principios generales de la turbina Michell-Banki

Las Turbinas Banki son turbo máquinas hidráulicas motoras de flujo radialtransversal, admisión parcial y doble efecto. El agua que llega por la tubería de presión, es conducida hacia el rodete por una tobera convergente de sección transversal rectangular denominada inyector, la que esta provista de un órgano regulador de flujos, que permite regular el caudal según las exigencias de la demanda.

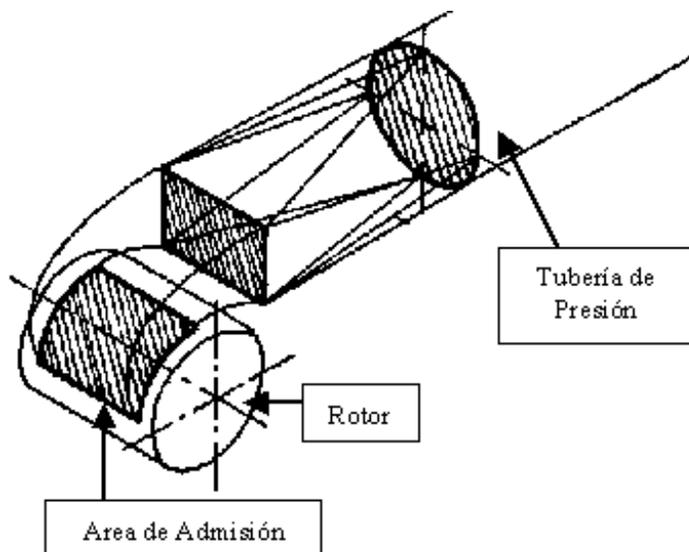


Figura 3.9 Entrada del caudal de una turbina Michell-Banki.

El inyector posee una sección transversal rectangular que va unida a la tubería por una transición rectangular - circular. Este inyector es el que dirige el agua hacia el rotor a través de una sección que toma una determinada cantidad de álabes del mismo, y que guía el agua para que entre al rotor con un ángulo determinado obteniendo el mayor aprovechamiento de la energía, lo cual se muestra en la figura 3.9.

La energía del agua es transferida al rotor en dos etapas, lo que también da a esta máquina el nombre de turbina de doble efecto, y de las cuales la primera etapa entrega un promedio del 70% de la energía total transferida al rotor y la segunda alrededor del 30% restante, tal y como se muestra en la figura 3.10.

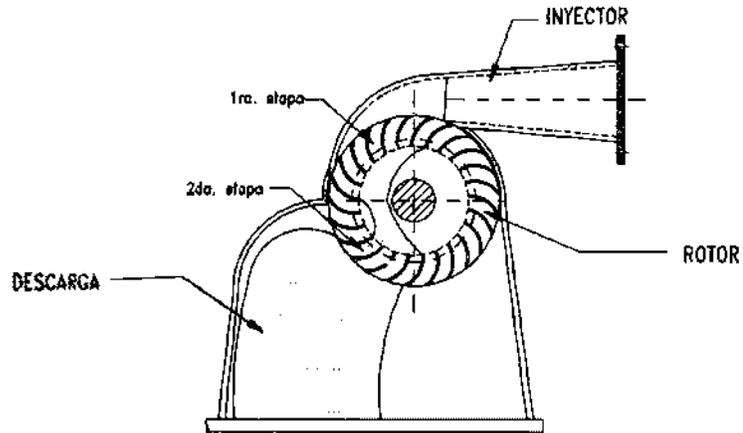


Figura 3.10 Etapas de energía de una turbina Michell-Banki.

Los ensayos realizados por distintos investigadores sitúan el rendimiento hidráulico de esta máquina entre un 65-70%, otros autores mencionan un 61% aclarando que la segunda etapa entrega un 17%, y en general muchos autores indican un 70% hasta un 84%.

Una característica atractiva de esta máquina es la forma aplanada de su curva de rendimiento. Esto se logra con un diseño de la turbina con admisión parcial. Por ejemplo: si se divide el rotor en 3 partes iguales y la admisión del agua se puede realizar por 1/3, 2/3 o la totalidad del rodete.

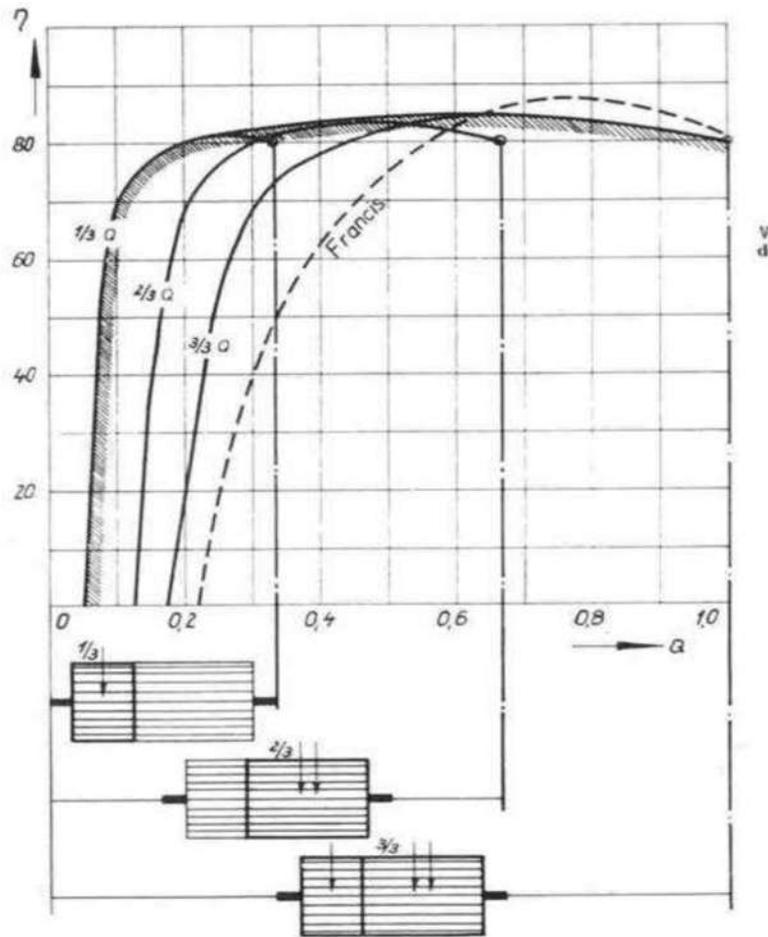


Figura 3.11 Curva de rendimiento de una turbina Michell-Banki.

Esta clase de admisión permite obtener una curva de rendimiento como la de la Figura 3.11 en la cual se observa la comparación con la curva de rendimiento de una turbina tipo Francis.

Como se mencionó anteriormente, la turbina de flujo transversal es especialmente apropiada para ríos con pequeños caudales. Estos generalmente llevan durante varios meses muy poca agua, por lo que en su diseño debe considerarse para el mínimo caudal que será el parcial y para épocas de abundancia de agua, se considerará el caudal total que será utilizado para usos productivos.

De la curva característica de rendimiento de cada turbina depende si durante este tiempo se sigue produciendo energía eléctrica.

En el rotor (o rodete) ocurre la conversión de la energía hidráulica en mecánica. El mismo está conformado por un conjunto de alabes axialmente rectos, soportado solidariamente al eje por medio de dos discos laterales esto se muestra en la figura 3.12.

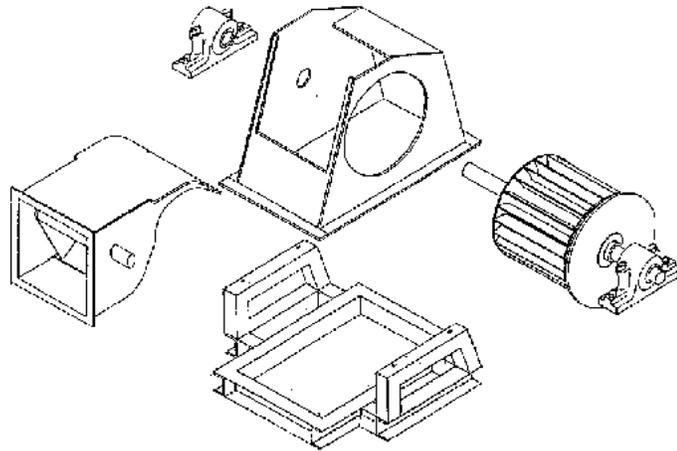


Figura 3.12 Rodete y carcasa de una turbina Michell-Banki.

En turbinas en las que los caudales de operación son relativamente elevados, por lo cual la relación ancho / diámetro del rotor (sección de paso de agua) es grande, se recurre al uso de discos intermedios a fin de asegurar la resistencia estructural sin necesidad de utilizar espesores de álabe que perjudiquen la performance del rodete.

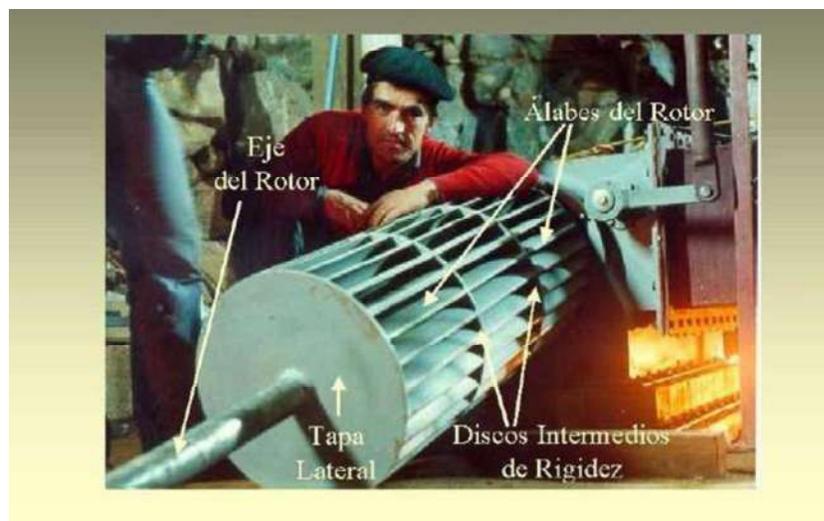


Figura 3.13 Rodete Banki con discos intermedios.

El aspecto del rodete es similar al de las jaulas de ardillas y su desarrollo geométrico bidimensional con álabes axiales de radio de curvatura constante, hace posible la construcción sin necesidad de contar con tecnología altamente especializada. Las palas o alabes son diseñadas para transformar la energía de dos etapas.

En efecto, el agua proveniente del inyector ingresa al rodete siendo desviada por la corona de álabes, de tal manera que la variación en la cantidad de movimiento en el fluido, origina la rotación de la máquina. Atraviesa luego el espacio interno de la jaula, para salir de ella sufriendo una nueva desviación.

En su diseño original la turbina Banki trabajaba como una máquina de impulso pura ya que las dimensiones relativas entre el inyector y el rodete, la separación entre alabe y el arco de admisión del mismo permitían atravesar los alabes a presión atmosférica. Los diseños actuales, en la búsqueda de máquinas más compactas, utilizan espacios más reducidos entre inyector y rotor y ángulos de admisión mayores.

Con esta configuración la máquina no es estrictamente una turbina de impulso ya que a plena apertura del inyector, en los diseños actuales, con ángulos de admisión elevados, (arcos de admisión del rodete que corresponden casi a 1/3 de la superficie del cilindro) el espacio entre alabes del rodete se llena completamente de agua. En esta situación el flujo no trabaja a presión atmosférica sino con una pequeña presión positiva. De tal forma la turbina trabaja a plena carga como una máquina de reacción positiva y a cargas parciales bajas como una turbina de impulso.

### **3.6.3 Características Operativas de la turbina Michell-Banki**

Las máquinas en cuestión se adaptan perfectamente a un amplio rango de saltos y caudales, cubriendo una gran región del plano H/Q, sin variar su geometría genérica.

En las figuras 3.14 y 3.15 se muestran la configuración geométrica y las características eficiencia - gasto (relativo-porcentual) de dos diseños de turbinas Banki desarrolladas en Misiones y ensayados en laboratorio. En dichas curvas puede apreciarse el buen comportamiento energético en cargas parciales de dichas turbinas.

La Turbina de Alabe Regulador que se muestra en la figura 3.14 tiene un rendimiento máximo del 70% y, para cualquier gasto superior al 25% del máximo, mantiene su eficiencia por encima del 50%.

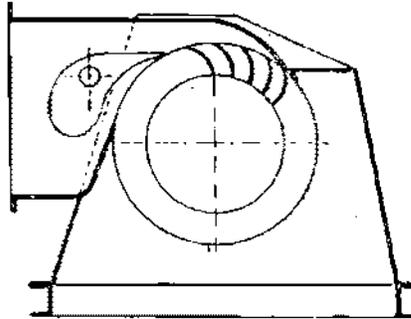


Figura 3.14 Turbina Michell-Banki de alabe regulador.

La Turbina Compuerta Reguladora (curva de trazos) que se muestra en la figura 3.15 tiene un pico de rendimiento máximo del 75% y se da para un caudal del 50% del máximo, manteniendo su rendimiento superior al 70% en carga parciales entre el 25% y 80% del caudal máximo.

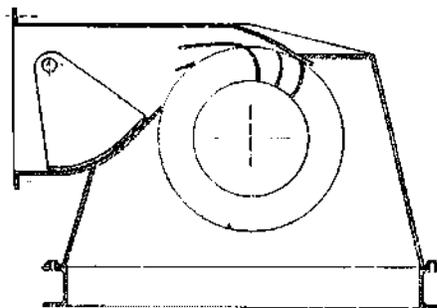


Figura 3.15 Turbina Michell-Banki de compuerta reguladora.

Los diseños actuales de álabes reguladores mejorados por SKAT para el programa de MCH's de Nepal (Turbina T12), alcanzan rendimientos mayores al 70% en aperturas parciales desde el 50% hasta plena carga. La figura 3.16 da una descripción de la turbina diseñada por SKAT.

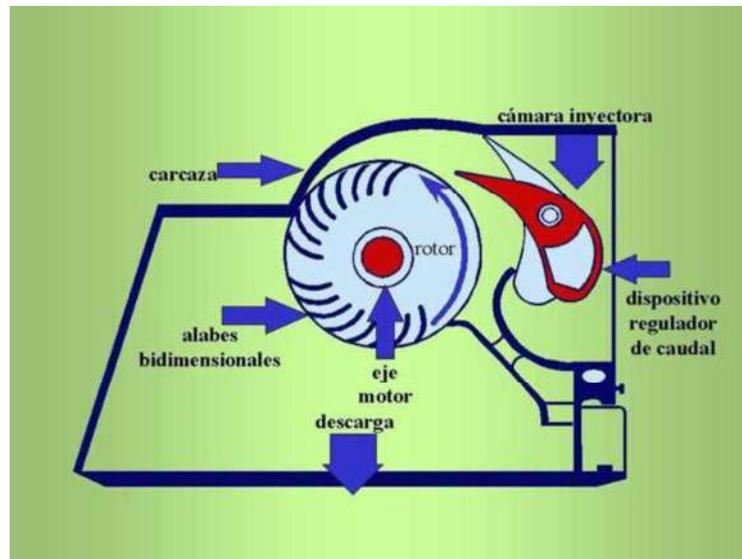


Figura 3.16 Turbina Michell-Banki diseñada por SKAT.

### 3.6.4 Parámetros del Diseño

Los parámetros de diseño que se utilizan para seleccionar las características geométricas básicas del rodete de una turbina Banki son: el rendimiento y los números de velocidad, caudal ancho del rodete y el número de álabes. Para una configuración geométrica determinada, estos parámetros deben definirse mediante ensayos en el laboratorio de hidráulica y tomando en cuenta las siguientes consideraciones:

#### 3.6.4.1 Selección del diámetro

De acuerdo a lo dicho con anterioridad el diámetro de esta máquina no depende del caudal. Esta premisa facilita el diseño pues otorga al diámetro el carácter de parámetro independiente.

Esto se afirma por el hecho de que esta turbina puede trabajar dentro de un amplio rango de velocidades de rotación. De acuerdo con esto el diámetro podrá ser seleccionado en primer término.

Muchos autores señalan que para pequeños aprovechamientos hidroenergéticos los diámetros comúnmente utilizados van desde los 200 mm hasta los 500 mm. Lo que se hace frecuentemente es seleccionar el diámetro de los diagramas de estandarización que ofrece la bibliografía disponible y tomar a éste como base del diseño.

Algunos factores a tener en cuenta son los siguientes:

- Si se reduce el diámetro del rodete se reduce el rendimiento hidráulico.
- Los rodetes más grandes tienen una velocidad de embalamiento menor.
- Se debe mantener una cierta proporcionalidad entre el diámetro y el ancho de la turbina a fin de evitar cambios de sección demasiado bruscos entre la tubería y el inyector que provocan fuertes perturbaciones en la vena fluida.
- Se debe tener en cuenta al seleccionar dicho parámetro el grado de simplicidad en la fabricación de la turbina.

Una vez seleccionado el diámetro se procede a obtener la velocidad de giro de la máquina

### 3.6.4.2 Cálculo de la velocidad

La velocidad óptima de rotación del rodete viene dada por:

$$n = n_{11} * \frac{H^{1/2}}{D} \quad (3.6)$$

donde,

$n_{11}$  es el parámetro de velocidad

H es la altura neta del diseño

D es el diámetro de rodete

### 3.6.4.3 Cálculo del caudal de la micro-turbina Michell-Banki

El caudal de diseño de la máquina queda vinculado a las principales magnitudes geométricas de la misma a través del parámetro de caudal, como sigue.

$$Q = QB_{11} \times B \times D \times \sqrt{H} \quad (3.7)$$

donde,

$QB_{11}$  es el parámetro caudal.

Q es el caudal de diseño.

B es el ancho de rotor.

La potencia del eje de la máquina es función del rendimiento que se obtenga con el diseño utilizado como ya se explicó anteriormente esta expresada por:

$$Pe \text{ (kW)} = 9.807 \times \eta \times Q \text{ (m}^3\text{/s)} \times H \text{ (m)} \quad \text{donde } \eta \text{ es el rendimiento}$$

En la bibliografía se encuentran numerosas referencias de valores que deben asignarse a los parámetros del diseño, así como al número específico según caudal para turbinas Banki. Tales referencias corresponden a los diseños estudiados por cada investigador y en consecuencia no son de aplicación general. Como referencia indicamos a continuación los valores que corresponden a los parámetros de diseño de la turbina de álabe regulador desarrollada en Misiones.

$$n_{11} = 39,7$$

$$QB_{11} = 0,917$$

$$\eta = 0,75$$

### 3.6.4.4 Número de álabes del rodete.

La selección del número de álabes se realiza en base al diámetro y las condiciones de funcionamiento de la turbina, es decir, altura y caudal.

Se deberá tener en cuenta que un reducido número de álabes provoca pulsaciones en la generación de la potencia, y un número elevado producirá una aceleración de la vena fluida con el consiguiente aumento de las pérdidas y el efecto de reja.

Según las investigaciones de A. Ulku y H. Olgun existe un número óptimo de álabes. En la tabla 3.2 se transcriben los resultados de diferentes investigaciones reflejadas en la literatura, donde  $d$  es el diámetro de la turbina,  $B$  es el ancho de la turbina,  $z$  es el número de álabes y  $\eta_h$  es el rendimiento de la turbina.

Tabla 3.2 Parámetros característicos en turbinas ensayadas por diferentes investigaciones.

REFERENCIA	D/d	D/B	z	$\eta_h$
YOKOHAMA, 1985, JAPON	0.66	4.25	26	80.60
VIGM, 1986, CCCP	0.63	3.00	24	78.00
GANZ, 1984, HUNGRIA	0.66	1.00	30	75.00
ALABAMA, 1983, USA	0.66	0.25	20	75.00
RESITA, 1983, RUMANIA	0.66	1.28	24	73.00
KTU, 1987, TRAZBON, TURKIA	0.54	0.81	24	71.30
OREGON, 1949, USA	0.66	1.09	20	68.00
VDI, 1981, ETIOPIA	0.67	3.26	36	66.00
LOS ANDES, 1973, COLOMBIA	0.62	1.87	27	60.60
ODTU, 1985, ANKARA, TURKIA	0.83	1.44	30	55.50

De esta tabla se desprende que el número óptimo de álabes está entre 24 y 30 ya sea debido al diámetro, el ancho del rodete y al número de álabes.

### 3.6.4.5 Cálculo del Ancho del Rodete

Un factor importante a tener en cuenta es el cálculo del ancho del rotor. Este se calcula teniendo en cuenta el diámetro seleccionado y los parámetros de funcionamiento de altura (H) y caudal (Q).

Como se sabe el área de admisión está dada por:

$$Aa = \frac{Q}{Cm1} \quad (3.8)$$

Además,

$$Aa = B \cdot pz \cdot Za \quad (3.9)$$

donde,

Aa es el área de admisión [m]

Cm1 es el componente de la velocidad absoluta en la dirección meridiana [m/s]

B es el ancho del rotor [m]

pz es el paso entre alabes [m]

Za es el Numero de alabes en la admisión

El paso pz estará dado por:

$$pz = \frac{\pi \cdot D}{z} \quad (3.10)$$

donde,

D es el diámetro del rodete [m]

z es el numero de alabes del rodete

Se define

$$Xz = \frac{Za}{z} \quad (3.11)$$

donde,

Xz es la relación de número de alabes

Como la relación entre el número de álabes de la admisión y el número de álabes totales, se tendrá que una vez seleccionado el número de álabes del rotor se podrá determinar el número de álabes que actúan en la admisión, y por lo tanto el valor de Xz. Este número de álabes Za tiene estrecha vinculación con el ángulo de admisión de la máquina.

El coeficiente Xz varía entre 0.05 y 0.35, como límite se adopta

$$Xz = \frac{Za}{z} < 0.35 \quad (3.12)$$

Igualando (3.9) y (3.10) y despejando B tenemos.

$$B = \frac{Q \cdot z}{\pi \cdot D \cdot c1 \sin \alpha1 \cdot Z\alpha} \quad (3.13)$$

donde,

c1 es la velocidad absoluta [m/s]

$\alpha1$  es el ángulo entre la velocidad absoluta y la velocidad tangencial [°]

Al final expresión para calcular el ancho del rotor queda.

$$B = 0.259 \frac{Q}{Kc \cdot D \cdot Xz \cdot \sqrt{H}} \quad (3.14)$$

donde,

H es la altura neta [m]

Kc es el coeficiente de velocidad del inyector

### 3.6.4.6 Diseño del inyector

El inyector de una turbina de flujo transversal es el segundo componente de esta máquina que en conjunto con el rotor determinan la eficiencia de la turbina. Este es el encargado de guiar el flujo hacia el rotor. Esta conducción deberá poseer una buena aceleración y una distribución de velocidades uniforme en la sección de salida así como un bajo nivel de pérdidas de carga, de manera que se debe lograr la mayor transformación posible de energía potencial en energía cinética.

El inyector puede tener distintas geometrías diferenciadas fundamentalmente por el ángulo de admisión y el órgano de regulación que posea, si es que existe. Se debe tener en cuenta en la ubicación de este órgano de regulación, ya que cualquier elemento en el interior del inyector puede provocar disturbios a la salida del flujo.

El inyector posee una sección transversal de forma rectangular mostrada en la figura 3.17 compuesto por dos caras laterales rectas que permiten descargar el flujo sobre todo el ancho del rotor, una cara superior envolvente que guía el flujo. Esta cara posee un ángulo  $\alpha1$  óptimo constante en cada punto de la curva. La velocidad absoluta será tangente a esta curva en todo punto. La cara inferior es recta y puede tener un ángulo de 5° como máximo.

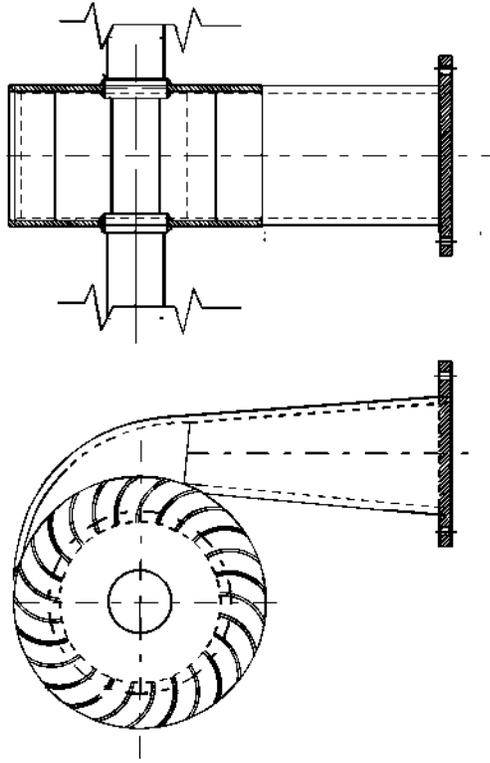


Figura 3.17 Corte transversal del inyector.

El chorro entra al rotor con un ángulo  $\alpha_1$  que es constante en toda la admisión y tangente a la periferia de la rueda. El flujo que abandona las paredes sólidas del inyector es definido como un chorro libre. La velocidad a la salida del inyector tiene un valor un poco más pequeño que el valor de diseño lo que provoca un incremento en el arco de entrada.

Como ya se mencionó, la diversidad de diseño en la geometría del inyector hace que se adopten distintos ángulos de admisión. A través de las diversas investigaciones que se han realizado sobre esta máquina los ángulos de admisión del inyector van desde los  $30^\circ$  hasta los  $120^\circ$ .

Gran parte de la bibliografía existente parece coincidir en que el ángulo de admisión  $\theta_a$  óptimo para este tipo de turbina es de alrededor de los  $90^\circ$ .

Tanto el ángulo como el arco de admisión estarán definidos de acuerdo con el valor de  $X_z$  adoptado con anterioridad, es decir, por el número de álabes en la admisión.

Además se deberá tener en cuenta el "efecto de reja" que causa el espesor de los álabes en la entrada. Así, el arco de admisión está dado por la figura 3.18

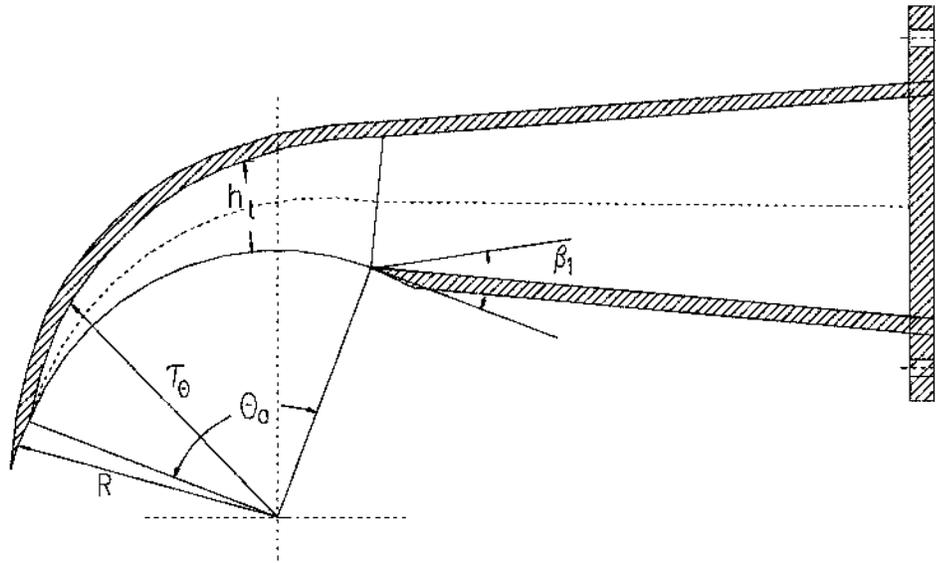


Figura 3.18 Arco de admisión del inyector.

Arco de admisión:

$$La = \frac{\pi \cdot D}{z} \cdot Za + Za \cdot e \quad (3.15)$$

donde,

$e$  es el espesor de los alabes

$La$  es el arco de admisión

Luego el ángulo de admisión  $\theta_a$  es.

$$\theta_a = \frac{360^\circ}{\pi \cdot D} \cdot La \quad (3.16)$$

Por último queda hallar la función que representará la curva envolvente del inyector (cara superior). El modelo matemático de la entrada y salida del caudal en el inyector puede definirse como un flujo potencial.

En general para cualquier ángulo entre  $0^\circ$  y  $\theta_a$  la curva envolvente del inyector está dada por:

$$\tau_\theta = R \cdot e^{\left[ \frac{\left(1 - \frac{\theta}{\theta_a}\right)}{B.C} \right] \cdot Q} \quad (3.17)$$

donde,  
 $r\theta$  es el radio de la curva envolvente del inyector [m].  
C es constante de la ley del torbellino potencial.  
R es el radio del rotor ( $r = d/2$ ) [m],  
 $\theta_a$  es el ángulo de admisión [°],  
 $\theta$  es el ángulo de la envolvente en un punto cualquiera [°],

Además C se calcula por:

$$C = 2.3 \eta h \cdot \frac{D \cdot \sqrt{H}}{Kc1} \quad (3.18)$$

donde,  $\eta h$  es el rendimiento hidráulico  
 $Kc1$  es el coeficiente de velocidad del inyector

### 3.6.5 Características Constructivas

Como se desprende de la descripción general de la máquina, el diseño de su rodete es muy sencillo y sólo la geometría del regulador de caudal adquiere algo de complejidad en el modelo de álabe. Por tal motivo, y para su construcción, no se requiere ni personal altamente calificado ni equipamiento sofisticado pudiendo construirse y repararse en pequeños talleres metal mecánicos, del tipo de los que brindan asistencia a las colonias agrícolas.

Naturalmente una construcción defectuosa ha de implicar una reducción en el rendimiento y en la confiabilidad de las máquinas. Por lo tanto, se requiere que la difusión del uso de las microturbinas sea acompañada de un programa de desarrollo de proveedores, de un sistema de garantía de calidad y de la adopción de una serie estandarizada de máquinas. La adopción de la serie estandarizada es de sencilla concreción, ya que las máquinas Banki operan con un flujo de características bidimensionales es decir que para un diámetro determinado ( $D_e$ ) puede adoptarse un número limitado de anchos (B) que cubran todo el espectro de prestaciones requeridos en la región. La adopción de esta serie es un primer paso para simplificar los proyectos, reducir los costos de fabricación y lograr un esquema operativo que facilite el reemplazo de piezas durante la operación. En la figura 3.19 se muestra la serie estandarizada adoptada en la mayoría de las MCH (RETAIN).

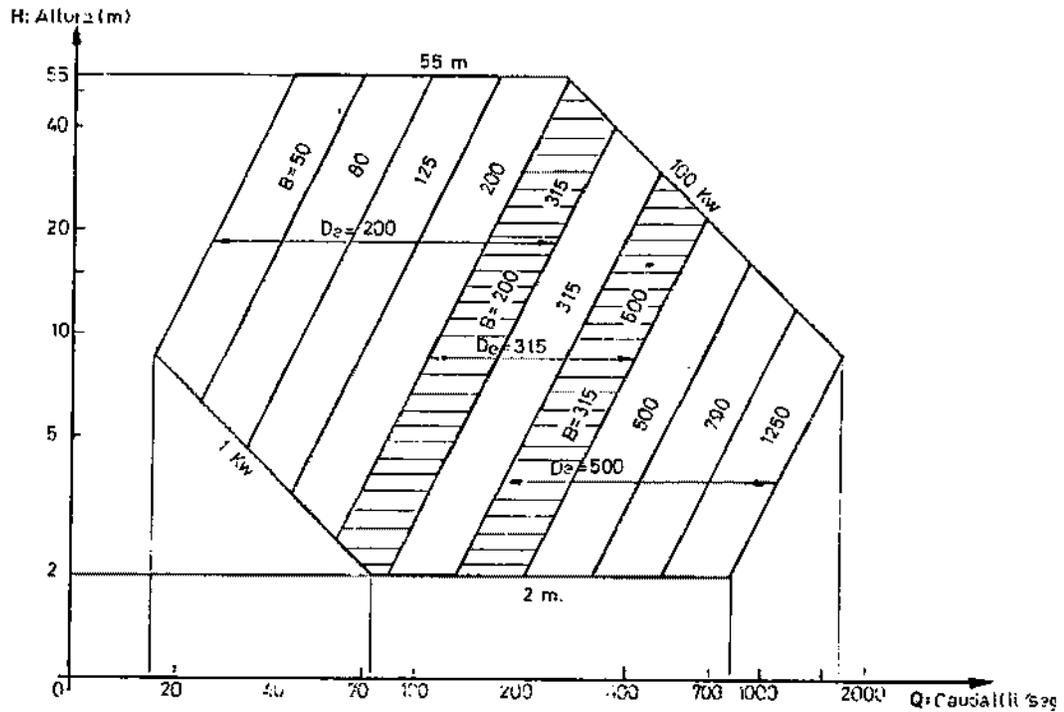


Figura 3.19 Grafica de estandarización Altura-Caudal

El sistema de garantía de calidad permite establecer reglas claras a las que deben sujetarse los proveedores y los responsables del seguimiento de los equipos tanto durante su fabricación como durante su puesta en marcha y operación. Tales reglas incluyen las normas de calidad para la fabricación, montaje y recepción de las máquinas, con los documentos que precisen la oportunidad de los exámenes, las técnicas utilizadas para su ejecución y los estándares de aceptación o rechazo, los que deberán ser conocidos por los proveedores.

El desarrollo de proveedores considera el tipo y la calidad del equipamiento y la calificación de los recursos humanos con que debe contar una empresa para producir los equipos a contratar. Implica relevar y precalificar a las empresas que por su interés y potencial de sus recursos estén en condiciones de ser proveedores, tanto en la etapa de clasificación como en la de fabricación y montaje y de las normas de control a las que deberán someterse. La turbina tipo Banki es en la actualidad la que reúne las mejores características de adaptación para su aplicación en MCH.

### 3.6.6 Proceso de fabricación.

La turbina Michell-Banki puede construirse con materiales de desecho, como planchuelas, planchas y tuberías de acero, y de una manera sencilla si se dispone de un taller suficientemente equipado. En cualquier caso se debe proceder según el material utilizado, la disponibilidad de un taller con más o menos medios, y la experiencia de los trabajadores.

A continuación se dará una guía de los procedimientos y métodos que se pueden emplear para la fabricación de la turbina.

El rodete de la turbina de flujo cruzado está compuesto de dos placas laterales circulares entre las que se intercalan el eje y los álabes, que suelen ser numerosos, generalmente más de 18. En la figura 3.20 se muestra la placa lateral de un rodete con sus álabes.

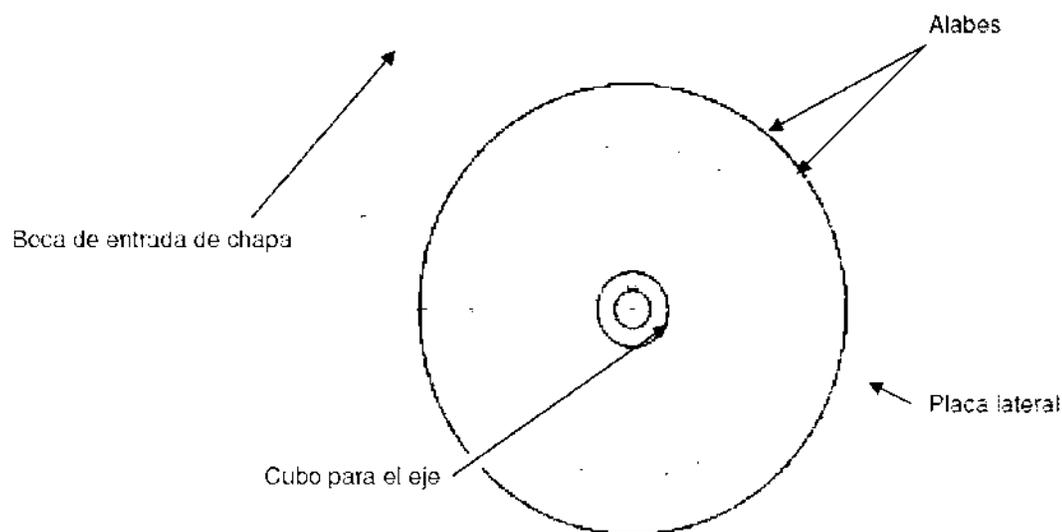


Figura 3.20 Vista lateral de un rodete Banki de flujo cruzado.

Los álabes se fabrican tomando secciones de tubos de acero. En primer lugar se hace un corte al tubo, creando tramos de tubo con la longitud deseada (el ancho de la turbina) y posteriormente se realiza el corte longitudinal de los álabes, de manera que se perfilen con una sección circular de un ángulo aproximado a  $72^\circ$  tal y como se muestra en la figura 3.21.

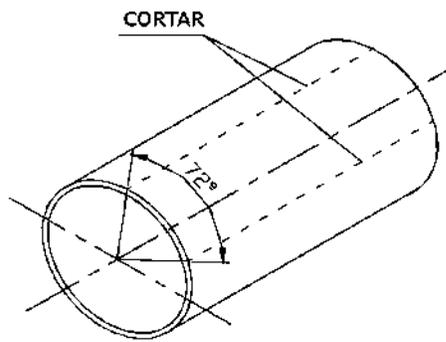


Figura 3.21 Preparación de los alabes.

La entrada de la turbina, está hecha a base de placas (láminas) de acero. Allí se ha de instalar una válvula de entrada, que cumpliría en cierta medida la función de la pala directriz, ya que su fabricación puede ser complicada. Su misión es regular la cantidad de agua de entrada, y con ello la velocidad de rotación. Puede utilizarse algún tipo de válvula para tubería cerrada, mientras no sea una válvula de asiento, pues esta genera mucha pérdida de carga.

También se debe tener una válvula de vaciado de carcasa, con el fin de eliminar los restos de agua que puedan quedar antes de la realización de una operación de mantenimiento.

Una vez que se tienen las piezas se procede al montaje. En principio la unión de los álabes se puede realizar de dos formas diferentes.

Se puede optar por la soldadura directa de los álabes a la placa lateral. Ello lleva asociada la necesidad de plantillas para facilitar el correcto posicionamiento. A la vez, será necesario el uso de aparejos que proporcionen la sujeción en forma alineada de las piezas durante la soldadura. Se puede reducir en gran medida esta dificultad de montaje realizando ranuras o bien muescas en las placas laterales en las que encajen los álabes. Ello lleva un mayor esfuerzo en la preparación y creación de dichas ranuras curvas, pero es compensado por facilitar los registros de las piezas durante el montaje y soldadura. En el caso de que se opte por realizar ranuras, la soldadura puede ser externa, facilitando mucho el montaje.

Antes de proceder a la soldadura se ha de comprobar que los álabes no estén deformados, y una vez encajados en las placas, comprobar la perpendicularidad mediante una escuadra.

Tras el montaje se debe proceder al equilibrado de la turbina. Se colocan los soportes de giro con los rodamientos y cojinetes, tal y como quedaría el montaje final y se procede a girar manualmente la turbina dejándola deslizar. Si existe un defecto en el equilibrado, se irá parando, y al final habrá un vaivén, un balanceo.

Con el fin de asegurar si realmente está desequilibrado, se ha de repetir varias veces la prueba, marcando el lugar final en el que queda estacionada la rueda.

La parte que queda inferior está más cargada que la superior. Para equilibrar se debe añadir masa en la placa lateral en la parte que quedó arriba. Por medio de imanes de diferentes tamaños se puede aproximar de forma muy cómoda la cantidad de masa a añadir. Posteriormente sólo será necesario pesar los imanes añadidos y soldar ese mismo peso a las placas.

Con esto se soluciona el equilibrado estático. El equilibrado dinámico, no se puede realizar sin equipamiento adecuado, por lo que se deberá trabajar en forma experimental.

### 3.6.7 Cálculos para la fabricación

Una vez presentado el método de fabricación, se deben determinar los tamaños de cada elemento con el fin de satisfacer una determinada demanda. De aquí en adelante se describe una propuesta concreta de realización con los cálculos pertinentes de dimensiones. Para el diseño se recomienda utilizar una turbina de **30 cm de diámetro exterior** ya que este diámetro resulta adecuado para la mayoría de saltos.

Si se expresa la altura del salto (H) y el diámetro exterior (DR) en metros, la velocidad de rotación en r.p.m. de la turbina (n) viene dada por la siguiente expresión:

$$n = 39 \frac{\sqrt{H}}{DR} \quad (3.19)$$

Se debe recordar que este parámetro ya fue descrito en el de diseño de la microturbina descrito anteriormente, pero es necesario analizarlo nuevamente ya que esta ecuación solo funciona para el proceso de fabricación anterior.

Podemos hacer la multiplicación hacia el generador, que aproximadamente debe girar a 1500 rpm (según se determine dependiendo del tipo de generador) por medio de correas trapezoidales, una caja de cambios de moto, etc.

El ancho de la turbina (b) se determinará en función de las rpm calculadas, el caudal Q en m<sup>3</sup>/seg (1 m<sup>3</sup> = 1000 litros) y la altura H en metros, según la siguiente fórmula:

$$b = \frac{0.036 * n * Q}{H} \quad (3.20)$$

Para casos de pequeña potencia (1 o 2 kW) el rotor se puede construir con placas laterales de 3 mm de espesor, con cubos de refuerzo para el eje unidos mediante soldadura. El rotor lleva de 18 a 24 álabes también de 3 mm de espesor.

Los álabes de esta turbina se pueden fabricar con tubos de acero de 10 cms de diámetro, teniendo cada uno una sección de 72° como fue indicado anteriormente.

### 3.6.8 Instalación

A continuación en la figura 3.22 se presentan dos posibilidades de instalación para la toma de agua cuando se tiene una altura muy baja:

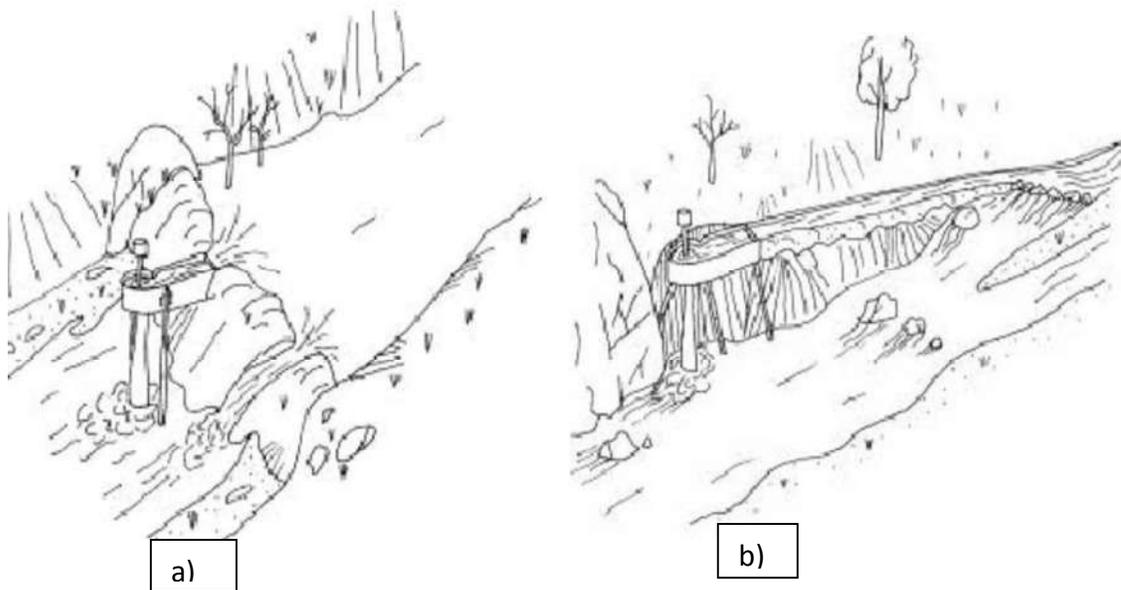


Figura 3.22 a).-Instalación con una pequeña represa: b).-Instalación con canal lateral

En el caso de mayores alturas de salto, es conveniente derivar el agua mediante una tubería forzada.

La forma de instalación de la turbina puede adoptar dos disposiciones: Entrada horizontal de agua o entrada vertical del agua tal y como se muestra en la figura 3.22.

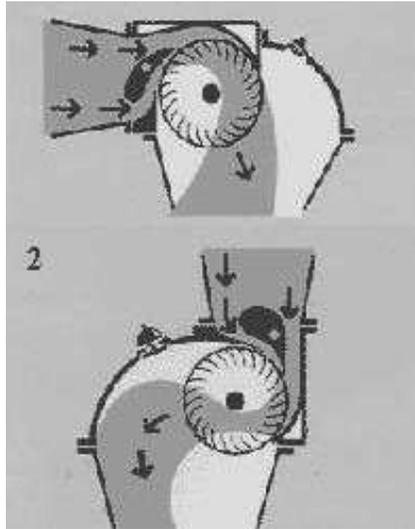


Figura 3.23 Turbina con entrada horizontal (posterior) y vertical (inferior).

### 3.7 Descripción general del equipo electromecánico auxiliar

El equipo de hidrogenación consta de una Turbina Hidráulica acoplada a un generador, un regulador de velocidad (electrónico de carga o mecánico de caudal), equipos de protección, señalización y otros instrumentos que conforman el tablero de control.

El equipo electromecánico de una MCH se diseña y se construye para los parámetros de caudal y altura de caída de diseño del proyecto y consta de siete partes importantes de entre las cuales se incluye la turbina que ya anteriormente se modeló y se pondrá mayor interés en los demás dispositivos auxiliares:

1. Turbina Hidráulica
2. Acople Flexible
3. Generador Síncrono
4. Regulador de Velocidad
5. Tablero de Control
6. Chasis del Equipo.

En la figura 3.23 se muestra una micro-turbina de una mini-central hidroeléctrica en la cual se muestra los dispositivos auxiliares que posteriormente se analizarán con un poco más de detalle.



Figura 3.24 Turbina de una MCH con dispositivos auxiliares.

Las Turbinas, ya sean Banki u otras, vienen montadas en eje de acero cuyo diámetro va desde 50 a 100 mm de diámetro, descansan en dos o más rodamientos auto-alineantes de rodillos a rótula (cónicos) encamisados en chumaceras de alta velocidad. En la figura 3.24 y 3.25 se muestran este tipo de rodamientos y chumaceras ya mencionadas.

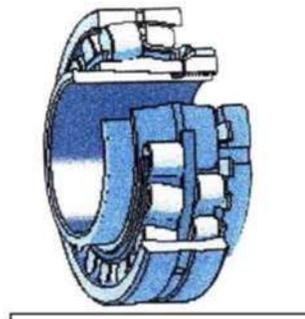


Figura 3.25 Rodamiento de rodillos a rótula SKF.



Figura 3.26 Chumacera de rodamiento de rodillos a rótula

Generalmente los rodamientos son las primeras piezas de cambio de un equipo nuevo. El cambio de rodamientos obedece a desgaste normal que se produce en este tipo de equipos. Normalmente y en condiciones ideales los rodamientos tienen una vida útil de 2 a 3 años. La sustitución de los mismos se debe realizar por otros idénticos de acuerdo a sus características que deben ser conocidas o están detallados en los manuales del fabricante. Los rodamientos son estándar y de fácil adquisición en nuestro mercado, las marcas más conocidas son SKF, NT y KOYO.

### 3.7.1 Retenes

Para evitar las pérdidas de agua de la carcasa de la Turbina cuando se encuentra en funcionamiento, se tienen dispuestas trampas hidráulicas en ambos costados de la misma. Las trampas consisten en cavernas que contienen, cada una de ellas, dos y tres retenes respectivamente.

En el mercado existe una serie de retenes de diferentes fabricaciones y medidas, por lo cual, para el cambio de los mismos será necesario realizar dos cosas: extraer el reten dañado y utilizarlo para su compra o caso contrario, tomar sus medidas y principalmente del eje de la Turbina. En la figura 3.26 se muestra un tipo de reten que es fabricado a base de hule.



Figura 3.27 Retenes de goma.

### 3.7.2 Sistema de acoplamiento

El acople entre la Turbina y el generador debe ser siempre flexible como el mostrado en la figura 3.27, por cuanto en las puestas en marcha y en las paradas forzadas pueden producirse daños en ambos y se convierte en el sistema de transmisión de potencia mecánica entre el eje de la Turbina y el eje del generador, por lo que su alineamiento debe ser perfecto.



Figura 3.28 Vista de un acople flexible.

El acoplamiento en sí, puede ser de dos alternativas: la primera consiste en un acoplamiento directo, es decir que la Turbina gira a la velocidad requerida por el Generador, mientras que la segunda alternativa consiste en un acople mediante poleas y/o fajas de multiplicación de revoluciones. La segunda alternativa se las utiliza generalmente en Turbinas de bajas velocidades como es el caso de las Turbinas Banki y/o Hélice, en algunos casos también las Turbinas Pelton utilizan poleas.

### 3.7.3 Generador Síncrono

La transformación de la energía mecánica de rotación producida por la Turbina, es transmitida al generador o alternador, el cual transforma dicha energía en energía eléctrica. Los generadores son síncronos y generalmente giran a una velocidad de 1500 RPM y sólo pueden ser trifásicos. Los sistemas con generadores monofásicos (220V) son de pequeñas potencias hasta 15 kVA, mientras que los sistemas más grandes necesariamente son sistemas trifásicos (220/380V). Los generadores modernos no cuentan con las tradicionales escobillas (con carbones), los que han sido sustituidos por excitatrices electrónicos o reguladores de voltaje de los generadores. En la figura 3.28 se muestra un generador síncrono de 200KVA, de fabricante Negrini comúnmente utilizado en MCH.



Figura 3.29 Vista de un generador síncrono Negrini de 200KVA

El generador puede ir montado sobre el mismo chasis de la Turbina o en forma separada, anclado por medio de pernos de alto rendimiento y sus dimensiones así como su capacidad no le permiten sobrecalentarse ya que cuenta con un sistema de refrigeración por aire, muy eficiente. No obstante ello, es importante una buena ventilación en la casa de maquinas durante la operación del equipo.

### 3.7.4 Volante de inercia

Para un funcionamiento estable del sistema de generación y previniendo el accionamiento de motores de gran capacidad, se requiere de cierta inercia rotacional adicional en el equipo electromecánico al momento del arranque de dichos equipos y por lo

tanto la masa del volante de inercia evita el “frenado del equipo” y por el contrario coopera con el arranque de dichos motores o equipos de gran consumo.

El volante de inercia como el que se muestra en la figura 3.29, se encuentra montado sobre el eje de la Turbina con prisioneros y una cuña de seguridad. Por el elevado peso del mismo, su operación debe ser muy cuidadosa a fin de evitar daños personales.

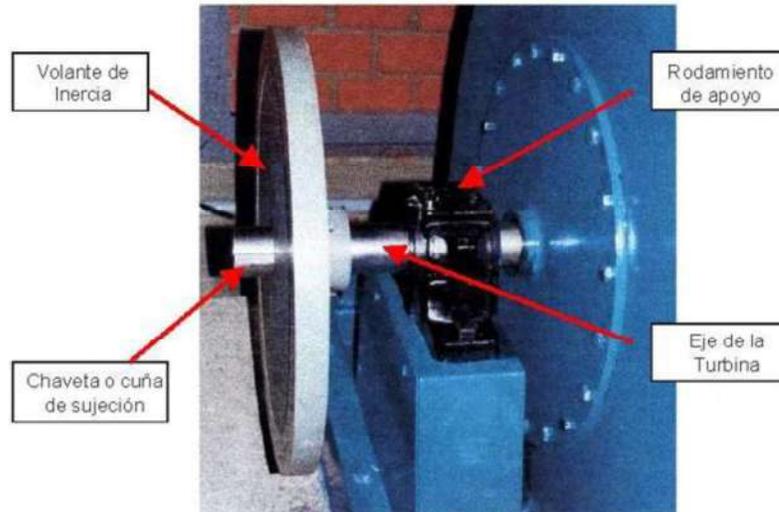


Figura 3.30 Volante de inercia.

### 3.7.5 Reguladores de velocidad

El regulador de velocidad tiene por objetivo regular la velocidad de giro del Generador para que este no se “embale” ante la demanda o carga variable de los usuarios de energía eléctrica que apagan o encienden sus equipos eléctricos. Existen dos tipos de reguladores de velocidad con ventajas y desventajas, pero que ambos funcionan de manera diferente. Uno es mecánico, es decir que ante el cambio de demanda de energía eléctrica, abre y cierra el ingreso de caudal permitiendo el paso del agua en la cantidad necesaria hacia la turbina. Mientras que el otro sistema, genera potencia constante todo el tiempo y su controlador electrónico de carga envía la energía excedente a un dissipador de energía.

#### 3.7.5.1 Regulación de velocidad con controlador electrónico de carga

El objetivo del sistema del controlador electrónico de carga es mantener constante la velocidad de la Turbina, mantiene una alta calidad de suministro de poder de corriente CA,

controla las fluctuaciones de frecuencia y voltaje e indica si el generador se encuentra en sobre velocidad o baja velocidad. Esto se logra mediante la conexión y desconexión de las resistencias del banco de disipación de energía.

Los controladores como los que se muestran en la figura 3.30 pueden ser requeridos para la potencia instalada de una MCH y por ende de sus características dependerá que las unidades trabajen con holgura sin sobrecarga y principalmente se evite el sobrecalentamiento de su estructura.

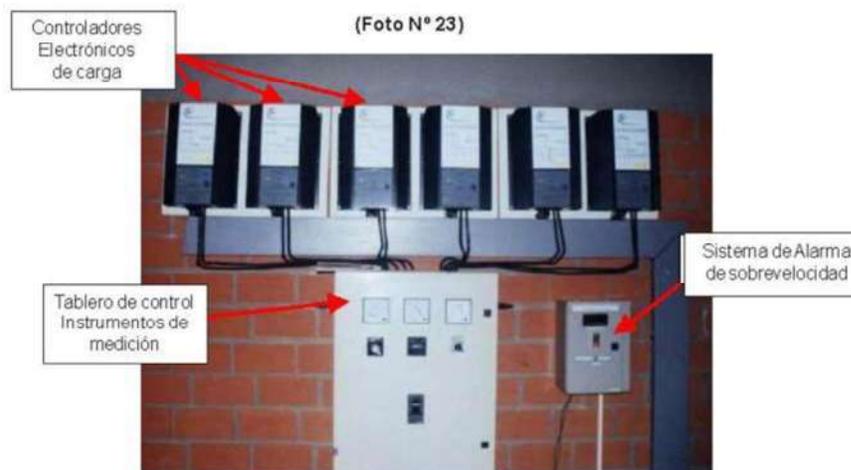


Figura 3.31 Vista de controladores electrónicos de carga, del tablero de carga y del sistema de alarma.

### 3.7.5.2 Regulación de velocidad por medio del caudal de agua

Este sistema mantiene la velocidad constante del grupo generador, regulando la cantidad de agua que ingresa a la Turbina, si hay un aumento de la demanda, se abrirá la válvula permitiendo mayor ingreso del agua a la Turbina ocasionando que la potencia generada se iguale a la demanda.

Esta regulación puede hacerse manualmente o automáticamente. La primera se la utiliza en Microcentrales Hidroeléctricas de potencias bajas, ya que su costo inicial es bajo y requiere un operador permanente en la Casa de Máquinas. La regulación automática se emplea cuando se prevé que existirán grandes variaciones en la demanda, por su costo elevado este sistema es más apropiado en centrales de más de 100 kW de potencia.

## Capítulo 4

# Proyecto de generación

### 4.1 Hidrografía del Estado de Michoacán (Recurso)

En el estado de Michoacán se presenta una red fluvial de mucha consideración, que tiene como arterias principales a dos grandes ríos del país, el Lerma y el Balsas; por otra parte los ríos de la región de Arteaga y Coahuila no tienen ninguno principal, pues desembocan directamente en el Océano Pacífico y por último la pequeña red interna representada por los Lagos de Cuitzeo, Pátzcuaro y Zirahuén.

Tres grandes sistemas hidrográficos denominados por su posición geográfica del Norte, Centro y Sur, además del sistema fluvial costanero, son los que se encuentran en la entidad.

#### 4.1.1 Sistema del Norte

Cuenca del Lerma, incluye al importante río Lerma que nace en el Estado de México, atravesando el territorio michoacano en su porción nororiental, con una dirección de noreste a suroeste; en esta parte se encuentra la Presa Tepuxtepec con una capacidad de 371 millones de metros cúbicos.

Los afluentes del Lerma se localizan abajo de dicha presa, siendo los principales los ríos Tlalpujahuá, Cachiví y Duero, este último considerado como el tributario más importante en la margen izquierda del Lerma, y sus afluentes desembocan finalmente en el Lago de Chapala en su extremo noreste.

La Cuenca de Cuitzeo, ocupa una superficie dentro del Estado de 3,618 kilómetros cuadrados, teniendo como principales afluentes los ríos Grande de Morelia y Queréndaro, que recibe los aportes de los ríos de San Lucas y Zinapécuaro, nace en la Sierra de Oztumatlán siguiendo su curso una dirección de sur a norte. Ambos desembocan en el Lago de Cuitzeo, considerado como el más grande en el estado. El Lago de Chapala ocupa sólo

una porción en el estado, la parte Sureste del lago, con aproximadamente 125 kilómetros cuadrados, recibe aportes de los ríos Duero y Lerma.

#### **4.1.2 El Sistema del Centro**

Está representado por los Lagos de Pátzcuaro y Zirahuén, el primero ocupa una superficie de 1,525 kilómetros cuadrados aproximadamente, comprendiendo los municipios de Erongarícuaro, Pátzcuaro, Quiroga y Tzintzuntzan. La cuenca que da origen al Lago se alimenta de numerosas corrientes tanto superficiales como subterráneas. Entre las primeras se destacan las de los ríos San Gregorio y Chapultepec, así como los arroyos de Santa Fe y Soto. En el interior del lago se levantan los islotes denominados Janitzio, Yunuén, La Pacanda, Tecuén, Jarácuaro, Urandén y Carián.

El Lago de Zirahuén, una cuenca de 615 kilómetros cuadrados, recibe los aportes de los arroyos Manzanilla y Zinamba, los cuales nacen en el municipio de Santa Clara del Cobre.

Tanto el Lago de Pátzcuaro como el de Zirahuén, localizados en la región centro - norte del estado, en una de las partes más altas del Eje Volcánico Transversal, constituyen los centros de mayor atracción turística de la entidad, siendo la actividad pesquera una de las más importantes.

#### **4.1.3 El Sistema del Sur**

Se sitúan la mayoría de los ríos y arroyos del estado. Es el río Balsas el más importante, el cual junto con sus numerosos afluentes ocupa una superficie de 32,950 kilómetros cuadrados. Los afluentes que en Michoacán recibe el Balsas son los ríos Cutzamala, Carácuaro y Tepalcatepec.

El río Cutzamala se une al Balsas por su margen derecha, siendo sus formadores principales los ríos Tuzantla y Tilostoc. El Río Carácuaro (5,300 kilómetros cuadrados de superficie) que corre en una dirección de norte a sur, recibe los aportes de varios ríos y arroyos, entre los que destacan los arroyos de Inguarán, Las Truchas y Los Limones, así como los ríos de Pedernales y Puruarán.

El río Tepalcatepec o Grande, considerado de mayor extensión en la cuenca del Balsas, tiene una superficie de 18,000 kilómetros cuadrados y su origen en el estado de Jalisco, en donde recibe el nombre de Quitupan, correspondiendo a Michoacán una superficie de 15,120 kilómetros cuadrados. Ingresa al estado por el municipio de Tangamandapio, corriendo en dirección noroeste a Sureste. El principal afluente del Tepalcatepec es el Río Marqués, que se origina en Uruapan en el manantial denominado “Rodilla del Diablo”, recibiendo el nombre de Cupatitzio, atravesando los terrenos de las municipalidades de Uruapan, Parácuaro y La Huacana y que afluye al Tepalcatepec en jurisdicción de este último municipio.

La importancia del río Tepalcatepec se da desde el punto de vista agrícola, por que en su curso cruza el Plan de Tierra Caliente, zona eminentemente agrícola; además de ello, su importancia como fuente generadora de electricidad queda manifiesta por la construcción de varias presas entre las que destacan las del Cóbano, Zumpimito, Taretan, Salto Escondido y la del Infiernillo, considerada como una de las más importantes de Latinoamérica, con una capacidad de 12,500 millones de metros cúbicos de agua, que es utilizada en la generación de energía eléctrica y el riego.

En el sistema fluvial costero del estado, las corrientes fluviales que por ella drenan quedan enmarcadas dentro de la vertiente sur de la Sierra Madre del Sur, contándose entre las más importantes las de los ríos Coahuayana, Aquila, Ostula, Motín del Oro, Coire, Cachán y Nexpa. La cuenca del río Coahuayana comprende los estados de Colima, Jalisco y Michoacán, abarcando en este último los municipios de Coalcomán y Chinicuila. Tiene una extensión superficial de 1,260 kilómetros cuadrados, sus tributarios más importantes son el río Becerra y el arroyo Agua Fría; la desembocadura se ubica en la Bahía de San Telmo en la Boca de Apiza.

El río Aquila abarca parte de los municipios de Aquila, Coalcomán y Chinicuila, su cuenca cubre una superficie de 2,070 kilómetros cuadrados, se forma en la unión de los ríos Palo Dulce y Guayaba.

El río Ostula conforma una de las cuencas más pequeñas de la entidad, tiene aproximadamente 572 kilómetros cuadrados, quedando comprendida entre los municipios

de Aquila y Coalcomán. Lo forman los arroyos de la Cofradía y la Mina, corriendo en una dirección de norte a sur; desemboca en el Océano Pacífico.

El río Motín del Oro, de corto curso, tiene como afluentes a los ríos Zilapa y Cacalula. La lista de ríos y arroyos que desembocan en el Océano Pacífico asciende a más de cincuenta. Todos se originan en la Sierra Madre del Sur y fluyen en una dirección general del norte a sur. Sus cuencas son de relieve accidentado, de manera que el aprovechamiento del agua para actividades agrícolas es de escasa importancia. En la figura 4.1 se muestra el potencial hidráulico para generación de energía eléctrica en el estado de Michoacán que tiene una capacidad actual instalada de 1448 MW. Además en el estado se espera instalar 1677MW de potencia que aun se encuentra en proyectos tanto en grandes como en pequeñas centrales, lo que nos habla que en Michoacán se aprovecha menos de la mitad del potencial hidráulico para generar energía eléctrica.

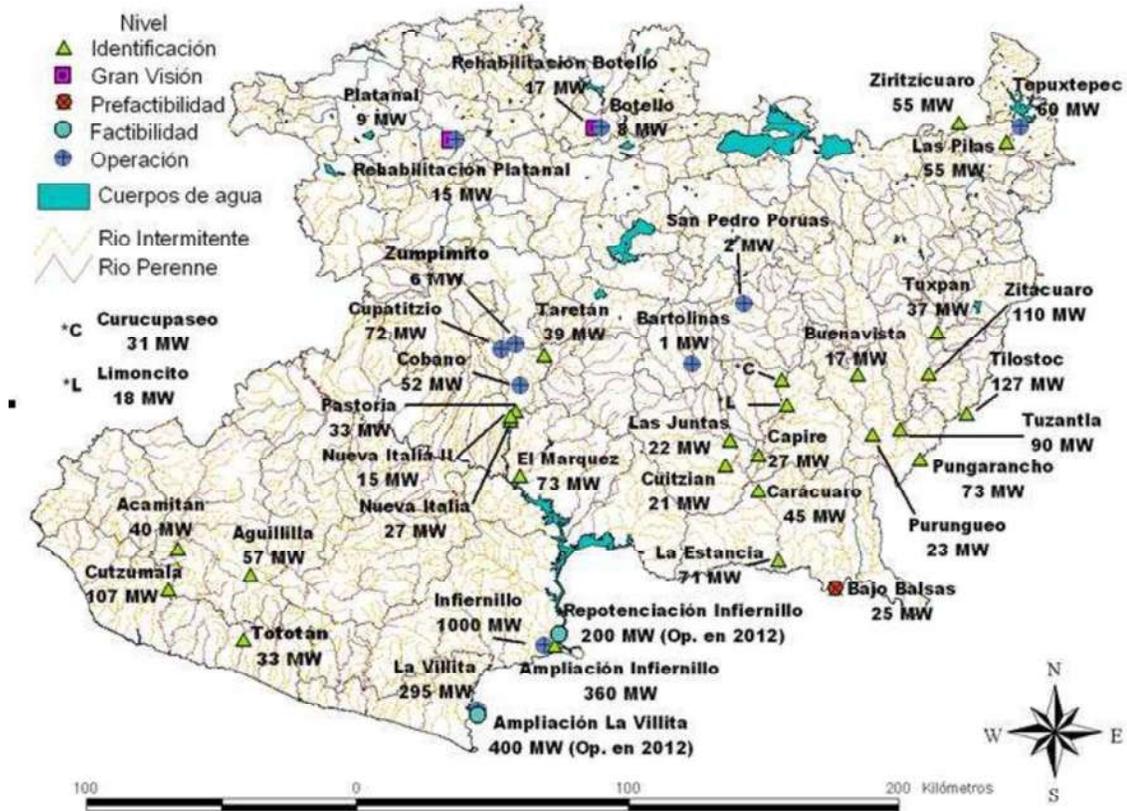


Figura 4.1 Potencial hidroeléctrico del estado de Michoacán.

Para proceder a la instalación de una central minihidráulica se tienen que seguir una serie de pautas que determinarán su viabilidad. A continuación se enumeran:

- Elección del lugar basándose en la disponibilidad del territorio y la accesibilidad al mismo, teniendo en cuenta que la accesibilidad es inversamente proporcional al impacto ambiental.
- Determinación del caudal de agua (litros/s) y el salto disponible (m) para poder determinar el cálculo de la potencia teórica de la que vamos a disponer, en todo caso menor de 10 MW.
- Tramitación de autorizaciones y permisos necesarios.
- Estudio de viabilidad económica de la instalación.
- Construcción e implementación.
- Gestión y mantenimiento efectivo, protegiendo las calidades ambientales del sistema fluvial.

## **4.2 Medición de la altura del salto**

Para llevar a cabo el proyecto de generación de una mini-central hidroeléctrica y determinar todos los parámetros de diseño de la micro-turbina hidráulica, se debe realizar la medición de los parámetros más importantes; la altura del salto y el caudal de agua que entra al inyector de la turbina. Primeramente se realizará la medición de la altura del salto. La altura del salto como ya se mencionó en el capítulo 3 es la diferencia de altura que existe entre el nivel de la superficie del agua y el nivel de la salida de agua de la turbina. Para nuestro caso se toma como altura del salto el desnivel que existe entre la cámara de carga y la salida del agua de la turbina (altura de la tubería de presión) ya que durante la conducción del agua por el canal, esta corre con muy poca velocidad y con muy poca presión, es decir la única altura aprovechable para generar energía eléctrica tratándose de pequeñas centrales es la altura que hay en la tubería de presión. Al momento de medir la altura por medio del método que se explicó en el capítulo 3 vemos que la altura del salto es de 20 metros.

### 4.3 Medición del caudal

Una vez medido la altura del salto se procede ahora a medir el caudal de operación con el que trabajara la mini-central hidroeléctrica. La obra de toma como ya se mencionó se realizará sin obra de recierre. El procedimiento para realizar la obra para la captación del agua es simplemente abrir un canal del río o arroyo e inundarlo ya que este listo. Para poder medir el caudal de operación de nuestra central es necesario medir el caudal de nuestro arroyo. Calculando el caudal del arroyo observamos si es viable instalar nuestra central en dicho arroyo. Si tenemos el caudal del ya mencionado arroyo ahora si podemos calcular el caudal de operación de nuestra central.

Empleamos el método del flotador para medir el caudal de nuestro arroyo el cual se muestra en la siguiente figura 4.2.



Figura 4.2 arroyo utilizado para la instalación de la central.

Primero con un cinta métrica medimos el ancho del arroyo de un extremo al otro. El resultado fue de 3 metros con 20 centímetros. Después se realizan la medición de la profundidad del cauce del arroyo en varios puntos de este y se obtuvieron los siguientes resultados;  $h_1=60\text{cm}$ ,  $h_2=62\text{cm}$ ,  $h_3=65\text{cm}$ ,  $h_4=66\text{cm}$  y  $h_5=75\text{cm}$ . Así mismo se midió una longitud de 10 metros y se obtuvo el tiempo que tardaba una botella en recorrer esta distancia y el tiempo fue de 15.96 segundos. Ya teniendo estos parámetros estamos listos para aplicar la ecuación (3.3) del capítulo anterior para calcular la sección transversal.

$$A(cm^2) = b(cm) \cdot \left[ \frac{h1 + h2 + h3 + \dots + hn}{n} \right] \quad (4.1)$$

Sustituyendo tenemos:

$$A(cm^2) = 320cm \cdot \left[ \frac{62cm + 65cm + 75cm + 66cm + 60cm}{5} \right] = 20992cm^2$$

Teniendo la sección transversal del arroyo podemos calcular ahora si el caudal por medio de la ecuación (3.4) vista en el capítulo anterior.

$$Q \left( \frac{lbs}{seg} \right) = \frac{0.75 * A(cm^2)}{t(seg)} \quad (4.2)$$

$$Q \left( \frac{lbs}{seg} \right) = \frac{0.75 * (20992cm^2)}{(15.97 seg)} = 986.466 \frac{lbs}{seg}$$

El caudal total del arroyo se obtuvo para poder observar si es viable extraer el caudal de operación de la central. El caudal de operación máximo de la micro-turbina como se muestra a continuación es de 240 lbs/seg, entonces observamos que si es posible utilizarlo para obtener el caudal de operación de nuestra micro-turbina.

La medición del caudal no es constante en todo el año ya que hay estaciones en que es más abundante el agua y en otras en que es muy escasa, debido a esto debemos considerar el mínimo caudal con el que trabajará la turbina durante el periodo de tiempo en que el caudal es muy poco. Teniendo en cuenta que el máximo es de 240 lbs/seg consideraremos que el mínimo caudal será de 180 lbs/seg.

#### **4.4 Compromiso costo / calidad / sustentabilidad**

Antes de ingresar en el estudio y selección de las tecnologías y criterios de diseño que proponemos utilizar en el proyecto, es necesario: a) definir el compromiso entre costo y calidad del suministro eléctrico que los usuarios y la comunidad están dispuestos a aceptar. En relación con los costos, la solución técnica debe reducirlos al mínimo compatible con un abastecimiento continuo, dentro de los criterios de suministro adoptado por el proyecto. Estos criterios suelen referirse al tipo de servicios desde el continuo de 24 horas, a servicios interrumpibles con sólo 6 horas por día (servicio nocturno) y a los tiempos máximos de

interrupciones que pueden admitirse, originados por escasez del recurso hídrico, o bien por contingencias electromecánicas o electromagnéticas.

Tanto los tiempos de interrupción aceptables como las variaciones de tensión y frecuencia permitidas en estos pequeños sistemas, son menos rigurosos que para los sistemas eléctricos de alta concentración de demanda.

Pretender estándares de calidad altos implicaría proyectos con tecnología sofisticada, con fuerte impacto en los costos tanto de inversión como de operación y mantenimiento.

Por otra parte los requerimientos eléctricos de la comunidad receptora de este tipo de proyecto corresponden al uso de artefactos y equipos y al desarrollo de actividades que no necesitan altos estándares de calidad de servicio.

El principal salto cualitativo que percibe esta comunidad, es la diferencia entre contar y no contar con electricidad. Si su evolución socioeconómica le permite acceder a equipamientos electrodomésticos o productivos sofisticados, seguramente contará también con ingresos suficientes para invertir en la mejora de calidad que requieran.

En relación con la sustentabilidad, la localización de los proyectos en las áreas alejadas de los centros más desarrollados requiere de tecnologías sencillas que puedan atenderse localmente tanto en lo referido a operación, como a reparación o reposición de componentes y partes de equipos e instalaciones.

No obstante la decisión final sobre criterios de diseño técnico de los proyectos dependerá de la figura institucional que se adopte para operar y mantener los sistemas.

#### **4.5 Obra de toma (Captación del agua del río)**

La obra de toma tiene por objetivo captar el caudal de diseño del río y permitir su ingreso en el sistema de aducción para su conducción hacia el Desarenador/Cámara de Carga.

La captación de agua en un río o arroyo debe considerar principios básicos asociados a la calidad del agua que se deriva a la micro central y a la seguridad de las obras que se ejecutan en el cauce natural.

La calidad del agua debe asegurarse mediante la separación de piedras, ramas u otros objetos que, de ingresar a las obras de conducción, obstruirán el flujo de agua y en caso de llegar hasta la turbina provocarán daños severos e interrupción del servicio.

Debe también asegurarse la separación de arenas u otras partículas sólidas que por su tamaño provoquen erosión en los ductos y en la tubería, reduciendo su vida útil.

La selección del lugar para ejecutar las obras de toma de agua requiere considerar el comportamiento de la carga de sólidos en suspensión en el flujo de agua. En tramos rectos de los arroyos el flujo es uniforme y en su parte alta contiene menor cantidad de sólidos en suspensión en el flujo de agua.

El lugar adecuado de nuestro río para realizar la captación del agua se encuentra en un tramo recto del arroyo y conviene ejecutar una toma frontal, en este caso, la proporción de sólidos en el agua que ingresa a la toma será la misma que la media del arroyo.

Como nuestro caudal de instalación es inferior al mínimo caudal del arroyo se procede a realizar la captación del agua sin obra de recierre. Son obras muy sencillas realizadas en el curso del arroyo o sobre una de sus márgenes que permiten inundar una cámara de carga a través de una reja.

En la figura 4.3 se muestra una toma del tipo tirolés para instalar en el lecho del río.

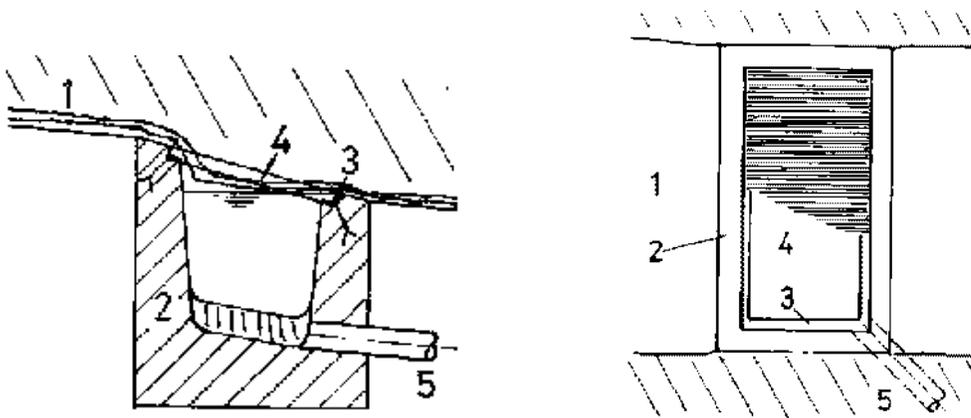


Figura 4.3 Obra de captación del arroyo 1. Lecho del río 2. Cámara de captación (de hormigón o de mampostería de piedra). El piso es inclinado hacia el tubo de salida. 3. Marco metálico anclado al borde de la cámara 4. Reja de planchuelas con cierre perimetral. La separación entre planchuelas es de 6 a 12 mm. La pendiente de la reja en la dirección del flujo es de 15° como mínimo. 5. Tubo de descarga a la cámara de carga y desarenador.

## 4.6 Obra de Conducción

Las obras de conducción comienzan en la toma de agua construida sobre el arroyo o el embalse y terminan en el ingreso del agua a la sala de máquinas.

En el caso más general están integradas por tres componentes que son: i) canales a cielo abierto o ductos cerrados a nivel, ii) una cámara de carga y iii) la tubería de presión.

La necesidad de reducir el importante efecto que este componente de las obras, sobre los costos totales, nos sugiere considerar las siguientes cuestiones:

- Estudiar cuidadosamente la localización de la toma de agua y de la sala de máquinas, de modo de alcanzar la máxima altura neta con el menor costo. Tal solución puede lograrse trazando canales a cielo abierto por líneas de nivel, que son de bajo costo para ubicar una cámara de carga y la tubería de presión y los lugares de fuerte pendiente, reduciendo su longitud y en consecuencia su fuente de incidencia en los costos.
- Realizar el estudio técnico económico previo de los distintos tipos de tuberías disponible en el mercado local (acero, Fibrocemento, PVC, Plástico Reforzado con Fibra de Vidrio, etc.) con el objeto de preseleccionar el de mayor conveniencia para la región.

### 4.6.1 Canal de conducción

El sistema de aducción tiene como finalidad conducir el caudal de diseño desde la toma hasta el Desarenador/Cámara de Carga.

Los canales a cielo abierto constituyen una solución muy ventajosa para reducir costos de tubería. No obstante deben estar adecuadamente diseñados para evitar mayores costos de mantenimiento.

El diseño del canal debe resolver un correcto escurrimiento del agua sin perder innecesariamente altura útil en el proyecto. Para ello se recomienda ejecutar el canal con una pendiente de 1/1000. Los canales se construyen con sección trapezoidal pero para facilitar la construcción del canal de nuestro proyecto en este caso se va a construir en forma rectangular y de esta manera optimizar tiempo y costos para su elaboración. En la figura 4.4 se muestra un canal en forma rectangular.

Ejecutada la excavación del canal, el método convencional de impermeabilizado es el recubrimiento de concreto. Si este recubrimiento se ejecuta con encofrado tradicional, el espesor necesario para el escurrimiento y compactación del hormigón alcanza a 4" (pulgadas).

El canal conducirá el agua hasta la cámara de carga y al desarenador una distancia total de 320 metros y tendrá una capacidad de conducción de 0.6 m<sup>3</sup>/s y estará completamente revestido de concreto.



Figura 4.4 Canal en forma rectangular de hormigón.

#### **4.6.2 Cámara de carga y desarenador**

Al final del sistema de aducción se encuentra el desarenador y la cámara de carga. El desarenador tiene por objetivo sedimentar las partículas finas que hayan logrado pasar a través del sistema de aducción y que pueden producir desgaste por abrasión en los alabes de la turbina y las paredes de la tubería de presión reduciendo de gran manera su vida útil. Junto al desarenador se encuentra la Cámara de Carga, de donde sale la Tubería de Presión hacia la Casa de Máquinas. La Cámara de Carga cuenta con una rejilla móvil que cubre su superficie y evita el ingreso de objetos que obstruyan el flujo de agua hacia la Turbina. En la figura 4.5 se muestra una rejilla que esta deteniendo partículas solidas y basura.



Figura 4.5 Rejilla móvil protectora.

Es necesario para aquietar el agua y permitir la decantación de arenas y partículas sólidas. La cámara de carga debe tener dimensiones adecuadas para cumplir esta función y estará constituida en hormigón o mampostería de piedra. Las medidas de la cámara de carga para el proyecto de generación que se está realizando es de 1.25m en la sección por donde ingresa el agua del canal y de 1.5 m en las caras laterales, y tiene 2 metros de altura. Tiene básicamente cuatro vías de movimiento de fluido. La primera es la acometida por donde ingresa el canal o ducto que trae el agua desde la toma. La segunda es un vertedero o tubo para eliminar los excedentes de caudal que no serán turbinados. La tercera es un descargador de fondo que permitirá el vaciado y limpieza de partículas sedimentadas. La cuarta es la alimentación mediante malla de filtrado o rejillas a la tubería de presión que conduce el agua a la turbina. Todos estos componentes se muestran en la figura 4.6.



Figura 4.6 Cámara de carga.

### 4.6.3 Tubería de presión

La selección de la tubería más conveniente requiere como primer paso determinar el diámetro de la misma y la presión de trabajo que deberá soportar. Estos parámetros y las condiciones de suministro local de materiales y tubos prefabricados y sus costos determinarán la solución más conveniente. Para una misma potencia instalada, las combinaciones caudal / altura del aprovechamiento indican si se requiere mayor diámetro (Q) y menor presión de trabajo (H) o viceversa.

Conocido el caudal de instalación la sección de tubería dependerá de la velocidad máxima admisible para el agua que circula en su interior. Esta velocidad máxima a su vez depende de la pérdida de altura que pueda admitir el proyecto.

Es deseable seleccionar velocidades que no introduzcan pérdidas mayores al 2% o 3%. No obstante si el recurso hídrico es abundante se debe encontrar la solución que minimice costos, atendiendo a los diámetros comerciales de plaza, aunque las pérdidas sean mayores (5%-10%).

Para un caudal de instalación determinado la velocidad que corresponde a un nivel de pérdidas prefijado depende a su vez del material (rugosidad) y del diámetro de la tubería.

A modo de ejemplo se muestra la tabla 4.1 de relación entre velocidad y diámetro para un tubo de polietileno de alta densidad.

Tabla 4.1 Relación entre velocidad y diámetro de la tubería.

Tubos de Polietileno (presión nominal 10at.)				
Diámetro exterior [mm]	Diámetro interior [mm]	Velocidad del agua [m/s]	Caudal Q [lt/s]	Potencia para altura Neta 100m [kW]
32	26.2	0.6	0.3	0.2
40	32.6	0.7	0.6	0.4
50	40.8	0.8	1.0	0.7
63	51.4	0.9	1.8	1.3
75	61.4	1.0	3.0	2.1
90	73.6	1.2	5.1	3.6
110	90.0	1.4	8.9	6.2
125	102.2	1.5	12.3	8.6
140	114.6	1.6	16.5	12
160	130.8	1.8	24	17
180	147.2	2.0	34	24
200	163.6	2.1	44	31
225	184.0	2.3	61	43
250	204.6	2.4	79	55

La mejor alternativa de reducción de costos, aplicable a las microcentrales hidroeléctricas, es la tubería de PVC de alta presión. En la práctica esta alternativa se viene utilizando hasta alturas de 150 metros de columna de agua con solo PVC y alturas mayores haciendo combinación de acero en la parte inferior y PVC. Esto permite reducir costos a la tercera parte de su equivalente usando acero; pero no sólo es el costo, pues entre otras ventajas del PVC está su mejor eficiencia de conducción (menores pérdidas por fricción), su menor peso y su simplicidad para ensamblarlas.

De acuerdo a lo anterior y tomando en cuenta los costos de nuestra central se utilizarán tubos de PVC, con anclajes de hormigón para dar soporte y estos se instalarán cada 5 metros de longitud. La longitud total de la tubería de presión es de 26 metros desde la cámara de carga hasta la entrada a la turbina. El calibre de la tubería de PVC será de 12” de diámetro, esto debido a que es bastante comercial y no produce pérdidas considerables.

En la figura 4.7 se muestra la tubería de presión de una central hidroeléctrica que lleva un caudal de 406 lts/seg y tiene un diámetro de 55cm.



Figura 4.7 Tubería de presión de 55cm de diámetro.

El diseño de la tubería de presión debe considerar eventuales sobrepresiones por golpe de ariete. Estas sobrepresiones se originan por el cambio brusco de energía cinética a potencial que se produce cuando se cierra bruscamente la circulación de agua de la tubería (cierre intempestivo del regulador de caudal de la tubería). Esta situación genera una onda de presión que viaja aguas arriba a la velocidad del sonido y que puede, en situaciones extremas, ser varias veces superior a la presión de diseño.

#### **4.6.4 Válvulas de compuerta**

Este tipo de válvulas son utilizadas en todas las centrales hidroeléctricas especialmente como aditamentos de emergencia y de seguridad en el area final de la tubería de presión, necesitan de desvíos o by-pass, ahora se prefieren las válvulas de mariposa.

Constan de una caja con un disco grueso colocado verticalmente sobre unas guías laterales y su cuerpo está soldado a un eje con tornillo sin fin. La válvula de compuerta es maniobrada por medio de una corona movida por un motor de corriente directa, su accionamiento está a control remoto desde los tableros de la central, aunque también se puede hacer localmente en forma manual.

## 4.7 Casa de máquinas

Esta constituida por una sala de dimensiones reducidas, construida en mampostería o algún otro tipo de material, en donde se aloja el equipamiento que realiza las conversiones de energía hidráulica a mecánica y de mecánica a eléctrica. Por debajo de la misma cuenta con el canal de desfogue que se encarga de restituir las aguas al río. En la figura 4.8 se muestra una casa de máquinas con su respectivo canal de desfogue, construida con tabique y concreto.

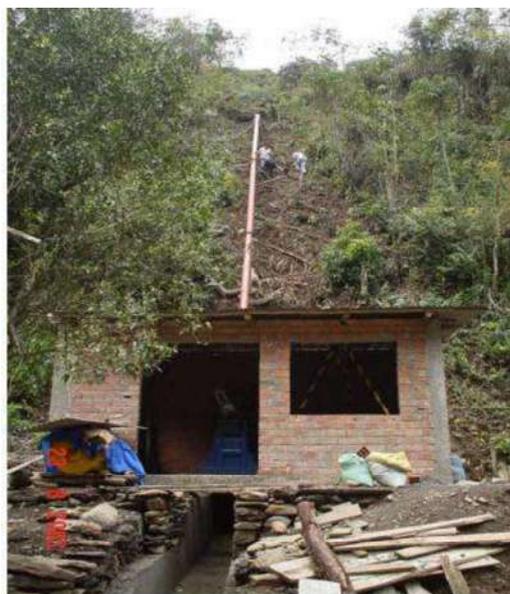


Figura 4.8 Casa de máquinas.

El producto “energía eléctrica” resultante del proceso de conversión, tiene requisitos de calidad técnica que deben ser satisfechos. Tales requisitos se expresan en valores de tensión y de frecuencia que deben ser mantenidos dentro de un rango de tolerancia admitido.

Es además conocido que este producto (energía eléctrica) debe entregarse en forma instantánea al usuario o consumidor y que este varía su demanda casi en forma permanente a lo largo del tiempo.

Por su parte la energía hidráulica que ingresa por la tubería de presión a la sala de maquinas, lo hace en forma de energía cinética del agua y las cantidades de energía puestas en juego (oferta hidráulica) dependen del caudal y de la altura de la carga.

Esta energía cinética del agua se convierte en energía mecánica en el eje de una turbina. La energía mecánica es transferida a un generador eléctrico que, para mantener las condiciones de calidad exigidos al producto eléctrico, debe rotar a velocidad constante.

Para producir esta transferencia de energía es necesario entonces, además de la turbina y el generador, agregar dispositivos de conversión de velocidad de rotación entre el eje de la turbina y el del generador, y un sistema de regulación para adaptar la potencia hidráulica que se entrega con la potencia eléctrica que se demanda.

El equipamiento electromecánico constituido por turbina, generador, convertidor de velocidad y sistema de regulación, se complementa con la instalación eléctrica de salida de la sala de máquina y un tablero de control con registros de tensión, frecuencia y energía suministrada a la red.

Si bien la obra civil de cierre de la sala de máquinas es muy sencilla, debe prestarse adecuada atención al pozo de descarga del agua turbinada y al dimensionamiento y ejecución de las fundaciones que aseguran la estabilidad de la sala durante las máximas crecidas.

#### **4.7.1 Casa de máquinas de la central**

La casa de máquinas del proyecto estará fabricada de mampostería de piedra para reducir costos y el techo de dicha casa será de madera con láminas de asbesto. Las medidas de la casa serán de 4 metros de largo y 3 metros de ancho, con su respectiva puerta y una ventana para la ventilación de los equipos.

La casa de máquinas un cubo de desfogue que sirve para descargar el agua que ha trabajado en la turbina (agua turbinada) hasta el cauce del río aguas abajo, también permite que el nivel de aguas abajo esté un poco más abajo que el plano horizontal de la turbina.

En la figura 4.9 se muestra el esquema general de una mini-central hidroeléctrica donde se observa todos los componentes que se diseñaron anteriormente.

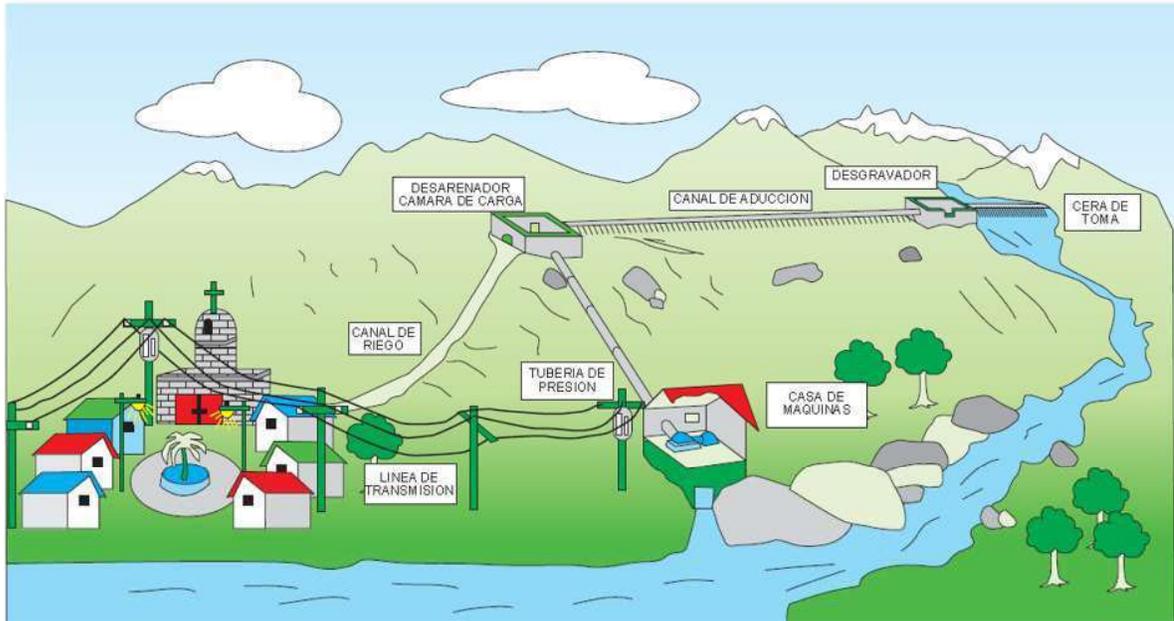


Figura 4.9 Mini-central hidroeléctrica

#### 4.8 Diseño de la turbina Michell-Banki

En este proyecto se propone utilizar una micro-turbina del tipo Michell-Banki ya que es la más apropiada y es la que se adapta mejor de acuerdo a los estudios realizados con anterioridad sobre el caudal y la altura del salto, es decir para medianos caudales y para una altura mediana. La tabla 4.2 muestra las potencias y necesidades de agua para las turbinas más utilizadas en micro-centrales hidroeléctricas y en la cual nos basamos para seleccionar la micro-turbina Michell-Banki.

Tabla 4.2 Datos de altura y caudal para diferentes tipos de turbinas (solo referenciales)

Potencia	Tipo de turbina		
	Pelton	Mitchel Banki	Axial
0.2 kW	H = 20 m, Q = 2,5 l/s	H = 8 m, Q = 6,25 l/s	H = 3 m, Q = 17 l/s
	H = 15 m, Q = 3,3 l/s	H = 5 m, Q = 10 l/s	H = 2 m, Q = 25 l/s
1.0 kW	H = 40 m, Q = 6,25 l/s	H = 15 m, Q = 16,7 l/s	H = 4 m, Q = 62,5 l/s
	H = 30 m, Q = 8,3 l/s	H = 10 m, Q = 25 l/s	H = 3 m, Q = 83,3 l/s
5 kW	H = 50 m, Q = 20 l/s	H = 20m, Q = 50 l/s	H = 4 m, Q = 250 l/s
	H = 30 m, Q = 33,3 l/s	H = 15 m, Q = 66 l/s	H = 2 m, Q = 500 l/s
20kW	H = 50 m, Q = 72 l/s	H = 20 m, Q = 180 l/s	H = 5 m, Q = 720 l/s
	H = 40 m, Q = 90 l/s	H = 15 m, Q = 242 l/s	H = 3 m, Q = 1200 l/s
100kW	H = 100 m, Q = 150 l/s	H = 40 m, Q = 380 l/s	H = 8 m, Q = 1900 l/s
	H = 60 m, Q = 250 l/s	H = 30 m, Q = 512 l/s	H = 5 m, Q = 3000 l/s

### 4.8.1 Selección del diámetro

Una vez que obtuvimos la altura del salto y el caudal, calcularemos ahora los parámetros de diseño de la turbina ya que para determinar algunos de estos era necesario conocer la altura y el caudal.

Como se explicó en el capítulo anterior el diámetro del rodete de la turbina banki no depende del caudal y es un parámetro totalmente independiente, es decir que lo podemos seleccionar de acuerdo a nuestro criterio y a la bibliografía existente sobre este tipo de turbinas. En el capítulo 3 se vió que para pequeños aprovechamientos energéticos el diámetro se puede escoger entre el rango de 200mm y 500mm comúnmente.

De acuerdo con esto y tomando en cuenta que a mayor diámetro la velocidad de embalamiento es menor y que a diámetro más pequeño el rendimiento hidráulico disminuye seleccionamos un diámetro de 300mm. Con este dato trabajaremos para calcular los parámetros restantes.

Una vez seleccionado el diámetro de la turbina lo que sigue es calcular la velocidad de giro de la máquina hidráulica.

### 4.8.2 Calculo de la velocidad

La velocidad de giro de la turbina depende directamente de los parámetros de la altura y del diámetro anteriormente seleccionado, conociendo estos, procedemos a calcular la velocidad por medio de la ecuación (3.6) vista en el capítulo 3 que se muestra a continuación.

$$n = n_{11} * \frac{H^{1/2}}{D} \quad (4.3)$$

El dato  $n_{11}$  se obtiene por medio de pruebas de laboratorio y depende directamente del tipo de diseño de cada investigador y como consecuencia no son de aplicación general. Debido a esto se propone utilizar el valor de 39.7 para el diseño específico utilizado en la ciudad de Misiones en Argentina.

Teniendo este dato y como conocemos el diámetro y la altura del diseño, sustituimos y obtenemos:

$$n = 39.7 * \frac{(20 \text{ m})^{\frac{1}{2}}}{0.3\text{m}} = 592 \text{ rpm} \approx 600 \text{ rpm}$$

### 4.8.3 Número de álabes del rotor

Como se vió en el capítulo 3 la selección del número de álabes se realiza en base al diámetro y las condiciones de funcionamiento de la turbina, es decir, altura y caudal.

Como en la mayoría de los parámetros para lograr una mayor eficiencia y un mayor rendimiento del sistema es necesario determinarlos por medio de pruebas especializadas de laboratorio y no es la excepción con el número de álabes del rodete.

De acuerdo a varias investigaciones sobre la turbina Michell-Banki y tomando en cuenta el diámetro y el ancho del rodete de cada una de las turbinas estudiadas, el número óptimo de álabes en el rodete esta entre 24 y 30.

Debido a esto y tomando en cuenta el ancho y el diámetro del diseño de la turbina suponemos que el número óptimo de álabes con que cuenta el rodete es de 26.

### 4.8.4 Cálculo del ancho del rodete

Ya teniendo el parámetro del caudal de diseño el cual es de 390 lts/seg podemos calcular el ancho del rodete por medio de la siguiente ecuación vista en el capítulo anterior, la cual se muestra a continuación:

$$B = 0.259 \frac{Q}{Kc \cdot D \cdot Xz \cdot \sqrt{H}} \quad (4.4)$$

La altura neta de nuestro salto es de 20 metros y como ya habíamos mencionado el diámetro de el rodete de la turbina es de 30 centímetros.

El coeficiente Xz es la relación entre los álabes. Es decir es la relación entre los álabes de admisión (Za) y el número total de álabes (z) y está dada por la ecuación (3.11) del capítulo anterior que se muestra a continuación:

$$X = \frac{Za}{z} \quad (4.5)$$

Una vez conocidos el número total de alabes que es de 26 podemos determinar los alabes totales en la admisión (z), entonces la relación queda como se muestra a continuación:

El coeficiente Xz varía entre 0.05 y 0.35.

$$Xz = \frac{Za}{z} < 0.35 \quad (4.6)$$

Como ya se había mencionado anteriormente este parámetro se obtiene haciendo pruebas en laboratorio específicamente para un diseño pero para nuestro caso suponemos la relación entre los alabes de 0.1.

El coeficiente de velocidad del inyector de acuerdo también a pruebas de laboratorio sabemos que puede ser tomado entre varios valores que van desde 0.95 hasta 0.99, pero en varios proyectos e investigaciones el más comúnmente utilizado es de 0.967.

Tomando este valor y sustituyendo los demás parámetros que ya conocemos tenemos:

$$B = 0.259 \frac{240 \text{ lts/seg}}{0.967 * 0.3m * 0.1 * \sqrt{20 m}}$$

B=0.48 metros = 50 centímetros

#### 4.8.5 Características de la turbina

Las características de operación de la turbina utilizada en este proyecto se dan en la tabla 4.3.

Tabla 4.3 Características de la turbina.

<b>Marca</b>	Sin Marca
<b>Tipo</b>	Michell-Banki
<b>Eje</b>	Horizontal
<b>Caída neta de agua</b>	20 metros
<b>Gasto de agua</b>	240lts/seg Max. Y 180lts/seg min
<b>Velocidad</b>	600 r.p.m.

## 4.9 Acoplamiento y Multiplicación de la Velocidad

Las unidades turbogeneradoras se componen de dos equipos (turbinas y generador) cuyas velocidades de rotación son en general diferentes. La velocidad de rotación del generador está determinada por la frecuencia eléctrica de la corriente alterna (60Hz) y depende de la cantidad de polos del generador. Generadores de cuatro polos (dos pares) rotan a  $N_G = 1800$  r.p.m. y los de seis polos (tres pares) rotan a  $N_G = 1200$  r.p.m.

Por su parte la turbina tiene una velocidad de rotación  $N_T$  que corresponde a la situación de rendimiento óptimo de la máquina operando en las condiciones de caudal y altura de carga de diseño.

En consecuencia sólo en los casos en que  $N_T = N_G$  se realiza un acople directo entre ambas máquinas, en general será necesario utilizar un multiplicador de velocidad que permita transferir la potencia en el eje de la turbina que rota a  $N_T$ , al eje del generador que rota a  $N_G$ . Esa relación de multiplicación será

$$r = N_G/N_T \quad (4.7)$$

Para materializarla esa adaptación de velocidad entre los ejes de la turbina y del generador se utilizan dispositivos todos conocidos y de amplia difusión en el mercado.

Los multiplicadores más utilizados en MCH (micro-centrales hidroeléctricas) son los de tipo de polea con correas planas o en V. Las correas planas tienen mejor rendimiento (98%) pero requieren mayor tensado para evitar su deslizamiento y en consecuencia hay mayor esfuerzo sobre los ejes y rodamientos. Las correas en V requieren menores tensiones de montaje pero tienen un rendimiento (95 a 97%).

Otras alternativas como el uso de cadenas de transmisión o cajas de engranaje son menos utilizadas ya que las primeras requieren atender su ubicación y las segundas son más costosas. Los rendimientos de estos dispositivos son del orden del 98% y superiores.

## 4.10 Generación de Electricidad

El equipamiento de generación y su dimensionamiento está fuertemente asociado a las características de la demanda que debe satisfacer la MCH. Una primera opción deberá definir si los usuarios serán abastecidos mediante la carga y distribución de baterías o mediante una pequeña red de distribución local.

En el primer caso será más conveniente instalar una unidad de generación de corriente continua y en el segundo caso una unidad de generación de corriente alternativa.

El uso de corriente alterna trifásica comienza a ser conveniente cuando la escala de la demanda es alta y existen usos productivos que sólo pueden ser resueltos con motores trifásicos (potencias mayores a 5 kW). Es condición básica de conveniencia que se mantenga el sistema con las cargas equilibradas en tres fases.

#### **4.10.1 Generación Alterna**

La generación alterna y transmisión de la energía eléctrica mediante sistemas de corriente alterna involucra la presencia conjunta de energía y potencia activa (que produce trabajo) y energía y potencia reactiva que circula dentro del sistema eléctrico pero que no sirve en términos de energía útil en la carga del sistema.

La energía y potencia reactiva está asociada a la presencia de campos eléctricos expresados en términos del parámetro de capacidad (C) y a la presencia de campos magnéticos expresados en términos del parámetro inductancia (L).

A su vez la energía activa se aplica tanto al consumo de energía útil de los usos finales como para atender a pérdidas de joule del sistema y su presencia se expresa en términos del parámetro resistencia (R).

Como ya lo mencionamos, la generación alterna se origina al obtener tensión (V) en los bornes de una bobina con rotación relativa respecto de un campo magnético. De acuerdo a la velocidad de rotación y al número de los polos magnéticos del generador, resultará una determinada frecuencia de tensión generada en los bornes del generador. Esta frecuencia está estandarizada en 60 ciclos por segundo (Hz) en México. De tal forma un generador deberá rotar, según la cantidad de polos con que esté construido, a una velocidad fija y determinada, para producir energía eléctrica en la frecuencia de 60 ciclos por segundo.

Los generadores de pequeñas potencias más difundidos en MCH's son los de 4 polos que rotan a 1800 r.p.m. y los de 6 polos que rotan a 1200 r.p.m. Si la velocidad de rotación de la turbina a rendimiento óptimo no coincide con alguna de las velocidades estándar de los generadores, ambas se adaptan mediante el multiplicador de velocidad.

### 4.10.2 Generador eléctrico de la central

El generador utilizado en la central es del tipo síncrono, autoexcitado y autorregulado, trifásico de 1800 rpm de velocidad nominal de giro (380/220 V, 60 Hz), de fabricación inglesa. Se trata de una máquina robusta, preparada especialmente para su trabajo con la turbina a través de un sistema de transmisión flexible de poleas y fajas.

Como se observó anteriormente en los parámetros de diseño de la turbina Banki, la velocidad a la que gira es de 600 rpm, debido a esto el acople no puede ser directo. Nuestra relación de multiplicación será de  $r = N_G/N_T = 1800/600 = 3$ . Entonces será necesario instalar un sistema de poleas para acoplar la turbina con el generador con una relación de multiplicación de 3.

### 4.10.3 Características del generador utilizado

Las características de operación del generador que se propone en este proyecto se presentan en la tabla 4.4.

Tabla 4.4 Características del generador

<b>Marca</b>	Siemens
<b>Fases</b>	3
<b>Potencia aparente</b>	45 KVA
<b>Potencia real</b>	35 KW
<b>Tensión entre fases</b>	380 V
<b>Corriente en amperes</b>	4 Amp.
<b>Voltaje de excitación</b>	20 VCD
<b>Frecuencia</b>	60 Hz

## 4.11 La regulación de Tensión y Frecuencia

La tensión y la frecuencia con la que se suministra energía para los usos domésticos y productivos de la electricidad en corriente alterna, son los parámetros de la calidad del servicio.

El excesivo apartamiento de los valores nominales para los que están diseñados los artefactos y equipos que utilizan corriente alterna, producen alteraciones en la función que prestan, daños permanente y alteración o reducción de la vida útil de los mismos.

Tensiones elevadas pueden dañar la aislación de los bobinados de los motores eléctricos y sacarlos de servicio. Tensiones muy bajas provocan sobrecalentamiento de los motores con la consiguiente reducción de su vida útil.

El mismo efecto de sobrecalentamiento de los motores se produce cuando hay un descenso marcado de la frecuencia, no ya por incrementos en la corriente activa, sino por aumento del reactivo.

La lámpara fluorescente no enciende cuando las tensiones caen por debajo del 15% de su valor nominal. En las lámparas incandescentes la sobretensión reduce la vida útil y la subtensión reduce el nivel de iluminación.

En general el equipamiento eléctrico es diseñado para funcionar adecuadamente dentro de rangos de variación de tensión y frecuencia asociados con los efectos antes descritos de tales variaciones.

Los estándar de calidad aceptados para pequeños sistemas eléctricos son los siguientes:

Tensión: +/- 8 a 10 % del valor nominal.

Frecuencia: 60 – 63 Hz (se aceptan incrementos del 5% pero se evitan frecuencias debajo de la nominal).

La causa de las variaciones de tensión y de frecuencia del sistema es la variación de la carga que debe alimentar el generador.

En los grandes sistemas de potencia de variaciones incrementales de carga son pequeñas y la corrección de los parámetros de tensión y frecuencia se realizan con un gran número de unidades de generación y con un conjunto adicional de recursos operativos.

En los pequeños sistemas con MCH las variaciones incrementales de carga pueden ser muy grandes. Una plancha (1.000 W) que se conecta a una red que opera en ese momento con una carga de 10 kW, provoca un incremento de carga del 10 %.

Es decir que conexiones de cargas significativas tenderán a “frenar” el sistema reduciendo tensión y frecuencia y desconexiones de carga significativas tenderán a “embalar” el sistema aumentando tensión y frecuencia.

#### **4.11.1 Sistemas y dispositivos de regulación**

Existen dos sistemas básicos para mantener los parámetros eléctricos del sistema dentro del rango admisible de calidad.

El primer sistema consiste en mantener carga constante, ya sea durante todo el tiempo de operación o en escalones de carga constante durante períodos horoestacionales. De este modo, si el generador ve una carga constante, no se producirá variación de tensión y frecuencia. Este sistema se denomina de regulación por carga.

El segundo sistema cuando la carga que ve el generador es variable, es la turbina la que debe suministrar una potencia variable durante la operación. La variación de la potencia de la turbina se obtiene variando el caudal de agua que ingresa al rotor, ya que la altura de carga es fija. Este sistema se denomina de regulación por caudal.

La adopción de uno u otro método de regulación dependen de la abundancia o escasez del recurso hídrico y la curva de carga del sistema. Si el recurso hídrico es escaso es conveniente regular por caudal, para hacer óptimo el aprovechamiento del mismo. Si el recurso hídrico es abundante pero la curva de carga tiene comportamiento volátil y factor de carga muy bajo también resultará conveniente adoptar la regulación por caudal.

Si, en cambio, con recurso hídrico abundante, puede incrementarse el factor de carga mediante usos alternativos de la electricidad o bien ordenar los usos eléctricos en escalones de la curva de carga, la regulación por carga resultará más conveniente.

Dado que los generadores de serie incluyen dispositivos que ajustan su corriente de excitación de manera de mantener la tensión constante en forma automática con las variaciones de carga, los medio de regulación usados en las MCH se orienta a sensar y ajustar la frecuencia del sistema eléctrico.

### **4.11.2 Regulación de la central**

La regulación del voltaje de la central se realiza a través de un Regulador Electrónico de Carga, el cual utiliza una carga balasto formado por un conjunto de resistencias, enfriadas por agua, que permite recibir el exceso de carga, permitiendo un suministro de energía de calidad. La regulación de frecuencia se hace mediante el uso de un regulador electrónico de frecuencia, el cual utiliza un balastro formado por un conjunto de resistencias que permite recibir el exceso de carga. De este modo se logra un suministro de energía de calidad con voltaje y frecuencia estables en sus condiciones nominales.

### **4.12 Obras de Distribución Eléctrica**

Para estas obras los criterios de diseño son los que se aplican normalmente en redes rurales. Si la MCH se encuentra en una ubicación tal que la totalidad de la carga está distribuida en un radio de 1.5 – 2 km. desde la sala máquina, resultará conveniente diseñar el sistema totalmente en baja tensión.

Si, como frecuentemente ocurre la carga se encuentra distribuida en un radio de varios kilómetros, será necesario transferirla en media tensión, ya sea con líneas monofásicas de 7,6 kV o trifásicas de 13,2 kV.

Como todo sistema de distribución rural el mismo deberá equiparse con los correspondientes elementos de maniobra, de puesta a tierra y de protección. El diseño eléctrico permite definir tipo y dimensiones del conductor, el que podrá ser de cobre, de aleación de aluminio o de alambre de acero. Las cargas a transferir, las caídas de tensión admisibles y el cálculo económico de pérdidas determinará cual es la solución más conveniente.

El diseño mecánico atenderá a las distancias eléctricas que deberá respetar la separación entre conductores y con la tierra, definirá el vano más económico (distancia entre postes) y realizará el cálculo mecánico de conductores y postes.

Siguiendo el concepto de utilizar técnicas y modalidades constructivas que reduzcan los costos, en los sistemas de electrificación rural se ha difundido la distribución monofásica con retorno por tierra (MRT) el cual se muestra en la figura 4.10.

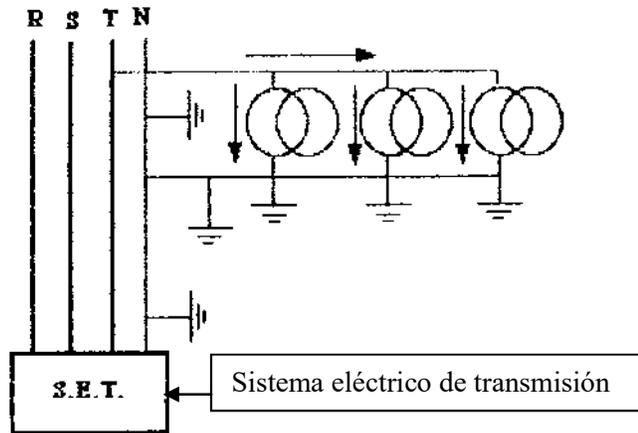


Figura 4.10 Distribución monofásica con retorno por tierra.

Esta solución tecnológica puede acompañarse de un proceso de selección de materias y modalidades constructivas, orientado a reducir los costos en todo lo posible. En tal sentido se sugiera considerar.

1. Uso de conductores de acero (cable y alambre) y mayores vanos.
2. Uso de postes de madera local, sin tratamiento.
3. Recuperación de materiales usados (principalmente herrajes y aisladores).
4. Desarrollo de convertidores monofásicos / trifásicos estáticos o rotativos, para uso de fuerza motriz de equipos de más de 7.5 HP.
5. Adoptar menores exigencias para la puesta a tierra de los transformadores.
6. Promover la participación de los municipios y de los futuros usuarios en las fases del proyecto y construcción de las obras.

#### 4.13 Potencia eléctrica instalada

Como ya se explicó en el capítulo anterior, para calcular la potencia necesitamos conocer forzosamente 4 parámetros; el caudal y la altura del salto de un río o arroyo, el rendimiento de nuestra turbina y la aceleración de la gravedad.

Obtenidas la altura y el máximo caudal de operación de la central, ahora si estamos listos para poder calcular la potencia eléctrica que podemos generar con nuestra central hidroeléctrica, por medio de la ecuación 3.1 del capítulo anterior la cual se muestra a continuación.

$$P = r \times g \times Q \times H \quad (4.8)$$

Sustituyendo los valores medidos anteriormente y tomando el mínimo rendimiento de la turbina que es de 0.75, obtenemos:

$$P = (0.75) (9.8 \text{ m/s}^2) (240 \text{ lts/seg}) (20 \text{ m}) = 35.28 \text{ KW.}$$

Como ya se ha mencionado en el apartado anterior esta es la máxima potencia que generará la central. Ahora se procede a calcular la potencia mínima que generará nuestra planta en periodos pobres de agua con la ecuación 4.3. Sustituyendo el caudal mínimo con el que operará la turbina tenemos.

$$P = (0.75) (9.8 \text{ m/s}^2) (180 \text{ lts/seg}) (20 \text{ m}) = 26.460 \text{ KW.}$$

No se debe confundir la potencia eléctrica instalada (generada), con la potencia instalable de un salto de agua. La potencia instalable de un salto de agua es aquella que se puede instalar con el total del caudal del río o arroyo sin tomar en cuenta las pérdidas que hay en el proceso y la potencia eléctrica instalada es la que nos esta entregando la turbina o turbinas para poder aprovecharla como energía eléctrica.

#### **4.14 Cálculo de la energía diaria**

Para darnos cuenta de cuantas familias serán beneficiadas (consumidores) con la potencia que se está generando en la central, primeramente debemos conocer la cantidad de energía que consume cada familia en su casa habitación. Para ello nos basaremos en el consumo energético de una casa habitación de estilo de vida medio.

La tabla 4.5 nos muestra el consumo energético durante 24 horas y con este valor trabajaremos para calcular a cuantas familias se puede entregar energía eléctrica.

Tabla 4.5 Cuadro de consumo energético.

EQUIPO	UNIDADES	POTENCIA(W)	HORAS	ENERGIA(W.h)
Iluminación de sala	2	15	6	180
Iluminación del baño	1	15	2	30
Iluminación de cuartos	6	15	6	630
Iluminación de la cocina	1	15	4	45
Refrigerador	1	-----	24	300
Televisión	1	150	6	900
<b>Total</b>				<b>2085</b>

#### 4.15 Casas habitación suministradas con la potencia instalada

Como ya se había mencionado anteriormente debido a que la central depende directamente del caudal del agua y como este varía de acuerdo a las estaciones del año, se procede a calcular las potencias que se generan con el caudal máximo y con el caudal mínimo.

##### 4.15.1 Potencia máxima

Como la central se instalará en una zona aislada consideraremos que operará durante las 24 horas ininterrumpidamente. Considerando esto procederemos a convertir la potencia generada a energía entregada.

$$E_{te} = P_g * T \quad (4.9)$$

donde,

Ete es la energía total entregada

Pg es la potencia generada

T es el tiempo en el cual esta en operación la central.

Por lo tanto sustituyendo valores en la ecuación (4.8) el resultado es.

$$Ete = 35.28 \text{ Kw} * 24\text{hrs} = 846.72 \text{ KWh}$$

A partir de la energía total que nos entrega la central ahora si podemos calcular a cuantas casas habitación se le podrá suministrar energía eléctrica. Como nuestro sistema no es ideal debemos considerar las pérdidas que existen en el sistema mecánico y eléctrico. En este caso consideraremos un 10 % de pérdidas en el sistema y las calcularemos con la expresión.

$$Per = Ete * fper \quad (4.10)$$

donde,

Per son las pérdidas en el sistema

Fper es el factor de pérdidas que en este caso es del 10%

Sustituyendo valores en la ecuación da el resultado siguiente:

$$Per = 846.72 \text{ KWh} * 0.1 = 84.672 \text{ KWh}$$

Obtenidas las pérdidas en el sistema simplemente restamos éstas a la energía total entregada y calculamos la energía total aprovechable para suministrar a los consumidores con la ecuación:

$$Eap = Ete - Per \quad (4.11)$$

Sustituyendo valores en la ecuación el resultado es el siguiente:

$$Eap = 846.72 \text{ KWh} - 84.672 \text{ KWh} = 762.048 \text{ KWh}$$

A partir de la energía aprovechable Eap (Wh) ahora si podremos calcular el número de casas habitación a las que podremos suministrar energía eléctrica con la central del proyecto de generación por medio de la ecuación que se muestra a continuación:

$$Nfa = Eap / Ec \quad (4.12)$$

donde,

Nfa es el número de familias suministradas

Ec es energía consumida por una casa habitación

El resultado se presenta a continuación:

$$Nfa = 762.048 \text{ KWh} / 2.085 \text{ KWh} =$$
$$Nfa = \mathbf{365 \text{ casas habitación suministradas}}$$

#### 4.15.2 Potencia Mínima

Sustituyendo la potencia mínima generada en la ecuación (4.4) y tomando de 24 hrs el tiempo de operación de la central tenemos.

$$Ete = 26.460 \text{ Kw} * 24\text{hrs} = 635.040 \text{ KWh}$$

Teniendo la energía total que nos entrega la central con la potencia mínima ahora si podemos calcular a cuantas casas habitación se le podrá suministrar energía eléctrica.

Tomando también de 10% las pérdidas en el sistema y sustituyendo en la ecuación 4.5, nos entrega el siguiente resultado:

$$Per = 635.040 \text{ KWh} * 0.1 = 63.504 \text{ KWh}$$

Obtenidas las pérdidas en el sistema simplemente restamos éstas a la energía total entregada con la potencia mínima y calculamos la energía total aprovechable para suministrar a los consumidores con la ecuación (4.6) del apartado anterior:

$$Eap = 635.040 \text{ KWh} - 63.504 \text{ KWh} = 571.536 \text{ KWh}$$

Dividiendo la energía total aprovechable entre la energía consumida por cada casa habitación tenemos:

$$Nfa = 571.536 \text{ KWh} / 2.085 \text{ KWh} =$$
$$Nfa = \mathbf{274 \text{ casas habitación suministradas}}$$

## 4.16 Resumen del proyecto de generación

A continuación se presentan las características y especificaciones técnicas de cada una de las partes que integran nuestro proyecto de generación.

### 4.16.1 Altura y caudal

La altura del salto con que cuenta la central es de 20 metros. El caudal máximo con que operara la central es de 240 lts/seg y el caudal mínimo será de 180 lts/seg.

### 4.16.2 Obras civiles

- *Canal de conducción:* el canal de conducción será construido en forma rectangular, tendrá una capacidad de conducción de 600 lts/seg, tendrá una longitud que conducirá el agua hasta la cámara de carga de 500 metros, completamente revestido de concreto y es de tipo “cielo abierto”
- *Cámara de carga y desarenador:* Tendrá las siguientes medidas; 1.25m en la sección por donde ingresa el agua del canal y de 1.5 m en las caras laterales, y tiene 2 metros de altura. Contará con una rejilla móvil que evita el ingreso de objetos a la tubería de presión. Será construido y revestido de concreto.
- *Tubería de presión:* La longitud de la tubería será de 26 metros. Tendrá un calibre de 12” de diámetro, será de PVC y llevara anclajes de hormigón cada 5 metros de la tubería.
- *Válvulas de compuerta:* Estará ubicada al final de la tubería de presión y a la entrada del inyector de la turbina y será de tipo mariposa,
- *Casa de máquinas:* llevará las siguientes dimensiones; 4 metros de largo y 3 metros de ancho, con su respectiva puerta y una ventana para la ventilación de los equipos, de mampostería de piedra y el techo será de madera con láminas de asbesto. Contendrá su respectivo canal de desfogue de agua.

### **4.16.3 Turbina**

Tendrá un diámetro de 300 mm y un ancho de 500 mm; su velocidad será de 600 r.p.m., el número de alabes de la turbina será de 26, será instalada en forma horizontal; tendrá una caída neta de 20 metros, un gasto de agua de 240lts/seg máxima y 180lts/seg mínima, será Michell-Banki con alabe regulador de caudal. Contará con una eficiencia nominal de 75% y se obtendrá una máxima eficiencia de 83%, con una potencia mecánica en el eje de 35 KW.

### **4.16.4 Acoplamiento**

Tendrá un sistema de poleas con una relación de multiplicación de 3 tendrá un sistema de acoplamiento flexible como el que se mencionó en el capítulo 3 con presión de aceite.

### **4.16.5 Generador**

De tipo síncrono, auto excitado y autoregulado, trifásico de 1800 r.p.m. de 4 polos, de marca siemens de 35 KW y 45 KVA de 4 amperes nominales de trabajo y frecuencia de 60 Hz nominales.

### **4.16.6 Reguladores de voltaje y frecuencia**

La regulación del voltaje se realiza a través de un Regulador Electrónico de Carga, que una carga balasto formado por un conjunto de resistencias, enfriadas por agua, que permite recibir el exceso de carga. La regulación de frecuencia se hace mediante el uso de un regulador electrónico de frecuencia, el cual utiliza un balastro formado por un conjunto de resistencias que permite recibir el exceso de carga.

### **4.16.7 Obras de distribución eléctrica**

Dependiendo de la distancia a la cual se encuentren los usuarios se tendrá que usar voltajes en media o en baja tensión.

#### 4.16.8 Potencia generada

En la tabla 4.6 se muestran las potencias máxima y mínima que se generan con los diferentes caudales, así como las casas suministradas con dichas potencias.

Tabla 4.6 Potencia máxima y mínima generada

	Altura (m)	Caudal(l/s)	Perdidas (KWh)	Potencia Generada(KW)	Casas Alimentadas
<b>Máximo</b>	20	240	84.67	35.28	<b>365</b>
<b>Mínimo</b>	20	180	63.50	26.46	<b>274</b>

## Capítulo 5

# Conclusiones y Recomendaciones.

### 5.1 Entorno socioeconómico de la zona de influencia de los proyectos

Los proyectos mini-hidráulicos por su naturaleza se ubican al fondo de cañadas, al pie de alguna presa pequeña de almacenamiento ó un canal de riego. Dichos sitios se encuentran regularmente alejados de centros urbanos importantes, es decir su entorno es principalmente rural.

La energía generada se puede transportar por medio de una línea de transmisión construida ex profeso o bien pagar un porteo por el uso de líneas existentes. El atractivo principal de la mini-hidráulica es la posibilidad de reducir costos. Se puede esperar en forma conservadora que los ahorros vayan de un 20 a un 30 % respecto a las tarifas eléctricas que cobran las compañías públicas de electricidad.

Bajo estas circunstancias, los interesados en el uso de la energía mini-hidráulica se pueden clasificar de la siguiente forma:

a) **Grupos Industriales ó agroindustriales.**- En función de la cantidad de energía que se pueda extraer en forma rentable de una mini-central (1 a 5 MW) es posible que varios industriales o agroindustriales ubicados en la región ó zona de influencia del proyecto, puedan ser alimentados parcial o totalmente con esta forma de energía. Lo anterior con el apoyo del la figura del “auto-abasto”, prevista en la Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica. No existe una definición precisa de la “zona de influencia” del proyecto pero desde luego habrá que balancear la ubicación de las industrias o agroindustrias vs. el pago por el porteo o transporte del fluido eléctrico.

b) **Los gobiernos municipales.**- Es un hecho que muchos gobiernos municipales del país se ven limitados e incluso en ocasiones imposibilitados de cubrir sus adeudos a la empresa pública de electricidad (CFE) en lo relativo al alumbrado público y al bombeo de agua. En este sentido *es posible que un gobierno municipal se asocie con un desarrollador de mini-hidráulica para concretar la construcción de una central* que le permita un abasto

parcial o total de energía eléctrica para estos servicios. El gobierno municipal se puede convertir en un socio minoritario, estipulando por escrito la garantía de que consumirá la producción de la mini-central al menos por el tiempo de recuperación de la inversión que puede ser de unos 10 años. También se especifica que su precio de venta será inferior a la tarifa alternativa vigente de la empresa pública de electricidad (CFE). Los esquemas que se visualizan como los más atractivos son del tipo BOT o por sus siglas en español COT (construir, operar y transferir). Los municipios tienen a su cargo los sistemas de abasto de agua potable. En este sentido, tienen personal experimentado en la construcción, operación y el mantenimiento de dichos sistemas.

Las centrales mini-hidráulicas tienen mucha similitud con los sistemas de abastecimiento de agua potable, es decir sus componentes eléctricos y mecánicos son muy similares entre si; las bombas son en esencia turbinas operando en sentido inverso de rotación y los motores son muy similares a los generadores. Lo anterior favorece los aspectos de capacitación y asimilación tecnológica que se requieren para el éxito operativo deseado.

En resumen los beneficios esperados son:

- Un ahorro importante en el pago de la energía, sin que se demerite la calidad de los servicios.
- No se requiere que los municipios ni los gobiernos a nivel estatal ó federal realicen inversiones.
- Se promueve el uso de energía limpia no contaminante.
- Los precios de la electricidad que pagan los municipios dejan de depender de la disponibilidad de los hidrocarburos y siempre serán inferiores a los precios de la CFE.
- Los municipios no toman riesgos ni garantizan los pagos a los bancos. Dichos pagos los realiza la empresa desarrolladora; solamente se comprometen a pagar la energía que consuman.

**c) *Las comunidades rurales aisladas.***- Existen comunidades que por su lejanía a los centros urbanos, se les cataloga como de “aisladas”. En dichas comunidades puede o no haber servicio eléctrico. La economía de estas comunidades se centra principalmente en labores agrícolas. También existe una cultura del trabajo productivo en forma

comunitaria. Para el mejor desempeño de dichas labores comunitarias se requiere de fuentes energéticas accesibles. Es en este sentido que la opción mini-hidráulica puede representar un factor importante para apoyar la economía de estas zonas. La energía hidráulica se puede emplear como fuerza o como fluido eléctrico.

## **5.2 Beneficios económicos y sociales al desarrollar proyectos mini-hidráulicos**

La energía mini-hidráulica es renovable y por tanto tiene como un beneficio inherente el no producir gases invernadero como el CO<sub>2</sub>. De alguna forma también influye en la reducción del consumo de combustibles fósiles como el carbón o el combustóleo. De la experiencia de países que han desarrollado con éxito programas para la construcción de centrales mini-hidráulicas como es el caso de China ó la India(2), se pueden sintetizar los principales beneficios económicos y sociales de la forma siguiente:

**a) Se reducen los riesgos por inundaciones.-** En aquellas regiones en donde la pendiente de los ríos es pronunciada, en época de lluvias, se presentan inundaciones importantes en las partes bajas, cerca de las planicies costeras. Este fenómeno además es muy rápido lo que no permite prevenir a la población ribereña del peligro. Hace un par de años (1999) se presentó esta situación en la desembocadura de los ríos Cazonos y Tecolutla en el Estado de Veracruz. La construcción de pequeñas centrales hidráulicas a lo largo de los principales afluentes de estos ríos (de hecho ya localizados por CONAE en 1995), permitiría modificar las características de las avenidas que se presentan, proporcionando una cierta capacidad de regulación, además de cambiar los tiempos de concentración del escurrimiento. Se sabe que la Comisión Nacional del Agua (CNA) ha realizado algunas obras de contención sobre los ríos mencionados, es decir pequeñas presas derivadoras que cumplen la función ya descrita. Vale la pena buscar la coordinación con esta dependencia para estudiar a detalle las posibilidades de hacer las obras electromecánicas complementarias que requiere una central minihidráulica.

**b) Se ayuda a evitar la erosión de la cuenca.-** Una serie de pequeñas presas a lo largo de un arroyo permite disminuir el grado de erosión que en forma natural dicho arroyo va ocasionando a lo largo de su cauce. Esto a su vez permite que el suelo que circunda a la

corriente de agua tienda a no ser arrastrado por las crecientes que se presentan en época de lluvias.

**c) Se mejoran las labores agrícolas.-** En las centrales “al hilo del agua” (sin embalse), las pequeñas presas derivadoras (Aprox. 10m de altura) pueden proveer de un almacenamiento modesto de agua susceptible de ser aprovechado para fines agrícolas. La energía eléctrica se puede usar en parte para el bombeo de agua, para la irrigación respectiva. En otros sitios, la presa con fines agrícolas puede ya existir y en este caso solo se requiere la construcción de la obra electromecánica. Esta energía es muy útil en distritos de riego “presurizados”, es decir en donde la irrigación se efectúa preferentemente por medio de bombeo y donde en general se encuentran problemas de suministro seguro y económico de fuerza eléctrica.

De la experiencia reportada en el caso de China, se ha visto que en las zonas montañosas en donde se han construido centrales mini-hidráulicas en tan solo una década, se han registrado incrementos de la producción de granos hasta en un 38%.

Esto se debe básicamente a que una vez construida la central, se mejora la infraestructura existente en materia de caminos de acceso, almacenes y servicios asistenciales a la población.

**d) Se propicia el desarrollo agroindustrial.-** El nivel de industrialización es un indicador del grado de desarrollo de las zonas rurales. Las centrales mini-hidráulicas reducen o eliminan las carencias de electricidad en estas zonas y propician el desarrollo de actividades agroindustriales. En zonas montañosas puede acelerar el aprovechamiento planeado de recursos forestales e incluso ser una actividad de mayor importancia que las actividades agrícolas. Para el caso de China, en una década en las 318 comunas en donde se ha llevado a cabo la electrificación rural a base de mini-hidráulica, se ha logrado la creación de unos 5 millones de empleo y en general se ha visto un incremento en la calidad de vida de sus habitantes. Para el caso de comunidades rurales aisladas (menos de 500 habitantes), el uso de la energía hidráulica, además de la energía eléctrica, se puede enfocar hacia la conversión a energía mecánica para mover molinos, telares, bombeo de agua y otras actividades comunitarias de las que depende en buena medida la economía de dichas comunidades

**e) Desarrollo económico de la industria metalmecánica.-** De implantarse un programa para desarrollar la mini-hidráulica en México es probable que muchas de las turbinas, generadores y equipos auxiliares se puedan fabricar localmente a través de convenios de transferencia de tecnología con diversos fabricantes en el extranjero. De hecho ya existen en el país algunas fábricas con esta posibilidad.

**f) Derrama económica por la construcción y operación.-** Durante la etapa de construcción de las centrales se emplea mano de obra de la región adyacente al sitio considerado. Se estima que una central mini-hidráulica requiere de al menos dos años para su construcción. Posteriormente se requiere de cierto personal para su mantenimiento y operación. En ambos casos se tiene una excelente oportunidad de capacitación de personal y derrama económica regional.

**g) Arraigo en las zonas rurales y capacitación.-** La actividad económica propiciada por las centrales mini-hidráulicas puede influir en aumentar el arraigo de personas que regularmente emigran a EEUU en busca de mejores oportunidades de trabajo.

### **5.3 Conclusiones sobre las centrales mini-hidráulicas.**

\* Se define una central mini-hidráulica como aquella que aprovecha la energía hidráulica de ríos o arroyos y cuya capacidad instalada es del orden de 5 MW.

\* El potencial mundial mini-hidráulico viable de explotar es de 1,000 THW / año. Actualmente dicho potencial se ha desarrollado en un 15 %. En este rubro cabe destacar el caso de China y la India que han establecido planes agresivos de construcción de centrales hidráulicas pequeñas a un ritmo de alrededor de 1,500 MW /año.

\* En México se estima un potencial mini-hidráulico de 3,000 MW en estados como Veracruz, Puebla, Chiapas, Michoacán y Oaxaca principalmente. La CONAE ha identificado solo el 10 % de dicho potencial, por lo que es necesario continuar con el proceso de cuantificar el potencial referido. En el país solo se ha explotado el 2 % del potencial mencionado.

\* El país cuenta con 22 centrales públicas y 61 centrales privadas de este tipo. La mayoría de ellas con altos niveles de obsolescencia en sus equipos. Existen otras 36 centrales fuera

de servicio. El recurso energético en la mayoría de ellas esta aún disponible e incluso con posibilidades de incrementarse.

\* Se sabe de casos exitosos tanto en otros países como en México. Recientemente una empresa en Orizaba Ver realizó la rehabilitación de su central minihidráulica de 2 MW y en otra industria vecina se reportan ahorros de hasta el 63 % respecto a la tarifa de CFE en la operación de una central similar que tiene mas de 40 años en servicio.

\* Existen procedimientos establecidos por la CONAE (metodología) para auxiliar en la determinación del recurso minihidráulico desde el punto de vista técnico y económico.

\* Los principales beneficios económicos, sociales y ambientales de esta fuente energética son:

- Se producen ahorros en la tarifa eléctrica ( 20 –30%)
- Se evita la generación de gases de efecto invernadero
- Se propicia el desarrollo económico
- Se generan fuentes de empleo

\* Las principales barreras que impiden el desarrollo de la mini-hidráulica son:

- La falta de planes y metas claras (gobierno) en este tema
- La falta de información, educación y capacitación
- La falta ó carencia de financiamiento y apoyo de ONG's
- Los excesivos tramites ante autoridades y/o falta de coordinación institucional
- La falta de aceptación social por carencia de información a comunidades.  
La falta de capacidad y disposición de pago por la energía eléctrica

\* Acciones recomendadas

- Establecer políticas y metas claras así como los mecanismos que propicien su ejecución.
- Continuar con la evaluación del potencial mini-hidráulico y los posibles mercados.
- Propiciar el intercambio de información y colaboración entre especialistas nacionales e internacionales.
- Difundir a través e escuelas, industrias y autoridades estatales y municipales las ventajas de esta fuente renovable de energía.
- Realizar proyectos piloto con fines demostrativos (en especial para municipios).

## Bibliografía

- [1] Claudio Mattaix “TURBO MAQUINAS / HIDRAULICAS” Ed. ICAI; Madrid 1975.
- [2] “Turbina Michell-Banki; Criterios de Diseño, Selección y Utilización”; F. Zarate, C. Aguerre, R. Aguerre; Universidad Nacional de la Plata, 1987.
- [3] “Pequeñas Centrales Hidroeléctricas”; Ramiro Ortiz Flores; Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica; Universidad del valle de México; Mc Graw Hill; Enero del 2001.
- [4] “Energías Renovables”; Mario Ortega Rodríguez; Facultad de Ciencias Químicas; Universidad de Andalucía; Paraninfo Thompson Learning; Marzo del 2002.
- [5] “Aprovechamiento Hidroenergético con Micro-turbinas”; Erick Barney 1984; Instituto de Investigaciones y Proyectos, Facultad de Ingeniería, UNaM, Misiones, Argentina.
- [6] “Metodología para Evaluar Centrales Mini-hidráulicas” Valdez Luis H. CONAE. Jun 1999
- [7] [www.conae.gob.mx](http://www.conae.gob.mx)
- [8] [www.itdg.com.mx](http://www.itdg.com.mx)