



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

# **MICRO-HIDROELÉCTRICA TIPO MICHELL BANKI, FUNCIONAMIENTO, MANTENIMIENTO Y COMPONENTES**

**José Daniel Vásquez De León**

Asesorado por el Ing. José Ismael Véliz Padilla

Guatemala, enero de 2007



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**MICRO-HIDROELÉCTRICA TIPO MICHELL BANKI,  
FUNCIONAMIENTO, MANTENIMIENTO Y  
COMPONENTES**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**JOSÉ DANIEL VÁSQUEZ DE LEÓN**  
ASESORADO POR EL ING. JOSÉ ISMAEL VELÍZ PADILLA  
AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE  
**INGENIERO MECÁNICO**

GUATEMALA, enero de 2007



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA



### **NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II	Lic. Amahán Sánchez Álvarez
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V	Br. Elisa Yazminda Vides Leiva
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

### **TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR:	Ing. Roberto Guzmán Ortiz
EXAMINADOR:	Ing. Julio Cesar Campos Paiz
EXAMINADOR:	Ing. Eric Rene Guerrero Silva
SECRETARIO:	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco



## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

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

### **MICRO-HIDROELÉCTRICA TIPO MICHELL BANKI, FUNCIONAMIENTO, MANTENIMIENTO Y COMPONENTES,**

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería mecánica, 24 de febrero de 2006.

JOSE DANIEL VASQUEZ DE LEON.



## **ACTO QUE DEDICO A:**

### **DIOS**

Por ayudarme a culminar este trabajo de graduación, dándome la fuerza y la sabiduría necesaria.

### **MIS PADRES**

Marco Tulio Vásquez De León  
Joaquina Estrella De León de Vásquez  
Por todo su apoyo durante mi carrera.

### **MIS HERMANOS**

Marco Antonio Vásquez De León  
Wendi Liseth Vásquez De Godoy  
Damaris Amelia Vásquez De Velásquez  
Irma Noemí Vásquez De Ramírez  
Joaquina Elizabeth Vásquez De González  
Jennifer Medaly Vásquez de León  
Por su apoyo.

### **MI NOVIA**

Maria Milagros Larios Valle  
Por ser el amor de mi vida y por brindarme su apoyo para terminar el presente trabajo de graduación.

### **MIS COMPAÑEROS**

Por los momentos compartidos.



## ÍNDICE GENERAL

<b>ÍNDICE DE ILUSTRACIONES</b> .....	V
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b> .....	VII
<b>GLOSARIO</b> .....	IX
<b>RESUMEN</b> .....	XIII
<b>OBJETIVOS</b> .....	XV
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	XVII

### 1. ANTECEDENTES GENERALES

1.1.	Historia de la generación hidroeléctrica.....	1
1.2.	Composición de una instalación hidroeléctrica.....	3
1.3.	Definición de las micro-centrales hidroeléctricas.....	3
1.3.1.	Clasificación de las micro-centrales hidroeléctricas, según la potencia obtenida.....	4
1.3.2.	Clasificación según la modalidad y la toma de agua.....	4
1.3.2.1.	Centrales de agua fluente.....	5
1.3.2.2.	Centrales de flujo regulado.....	5
1.4.	La física de una instalación micro-hidroeléctrica.....	5
1.5.	Principios básicos de la electricidad.....	6
1.5.1.	Energía eléctrica.....	6
1.5.2.	Definición de corriente alterna .....	6
1.5.3.	Definición de corriente directa.....	7
1.5.4.	Diferencias entre corriente directa y corriente alterna.....	8
1.5.5.	Definición de corriente trifásica.....	9

## **2. TURBINAS**

2.1. Definición de turbina.....	11
2.2. Clasificación de las turbinas.....	11
2.2.1. Turbina hidráulica.....	11
2.2.2. Turbina de vapor.....	14
2.3. Clasificación de las turbinas hidráulicas, según su principio de funcionamiento.....	16
2.3.1. Generalidades de las turbinas de acción.....	17
2.3.2. Generalidades de las turbinas de reacción.....	17
2.4. Teoría de operación y tipos de turbinas de acción.....	18
2.4.1. Turbina Pelton.....	18
2.4.1.1 Teoría de operación de la turbina Pelton.....	19
2.4.2. Turbina Michell Banki.....	21
2.4.2.1 Teoría de operación de la turbina Michell Banki.....	21
2.5. Teoría de operación y tipos de turbina de reacción.....	23
2.5.1 Turbina Francis.....	24
2.5.1.1 Teoría de operación de la turbina Francis.....	24
2.5.2. Turbina Kaplan.....	26
2.5.2.1 Teoría de operación de la turbina Kaplan.....	27

## **3. TURBINA TIPO MICHELL BANKI**

3.1. Características generales.....	29
3.2. Composición de la turbina tipo Michell Banki.....	29
3.2.1 Rodete.....	30
3.2.2 Inyector.....	31
3.3. Historia de la turbina Michell Banki.....	32
3.4. Funcionamiento de la turbina Michell Banki.....	33

3.5. La turbina Michell Banki como turbomáquina de acción.....	34
3.6. Análisis del diseño hidráulico de la turbina Michell Banki.....	37
3.7 Coeficiente de velocidad (Kc) del inyector.....	45
3.7.1. Resolución del triangulo de velocidades a la entrada del rotor.....	46
3.8. Velocidad de embalamiento.....	49

#### **4. DESCRIPCIÓN DE LOS COMPONENTES DE LA MICRO-HIDROELÉCTRICA**

4.1. Generadores.....	51
4.1.1. Generadores sincrónicos.....	51
4.1.2. Generadores de inducción.....	53
4.2. Controles reguladores.....	54
4.2.1. Sistema de control manual del flujo de agua.....	55
4.3. Medidores de flujo utilizados en la instalación.....	56
4.3.1. Vertedero triangular.....	56
4.3.2. Determinación del salto o altura útil.....	57
4.4. Tubería de cloruro de polivinilo .....	57
4.5. Descripción de equipo para la realización del ensayo.....	58
4.5.1. Ensayo en la turbina tipo Michell Banki.....	58
4.5.2 Instrucciones para poner en marcha la turbina tipo Michell Banki.....	59
4.5.3 Realización del ensayo de la turbina tipo Michell Banki.....	59
4.5.4 Obtención de datos o cálculos.....	61
4.5.4.1 Cálculo del salto o altura útil con la ecuación (28)....	61
4.5.4.2 Cálculo del caudal con la ecuación (30).....	62
4.5.4.3 Cálculo de la potencia hidráulica extraída por la turbina.....	64

4.6 Mantenimiento para la turbina tipo Michell Banki.....	67
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>69</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>71</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>73</b>
<b>APÉNDICE.....</b>	<b>75</b>

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Gráfica de la corriente alterna	7
2.	Gráfica de la corriente directa	8
3.	Gráfica de corriente trifásica	10
4.	Diagrama de un alternador trifásico	11
5.	Figura de la rueda hidráulica de empuje inferior.	13
6.	Figura de la rueda hidráulica de empuje superior	14
7.	Figura del rotor de una turbina de vapor	17
8.	Figura de la turbina tipo Pelton	21
9.	Figura de las ranuras del rotor de la turbina tipo Michell Banki	23
10.	Figura de la turbina tipo Michell Banki	24
11.	Figura de la turbina tipo Francis	26
12.	Figura de la turbina tipo Kaplan	27
13.	Figura del rodete de la turbina tipo Michell Banki	30
14.	Funcionamiento del inyector de la turbina tipo Michell Banki	31
15.	Figura con las partes de la turbina tipo Michell Banki	34
16.	Triángulo de velocidades de la turbina tipo Michell Banki	38
17.	Triángulo de velocidades unificados	39
18.	Vista del montaje de la micro-hidroeléctrica	50
19.	Figura del tablero de control utilizado en la instalación	54
20.	Medidor de flujo tipo vertedero triangular utilizado en la instalación	56
21.	Controles reguladores	59
22.	Juego de manómetros	59
23.	Gráfica de la curva del salto ó altura útil en función del caudal	65
24.	Gráfica de caudal versus potencia hidráulica de la turbina Michell	65

## TABLAS

I.	Clasificación de las micro-centrales hidroeléctricas	4
II.	Variación del ángulo $\alpha_1$	44
III.	Datos obtenidos del ensayo de la turbina Michell con el alabe del inyector en la posición 4.	60
IV.	Datos de la altura piezométrica $h$ y el resultado del cálculo del caudal con la ecuación (30)	62
V.	Resultados de la potencia hidráulica de la turbina Michell Banki	66

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\alpha$	Ángulo entre la velocidad absoluta y la velocidad tangencial
$\beta$	Ángulo entre la velocidad relativa y la velocidad Tangencial
$C$	Velocidad absoluta
$C_u$	Componente de la velocidad absoluta en la dirección tangencial
$C_m$	Componente de la velocidad absoluta en la dirección meridiana.
<b>CV</b>	Caballos de vapor
$g$	Aceleración de la gravedad
<b>Gr</b>	Grado de reacción.
$K_c$	Coefficiente de velocidad del inyector,
$H_{est}$	Altura estática o de presión
$H_{tot}$	Altura útil
<b>mm</b>	Milímetro
<b>m</b>	Metro
<b>m/s</b>	Metro por segundo
<b>m<sup>3</sup>/s</b>	Metro cúbico por segundo
<b>N</b>	Velocidad de rotación de la maquina
$\eta$	Rendimiento hidráulico,
<b>Q</b>	Caudal volumétrico
<b>kW</b>	Kilovatios
<b>P</b>	Presión

<b>PVC</b>	Cloruro de polivinilo
<b>psi</b>	Libras sobre pulgada cuadrada (Lb/plg <sup>2</sup> )
<b><i>u</i></b>	Velocidad tangencial de la turbina
<b><i>W</i></b>	Velocidad relativa del fluido
<b>W</b>	Watts
<b>1</b>	Entrada al rotor
<b>2</b>	Salida del rotor

## GLOSARIO

<b>Aspas o palas</b>	Paleta de la rueda hidráulica.
<b>Altura o carga manométrica</b>	Medida de la presión en cualquier punto de tubería, expresada en metros o pies de una columna de líquido
<b>Carga dinámica</b>	Energía total del flujo en cualquier punto de su trayectoria.
<b>Cebar</b>	Proceso que consiste en llenar la bomba con agua de manera que el impulsor pueda crear succión.
<b>Cojinete o Rodamiento</b>	Pieza de metal u otro material en la que se apoya y gira cualquier eje de maquinaria.
<b>Corriente alterna</b>	Es la corriente eléctrica en la que la magnitud y dirección varían cíclicamente.
<b>Corriente continua</b>	Es la corriente eléctrica en la que tiene un único sentido de circulación.

<b>Corriente trifásica</b>	Es la corriente formada por tres formas de onda desfasadas una de otra ciento veinte grados.
<b>Energía cinética</b>	Energía que un objeto posee debido a su movimiento.
<b>Energía potencial</b>	Energía almacenada que posee un sistema como resultado de las posiciones relativas de sus componentes.
<b>Energía mecánica</b>	Es la suma de las energías cinética y potencial de un cuerpo en un sistema de referencia dado.
<b>Frecuencia</b>	Es el número de tiempos que cambia de dirección la corriente eléctrica.
<b>Generador eléctrico (alternador)</b>	Es el componente que, tomando energía mecánica del eje de la turbina, entrega energía eléctrica para su utilización.
<b>Hélice</b>	Propulsor mecánico que produce una fuerza, o empuje, a lo largo del eje de rotación cuando gira en un fluido

<b>Manómetro</b>	Instrumento utilizado para medir presiones.
<b>Rotor</b>	Disco o bastidor circular diseñado para girar sobre un eje que pasa por su centro
<b>Sobre presión</b>	Presión superior a la adecuada.
<b>Tobera</b>	Abertura tubular, primitivamente de forma cónica, por donde se introduce el aire en un horno o una forja, fragua o crisol.
<b>Turbina</b>	Es un motor rotativo que convierte en energía mecánica la energía potencial de una corriente de agua, vapor de agua o gas.
<b>Turbina hidráulica</b>	Es un elemento que aprovecha la energía cinética y potencial del agua para producir un movimiento de rotación.
<b>Turbina de vapor</b>	Es un elemento que aprovecha la energía del vapor, utilizando también la energía cinética de este.



## RESUMEN

En el presente trabajo de graduación encontrará la información necesaria, para conocer los principios básicos en una micro-central hidroeléctrica, específicamente de una turbina tipo Michell Banki. Se adjuntó información como por ejemplo: la historia de la generación eléctrica, clasificaciones de las micro-centrales y los componentes de las micro-centrales. El presente trabajo se encuentra dividido en cuatro capítulos.

El primer capítulo contiene la historia de la generación eléctrica, composición de una instalación, definición de las micro-centrales hidroeléctricas, clasificaciones según la potencia obtenida ó según la modalidad y toma de agua, conceptos básicos de electricidad. El segundo capítulo trata de las turbinas, clasificación, generalidades y teoría de operación de los distintos tipos de turbinas hidráulicas.

El tercer capítulo presenta información de la turbina tipo Michell Banki: historia de la turbina, partes de la turbina, funcionamiento de la turbina y también analizamos el diseño hidráulico de la turbina

El cuarto capítulo presenta los componentes de la micro-central hidroeléctrica tipo Michell Banki, el procedimiento para realizar el ensayo y las tablas con los datos obtenidos en el ensayo realizado.



## **OBJETIVOS**

### **General**

Resaltar la importancia de conocer las aplicaciones de fuentes de energía renovable, como de la que procede de la mini y micro-centrales hidroeléctricas, que son fuentes de energías renovables.

### **Específicos**

1. Calcular la potencia hidráulica del prototipo de la turbina tipo Michell Banki, que se encuentra en el laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.
2. Proporcionar ecuaciones directas de cálculo del caudal que circula por la maquinaria hidráulica en función de la altura piezométrica, “h”.
3. Elaborar y proponer la práctica a realizar en el laboratorio del curso MÁQUINAS HIDRÁULICAS de la turbina antes mencionada.



## INTRODUCCIÓN

La energía del agua que fluye se puede utilizar para generar electricidad, o para hacer otras clases de trabajo útil. Generando electricidad de esta manera se llama generación hidroeléctrica.

Las plantas de generación hidroeléctricas vienen en todos los tamaños de las plantas enormes que producen más electricidad que la mayoría de las naciones pueden utilizar a las plantas muy pequeñas que proveen la electricidad para una sola casa.

Las plantas hidroeléctricas más pequeñas a menudo se llaman las plantas micro-hidroeléctricas. Esta investigación trata solamente de las plantas micro-hidroeléctricas y en especial de un prototipo de micro-hidroeléctrica que tiene una turbina tipo Michell Banki. Micro-hydro se define generalmente como las que tienen una capacidad de generación hasta de cerca de 15 kilovatios.

Las turbinas hidráulicas tienen como misión transformar la energía potencial y energía cinética del agua en energía mecánica de rotación.

El hecho de utilizar uno u otro modelo de micro turbina dependería fundamentalmente de la tecnología y capacidad técnica con la que se cuenta para construir las.



## **1. ANTECEDENTES GENERALES**

### **1.1. Historia de la generación hidroeléctrica**

Las ruedas de agua se han utilizado desde épocas antiguas, para hacer tareas laboriosas. Las primeras turbinas hidráulicas modernas fueron desarrolladas en la primera parte del siglo XIX, por el Ingeniero Civil Benoît Fourneyron (St-Etienne 1802 - Paris 1867), en Francia. Éstas fueron desarrolladas más a fondo por un número de investigadores durante el centro del siglo XIX, de modo que por el año de mil ochocientos noventa (1,890) los tipos de turbinas ahora en uso hubieran sido más inventadas.

La invención de Thomas Edison, de la luz eléctrica y de maneras de distribuir electricidad ocurrió casi en el mismo tiempo, conduciendo a un gran auge en el desarrollo hidroeléctrico en Europa y Norteamérica. Hasta sobre los años veinte (20), la mayoría de los progresos hidroeléctricos eran absolutamente pequeños, en la gama del tamaño que ahora se llama mini-hidroeléctrica o aún micro-hidroeléctrica.

Esta situación estaba por dos razones: la primera era que la gente no sabía construir las presas, las turbinas eran demasiado grandes, y la segunda los sistemas hidroeléctricos pequeños hicieron difícil de generar cantidades grandes de electricidad. Generalmente, los sistemas mini-hidroeléctricos serían utilizados para accionar una ciudad y sus alrededores, mientras que los sistemas micro-hidroeléctricos fueron utilizados en granjas y ranchos aislados para proporcionar energía.

Durante la era de los años cincuenta (50) y de los años sesenta (60), la tecnología que avanzaba y el aceite barato, combinados con la transmisión eléctrica interurbana mejorada, permitieron vender la electricidad más barata de lo que las plantas hidráulicas pequeñas anteriormente mencionadas podrían hacerlo.

Muchos centenares de instalaciones hidroeléctricas pequeñas fueron abandonadas o desmontadas durante este período. Esta situación se dio por el embargo del aceite en el año de mil novecientos setenta y tres (1973), lo que condujo a los aumentos enormes en el costo de aceite, con esto acontecimiento el hydro- pequeño aparece de nuevo compitiendo.

Muchas de las plantas primeras que fueron abandonadas en los años cincuenta (50) y los años sesenta (60) ahora se están restaurando, y muchas nuevas plantas se están desarrollando es decir, se está animando al hydro-pequeño mediante sus gobiernos y organizaciones del desarrollo, ya que esto será de mucha ayuda en los países en vías de desarrollo, todo esto para reducir las importaciones de los productos derivados del petróleo y animar el desarrollo de la Micro-hidroeléctrica,

La mayor importancia de las micro-centrales hidroeléctricas es proporcionar energía eléctrica para utilizar los servicios tan importantes como: iluminación, y medios de comunicaciones tales como televisión y radio, en áreas lejanas de los sistemas principales de la energía eléctrica.

La micro-hidroeléctrica desempeña así un papel importante en promover el desarrollo rural en áreas alejadas.

## **1.2. Composición de una instalación hidroeléctrica**

Una instalación hidroeléctrica, está formada por componentes hidráulicos y componentes electromecánicos tales como: sistema de captación de agua, tomas de agua, sistema de canalización y de restitución, etc.; turbina, generador eléctrico, circuitos eléctricos, sistemas de mando; respectivamente.

El agua procedente de los sistemas de toma de agua, es canalizada, a través de canales o conductos, a la cámara de carga, que determina el nivel del canal a cielo abierto superior, necesario en función del salto o altura útil para la micro-central hidroeléctrica.

Desde este punto, el agua es canalizada a las turbinas a través de conductos forzados y al pasar, por las paletas móviles o rotores, determina su rotación. El eje del rotor que gira está conectado a un generador eléctrico; el agua que sale de la turbina es devuelta, a través de los sistemas de restitución a su curso original, a un nivel determinado por el canal a cielo abierto inferior.

## **1.2. Definición de las micro-centrales hidroeléctricas**

Micro central-hidroeléctrica es el término con el que la Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (UNIDO), denomina a las centrales hidroeléctricas de potencia inferior a diez mega watts (10 MW).

Por "Micro central Hidroeléctrica vamos a identificar a una instalación destinada a la producción de energía hidroeléctrica en pequeña escala.

Con distintos rangos de potencia se han establecido los límites entre Pico, Micro, Mini y Pequeñas Centrales, pudiendo decirse que el orden de magnitud es el siguiente:

### 1.3.1. Clasificación de las micro-centrales hidroeléctricas, según la potencia obtenida

La clasificación de los sistemas de mini-hidráulicos es una convención útil para reflejar diferentes modalidades de funcionamiento y se presenta en la siguiente tabla

Tabla I. **Clasificación de las micro-centrales hidroeléctricas**

<b>Pico</b>	centrales	$P < 5\text{kW}$
<b>Micro</b>	centrales	$P < 100\text{kW}$
<b>Mini</b>	centrales	$P < 1000\text{ kW}$
<b>Pequeñas</b>	centrales	$P < 10000\text{ kW}$

### 1.3.2. Clasificación según la modalidad y acumulación del agua

Otra forma de clasificar las centrales hidroeléctricas, es en base a su funcionamiento, esto en relación con la modalidad de toma y acumulación de las aguas; siendo estas las siguientes.

### **1.3.2.1. Centrales de agua fluente**

Estas centrales son las que no están reguladas; es decir el caudal de agua varía durante el año en función del régimen hidrológico del curso de agua.

### **1.3.2.2. Centrales de flujo regulado**

Estas centrales se encuentran situadas aguas abajo de los embalses, destinados a usos hidroeléctricos o ha otros fines y en los que se pueden regular las aguas a través de un depósito de regulación diario, semanal o mensual.

## **1.4. La física de una instalación micro-hidroeléctrica**

Las turbinas hidráulicas utilizan la energía potencial que tiene una masa de agua en un desnivel, llamado salto o altura útil, existente entre las dos secciones de canal a cielo abierto, la superior (aguas arriba) y la inferior (aguas abajo).

La transformación de la energía potencial del agua en energía mecánica se realiza a través de turbinas, que se activan gracias a la masa de agua que pasa por su interior. A su vez, la potencia mecánica en el eje de la turbina se puede utilizar directamente para realizar trabajo (como en los molinos de agua) o para producir energía eléctrica, conectando el eje de la turbina, a través de reductores adecuados, a un generador eléctrico.

## 1.5. Principios básicos de la electricidad

### 1.5.1. Energía eléctrica

La energía eléctrica se mide en unidades llamadas vatios (V), y para las cantidades grandes de energía en unidades de kilovatios (kv). *La corriente eléctrica* se puede definir como: la cantidad de electricidad que atraviesa un alambre o por ejemplo como la cantidad de agua que atraviesa una tubería, mientras que el *voltaje* se puede definir como la medida de fuerza necesaria para empujar la corriente.

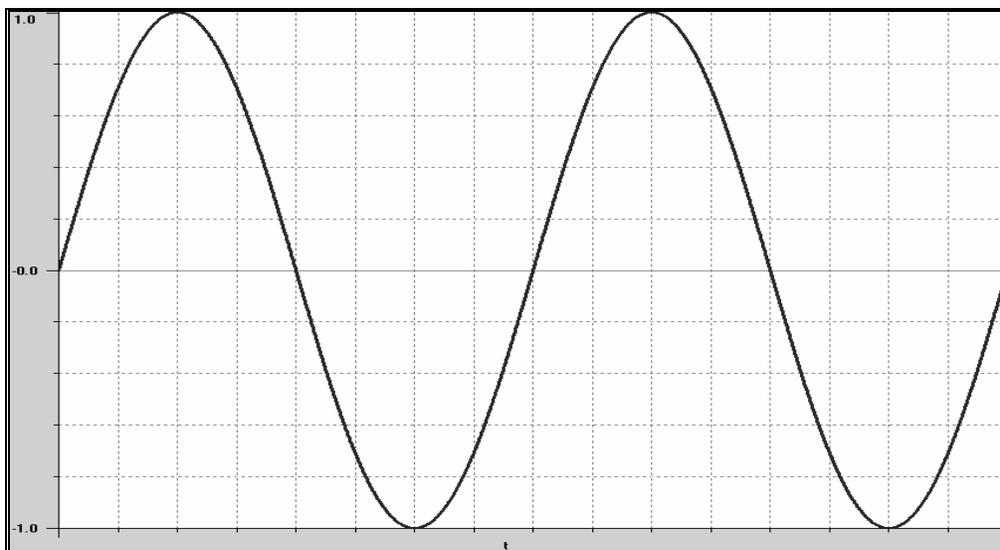
La corriente se mide en amperios, mientras que el voltaje se mide en voltios. *La energía eléctrica* se mide en vatios que es igual al producto de la corriente y del voltaje.

### 1.5.2. Corriente alterna

Se denomina corriente alterna, a la corriente eléctrica en la que la magnitud y dirección varían cíclicamente; abreviada en español CA y en inglés AC. La forma de onda de la corriente alterna comúnmente utilizada es la de una onda senoidal (ver figura 1), puesto que se consigue una transmisión más eficiente de la energía. Sin embargo, en ciertas aplicaciones se utilizan otras formas de onda periódicas, tales como la triangular o la cuadrada.

Utilizada genéricamente, la corriente alterna (CA) se refiere a la forma en la cual la electricidad llega a los hogares y a las empresas. Igualmente, las señales de audio y de radio transmitidas por los cables eléctricos, son también ejemplos de corriente alterna. En estos usos, lo importante suele ser la transmisión y recuperación de la información codificada sobre la señal de la corriente alterna (CA).

Figura 1. Gráfica de la corriente alterna.



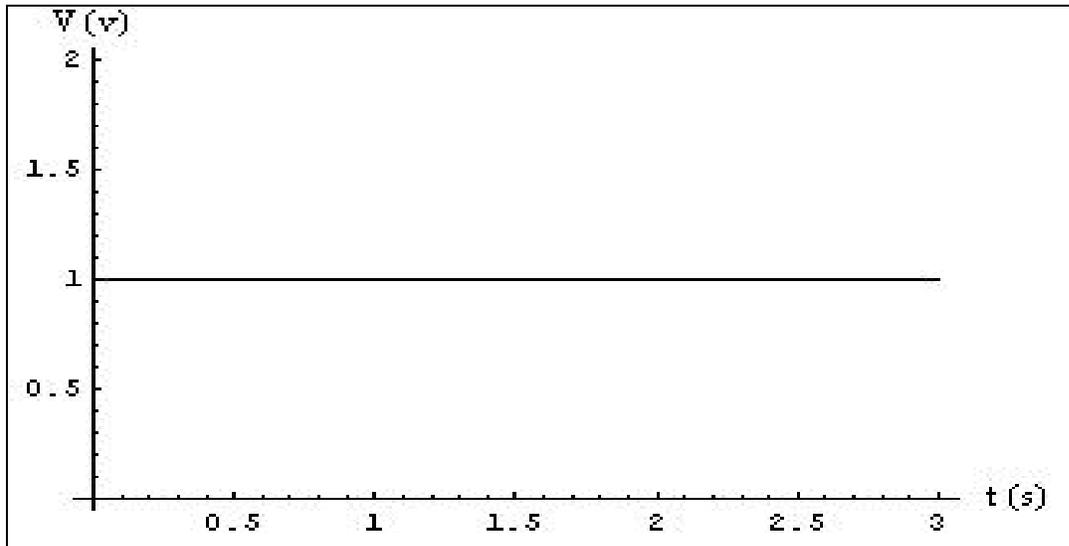
Fuente//[http. Wikipedia.org/Corriente\\_alterna](http://Wikipedia.org/Corriente_alterna)

### 1.5.3. Corriente directa

La corriente directa, es la que tiene un único sentido de circulación (véase figura 2). Es la producida por las pilas y por los adaptadores corriente alterna –corriente directa (AC-DC). Su descubrimiento se remonta a la invención de la primera pila por parte del científico Conde Alessandro Volta en el año mil ochocientos sesenta (1860).

La primera aplicación comercial de este tipo de corriente ocurrió en los inicios de los sistemas de distribución de energía eléctrica, a instancias del inventor estadounidense Thomas Alva Edison. A partir del año de mil ocho cientos noventa y tres 1893, este sistema fue sustituido por el de corriente alterna (AC) propuesto por el inventor serbo-estadounidense Nikola Tesla, sobre cuyos desarrollos se construyó la primera central hidroeléctrica en las Cataratas del Niágara.

Figura 2. **Gráfica corriente directa.**



Fuente// [wikipedia.org/Corriente\\_directa](http://wikipedia.org/Corriente_directa)

#### 1.5.4. Diferencias de corriente alterna y corriente directa.

La electricidad de la corriente alterna (CA) se genera de una manera que le hace cambiar de dirección (Alternante) muchas veces cada segundo. El número de tiempos que cambia la dirección se llama la *frecuencia*.

La electricidad de la corriente directa (DC) no cambia de direcciones; fluye siempre en el mismo sentido. Una turbina puede producir los dos tipos de corriente es decir: corriente alterna (CA) y corriente directa (DC). Los dos tipos de corriente no pueden siempre utilizarse para los mismos objetivos, la producción de los tipos de corriente exige instalaciones y equipo de materiales más costosos.

Varios factores deben considerarse en decidir si se instalará una unidad del poder de corriente alterna o unidad del poder de corriente continúa. La demanda para la energía variará probablemente de vez en cuando en el día.

Un flujo constante de agua en la entrada de la turbina, hará que la potencia de salida de la turbina sea constante y esto excederá a veces la potencia de demanda del día.

Al producir la corriente alterna (CA), el flujo del agua o el voltaje necesitarán regularse porque la corriente alterna (CA) no puede ser almacenada. Cualquier tipo de regulación requiere el equipo adicional que puede agregar substancialmente al costo de la instalación hidroeléctrica.

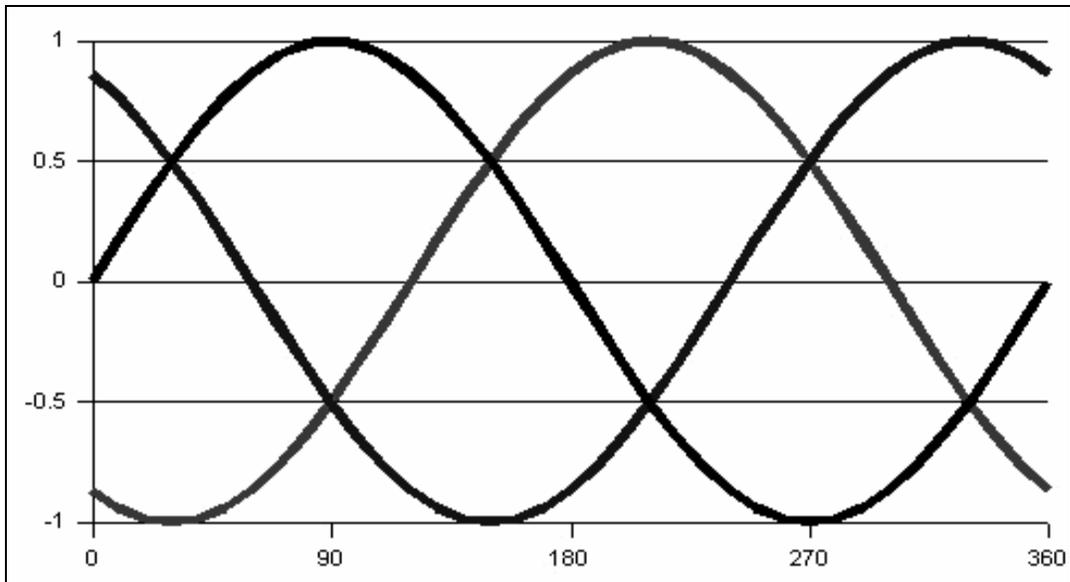
El flujo del agua a una turbina que produce corriente directa DC, no tienen que ser regulados. Ya que el exceso de la energía se puede almacenar en baterías. Los generadores y las baterías de almacenaje actuales son relativamente de bajo costo, ya que su producción es en serie.

#### **1.5.5. Corriente trifásica**

La corriente trifásica está formada por un conjunto de tres formas de onda, desfasadas una respecto a la otra ciento veinte grados ( $120^0$ ), según el diagrama que se muestra en la *figura 3*.

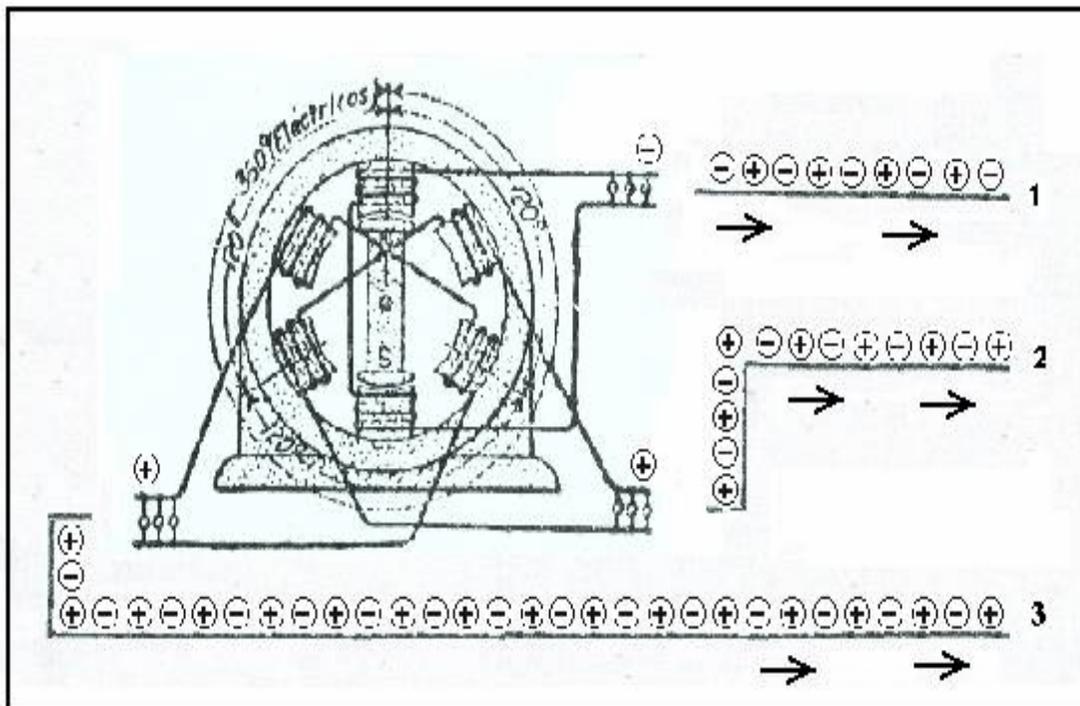
Las corrientes trifásicas se generan mediante generadores eléctricos dotados de tres bobinas o grupos de bobinas (véase figura 4), arrolladas sobre tres sistemas de piezas polares equidistantes entre sí. El retorno de cada uno de estos circuitos o fases se acopla en un punto, denominado neutro, donde la suma de las tres corrientes es cero, con lo cual el transporte puede ser efectuado usando solamente tres cables.

Figura 3. Gráfica de corriente trifásica.



Fuente// [wikipedia.org/corriente\\_trifasica](http://wikipedia.org/corriente_trifasica)

Figura 4. Diagrama de un alternador trifásico



Fuente <http://images.google.com.gt/imgres?imgurl=http://>

## **2. TURBINAS**

### **2.1. Definición de turbina**

La turbina es un motor rotativo, que convierte en energía mecánica la energía potencial de una corriente de agua, vapor de agua o gas.

El elemento básico de la turbina es el rodete o rotor, que cuenta con palas, hélices, cuchillas o cubos colocados alrededor de su circunferencia, de tal forma que el fluido en movimiento, produce una fuerza tangencial que impulsa la rueda y la hace girar. Esta energía mecánica se transfiere a través de un eje para proporcionar el movimiento de una máquina, un compresor, un generador eléctrico.

### **2.2. Clasificación de las turbinas**

En las turbinas tenemos la siguiente clasificación: turbinas hidráulicas, turbinas de vapor y turbinas de combustión. Hoy la mayor parte de la energía eléctrica mundial se produce, utilizando generadores movidos por turbinas. Los molinos de viento que producen energía eléctrica se llaman turbinas de viento ó eólicas.

#### **2.2.1 Turbinas hidráulicas**

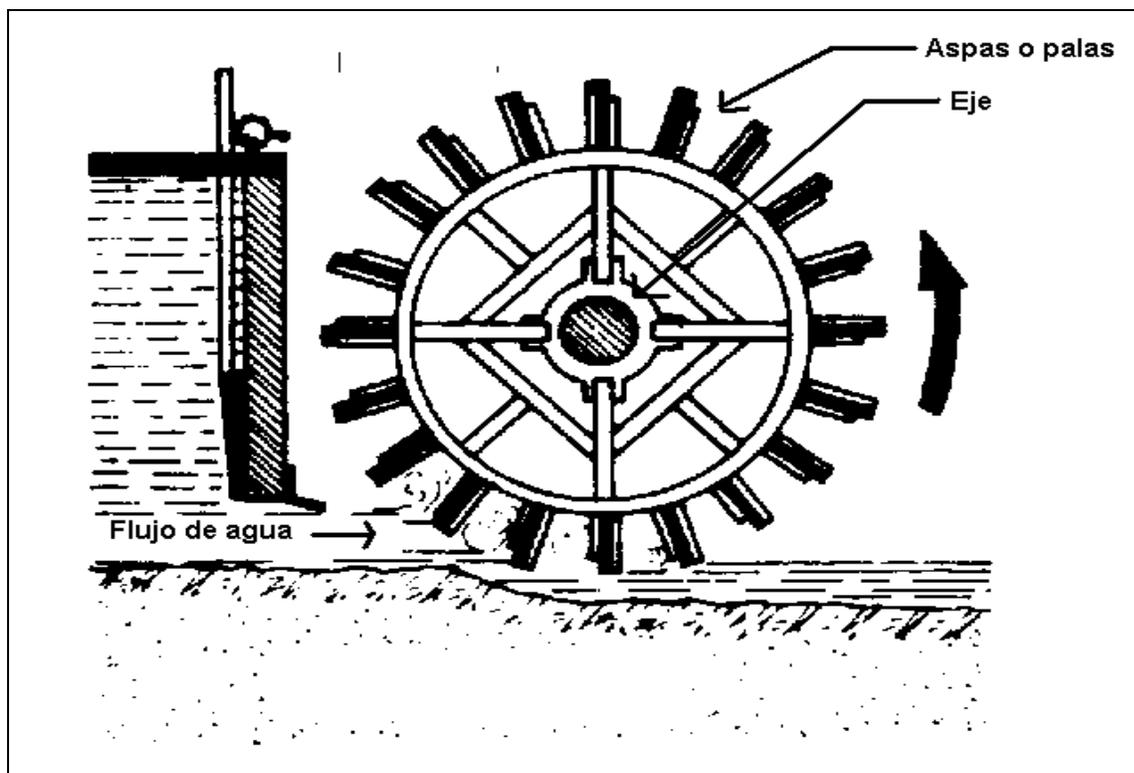
Una turbina hidráulica es un elemento que aprovecha la energía cinética y potencial del agua para producir un movimiento de rotación que, transferido mediante un eje, mueve directamente una máquina o bien un generador que transforma la energía mecánica en eléctrica.

El tipo más antiguo y más simple de turbina hidráulica es la rueda hidráulica, utilizada por primera vez en Grecia y utilizada durante la antigüedad y la edad media para moler cereales.

Esta rueda hidráulica consistía en un eje vertical con un conjunto de aspas o palas radiales situadas en una corriente de agua a gran velocidad. La potencia de la rueda era de unos 0,5 caballos de vapor (CV).

La rueda hidráulica horizontal (o sea, un eje horizontal conectado a una rueda de palas vertical), descrita por primera vez por el arquitecto e ingeniero romano Vitrubio en el siglo I a.C., tenía el segmento inferior de la rueda de palas insertada en la corriente, y actuaba como una rueda hidráulica de empuje inferior. **Véase figura 5**

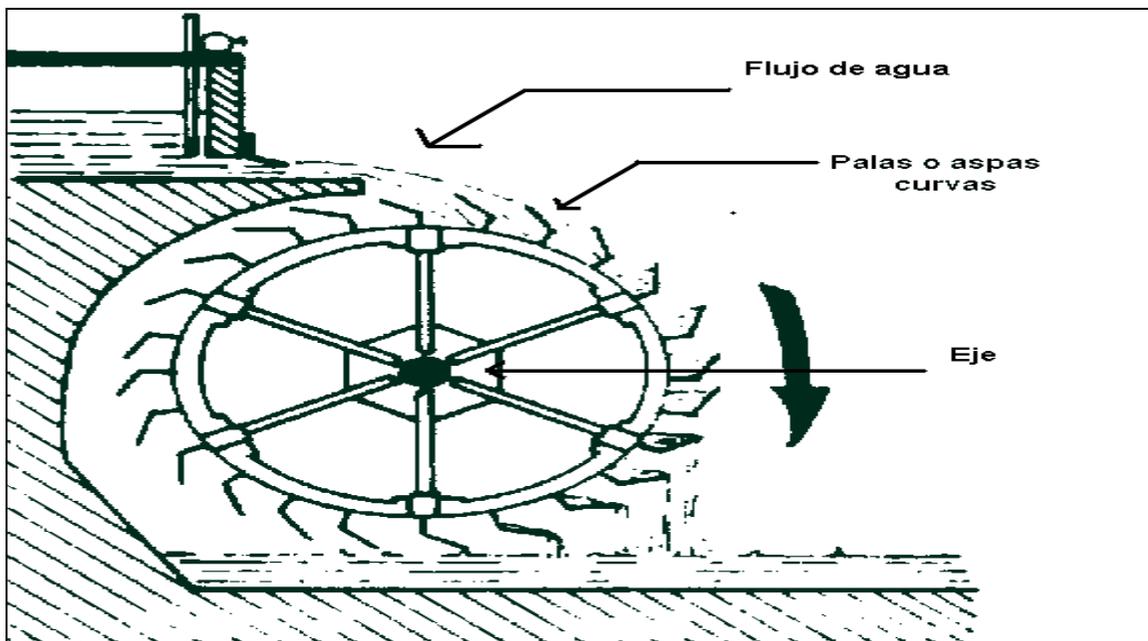
Figura 5. Rueda hidráulica de empuje inferior



Fuente//images.google.com.gt/imgres?imgurl=http://rueda\_hidraulica\_empuje\_inferior

Hacia el siglo II d.C. se empezó a utilizar en las regiones montañosas la rueda hidráulica de empuje superior. En este caso, el agua se vertía sobre las palas desde arriba, y se obtenía energía adicional de la inercia del agua en su caída. En la edad media la potencia máxima de la rueda, fabricada con madera, aumentó de 3 hasta 50 caballos de vapor (CV).

Figura 6. Rueda hidráulica de empuje superior



Fuente//images.google.com.gt/imgres?imgurl=http://rueda\_hidraulica\_empuje\_inferior.

La transición de la rueda hidráulica a la turbina es sobre todo semántica. El primer intento de formular la base teórica para el diseño de ruedas hidráulicas en el siglo XVIII corresponde al ingeniero civil británico John Smeaton, que demostró que la rueda de empuje superior era más eficaz. Sin embargo, el ingeniero militar francés Jean Victor Poncelet diseñó una rueda de empuje inferior, cuyas palas curvadas aumentaban el rendimiento casi un 70%. **Véase figura 6**

El uso de esta máquina se extendió rápidamente. Otro ingeniero militar francés, Claude Burdin, inventó el término turbina, como parte de un análisis teórico en que se daba una gran importancia a la velocidad de rotación.

Benoit Fourneyron, un alumno de Burdin en la Escuela de Minería de Saint Étienne, diseñó y construyó ruedas que alcanzaban velocidades de rotación de sesenta revoluciones por minuto (60 rpm) o más y que proporcionaban hasta cincuenta caballos de vapor (50 CV).

Por último, Fourneyron construyó turbinas que trabajaban a dos mil trescientas revoluciones por minuto (2.300 rpm), desarrollando sesenta caballos de vapor (60 CV) y un rendimiento de más del 80%.

A pesar de esta eficiencia excepcional, la turbina de Fourneyron tenía algunos inconvenientes causados por el flujo centrífugo del agua que la atravesaba. Esto provocaba problemas si se reducía el flujo de agua o su carga.

### **2.2.2. Turbinas de vapor**

El éxito obtenido con las turbinas hidráulicas condujo a utilizar el principio de la turbina para extraerle la energía al vapor del agua. Mientras que la máquina de vapor de vaivén desarrollada por Watt utilizaba la presión del vapor, la turbina consigue mejores rendimientos al utilizar también la energía cinética de éste.

La turbina puede ser más pequeña, más ligera y más barata que una máquina de vapor de vaivén de la misma potencia, y puede ser de un tamaño mucho mayor que las máquinas de vapor convencionales.

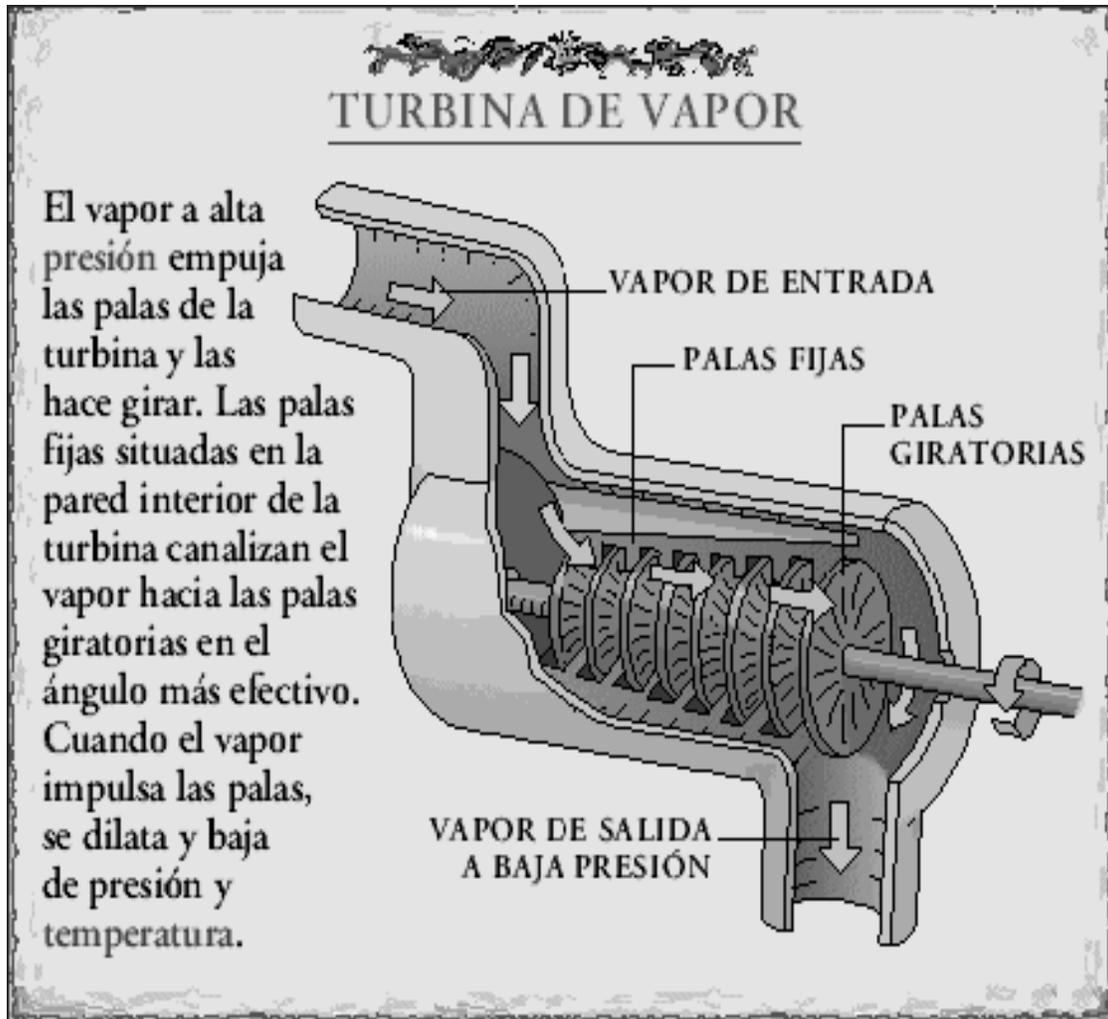
Desde el punto de vista de la mecánica, tiene la ventaja de producir directamente un movimiento giratorio sin necesidad de una manivela o algún otro medio de convertir la energía de vaivén en energía rotatoria. Como resultado de ello, la turbina de vapor ha reemplazado a las máquinas de vaivén en las centrales generadoras de energía eléctrica, y también se utiliza como una forma de propulsión a chorro.

Las turbinas de vapor se utilizan en la generación de energía eléctrica de origen nuclear y en la propulsión de los buques con plantas nucleares. En las aplicaciones de cogeneración que requieran tanto calor (el utilizado en un proceso industrial) como electricidad, se genera vapor a altas presiones en una caldera y se extrae desde la turbina a la temperatura y la presión que necesita el proceso industrial.

Las turbinas de vapor pueden utilizarse en ciclos (escalones) combinados con un generador de vapor que recupera el calor que se perdería. Las unidades industriales se utilizan para poner en movimiento máquinas, bombas, compresores y generadores eléctricos. La potencia que se obtiene puede ser de hasta mil trescientos mega watt (1.300 MW).

La turbina de vapor no fue inventada por una única persona, sino que fue el resultado del trabajo de un grupo de inventores a finales del siglo XIX. Algunos de los participantes más notables en este desarrollo fueron el británico Charles Algernon Parsons y el sueco Carl Gustaf Patrik de Laval. Parsons fue responsable del denominado principio de escalones, mediante el cual el vapor se expandía en varias fases **véase figura 7**, aprovechándose su energía en cada una de ellas.

Figura 7. Rotor de una turbina de vapor



Fuente // [www..wikipedia.org/wiki/Turbina\\_de\\_vapor](http://www..wikipedia.org/wiki/Turbina_de_vapor)

### 2.3. Clasificación de turbinas hidráulicas, según su principio de funcionamiento

La división más importante en los tipos de turbina se refiere a su principio de funcionamiento. Se clasifican en Turbinas de Acción y Turbinas de Reacción. Las diferencias de estos tipos de turbina se describirán a continuación:

### 2.3.1. Generalidades de las turbinas de acción

- En la parte superior y en la parte inferior del rodete existe la misma presión, que es generalmente la presión atmosférica.
- El agua, al entrar en el rodete, tiene únicamente energía cinética.
- Se aprovecha por regla general solamente altura dinámica ( $H_{din}$ ).
- Se utilizará esta clase de turbinas en los grandes saltos, ya que en estos la altura perdida resulta de muy escasa importancia.

En conclusión la turbina de acción es aquella que aprovecha únicamente la velocidad del agua, es decir su energía cinética. El modelo más habitual es la turbina Pelton, que consta de un disco circular o rodete que tiene montados unos álabes o cucharas de doble cuenca. También existen otros modelos como la turbina la turbina Michell Banki.

### 2.3.2 Generalidades turbinas de reacción

- Entre la parte superior e inferior del rodete existe una diferencia de presión.
- El agua tiene, al entrar en el rodete, energía cinética y energía potencial.
- Al moverse el agua por los espacios que hay entre los álabes del rodete, que se encuentran llenos de agua, ocurre una aceleración; así pues, en el mismo álabe se transforma aún parte de la energía potencial en cinética. El chorro de agua que sale, ejerce entonces una reacción sobre la cámara de álabes, cuya componente horizontal se convierte en una fuerza periférica.

- Como signo exterior se añade el siguiente: el rodete se encuentra unido, en general, al canal de desagüe por un tubo de aspiración.
- Resulta de aquí que se aprovecha todo el salto  $H$ , en parte por efecto de presión y en parte por efecto de aspiración.
- Empleo lógico de este tipo de turbinas: especialmente en todos los aprovechamientos de pequeña o mediana altura.

La turbina de reacción aprovecha tanto la velocidad del agua como la presión que le resta a la corriente en el momento de contacto. Las más utilizadas entre las de reacción son la turbina Francis y la turbina Kaplan. Estas suelen tener cuatro elementos fundamentales: carcasa o caracol, distribuidor, rodete y tubo de aspiración.

## **2.4. Teoría de operación y tipos de turbinas de acción**

El tipo de turbina de acción más conocido es la turbina Pelton, que se emplea generalmente para saltos de agua de gran altura, más de cincuenta metros (50 m),

### **2.4.1. Turbina Pelton**

La rueda Pelton, cuyo nombre proviene del ingeniero estadounidense Lester Allen Pelton, se empezó a aplicar durante la segunda mitad del siglo XIX, en instalaciones donde la presión del agua era equivalente a una columna de agua de entre noventa y novecientos metros (90 y 900 m).

En este tipo de turbinas el agua se conduce desde un depósito a gran altura a través de un canal o una conducción forzada hasta una boquilla eyectora que convierte la energía cinética del agua en un chorro a presión. Dado que la acción de la rueda Pelton depende del impulso del chorro sobre ella, en lugar de la reacción del agua en expansión.

#### **2.4.1.1. Teoría de operación**

El principio de la antigua rueda hidráulica, es sintetizado en la moderna rueda Pelton que consiste en una rueda provista de paletas en forma de cucharas alrededor de la periferia.

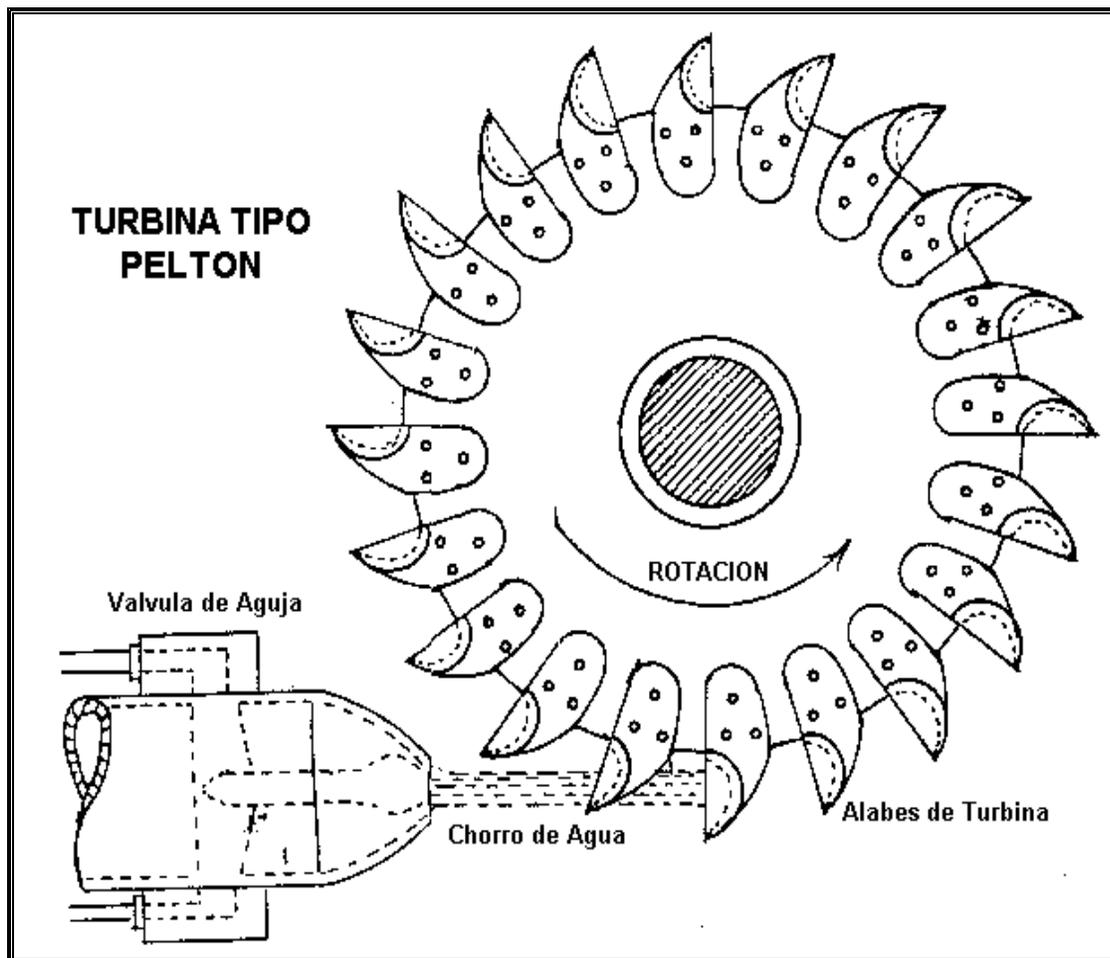
La turbina Pelton, pertenece al grupo de turbinas de impulso (o chorro libre), donde la altura disponible se convierte en energía cinética a presión atmosférica. La energía se extrae del chorro de agua de alta velocidad cuando incide sobre la cuchara del rotor. Este tipo de turbina se aplica normalmente al rango de grandes alturas de caída (más de 40 m).

Desde el punto de vista de diseño, existe adaptabilidad para diferentes caudales y alturas. La turbina Pelton puede estar equipada con una, dos o más toberas para mayores salidas. En la fabricación se usa comúnmente la fundición para el rotor, siendo los materiales, acero o bronce. Esto requiere una infraestructura industrial apropiada.

Un chorro de agua de alta velocidad, emerge de una tobera incidiendo en las paletas y poniendo la rueda en movimiento. La velocidad de rotación, está determinada por la magnitud de caudal y la velocidad del agua es controlada por medio de una aguja en la tobera (la turbina funciona más eficientemente cuando la rueda gira a un medio de la velocidad del chorro).

Si la carga en la rueda disminuye súbitamente, el deflector de chorro desvía parcialmente el chorro que proviene de la tobera hasta que la aguja ha reducido adecuadamente el caudal. Este arreglo es necesario debido a que, si en la eventualidad de una disminución súbita de la carga, la aguja fuera cerrada rápidamente, el flujo de agua se reducirá demasiado abruptamente, causando el dañino fenómeno del "golpe de ariete" en el sistema hidráulico. En la mayoría de los casos, el control del deflector se conecta a un generador eléctrico.

Figura 8. Turbina tipo Pelton



Fuente //www.lagos-plantas-hidro.com/plantas.html

### **2.4.2. Turbina Michell Banki**

La característica principal de la turbina de flujo cruzado es el chorro de agua de sección transversal rectangular que pasa dos veces a través de los álabes del rotor, ubicados en la periferia del rotor cilíndrico, perpendicular al eje de éste. El agua fluye a través de los álabes, primero desde la periferia hacia el centro y entonces, después de cruzar el espacio abierto del rotor, desde dentro hacia fuera.

La conversión de energía tiene lugar dos veces; primero en la incidencia del agua sobre el álabe en la entrada y luego cuando el agua golpea el álabe en el escape desde el rotor. El uso de dos etapas de trabajo no ofrece ventajas particulares, excepto ser un medio simple y efectivo de descargar el agua desde el rotor.

#### **2.4.2.1 Teoría de operación de turbina Michell Banki**

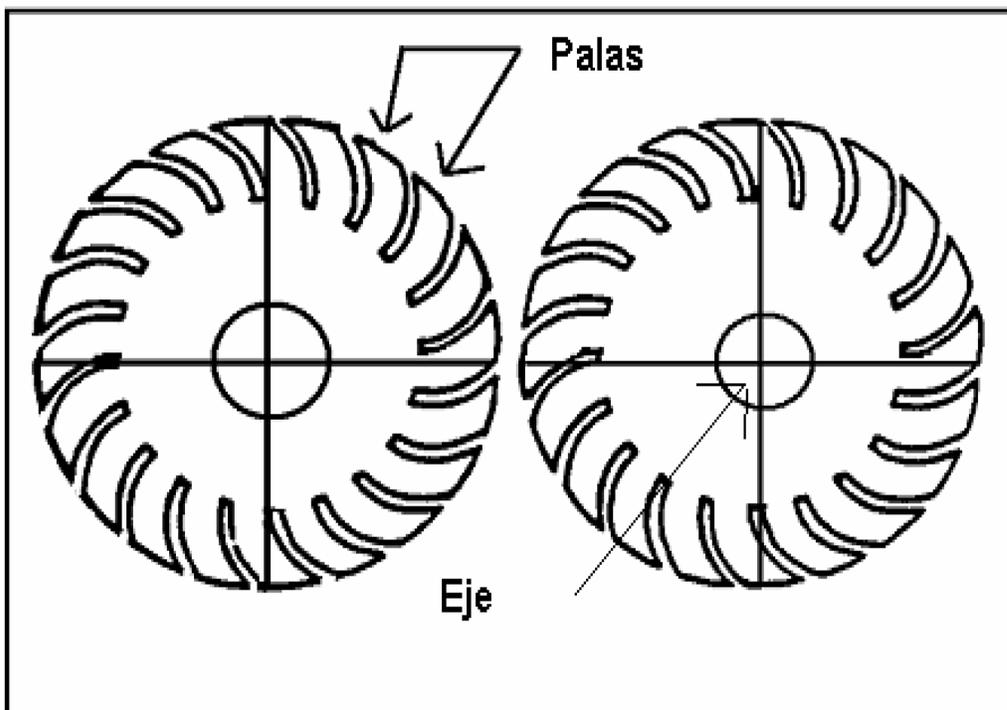
Es una turbina de libre desviación, de admisión radial y parcial. Debido a su número específico de revoluciones cuenta entre las turbinas de régimen lento. El distribuidor imprime al chorro de agua una sección rectangular, y éste circula por la corona de paletas del rodete en forma de cilindro.

La máquina se clasifica normalmente como una turbina de impulso. Esto no es estrictamente correcto y probablemente está basado en el hecho que el diseño original fue verdaderamente una turbina de presión constante. Un espacio suficientemente grande fue dejado entre el inyector y el rotor, de modo que el chorro entra al rodete sin presión estática. Los diseños modernos se construyen usualmente con un inyector que cubre un mayor arco de la periferia del rodete. Con esta medida se incrementa el flujo unitario, permitiendo mantener pequeño el tamaño de la turbina.

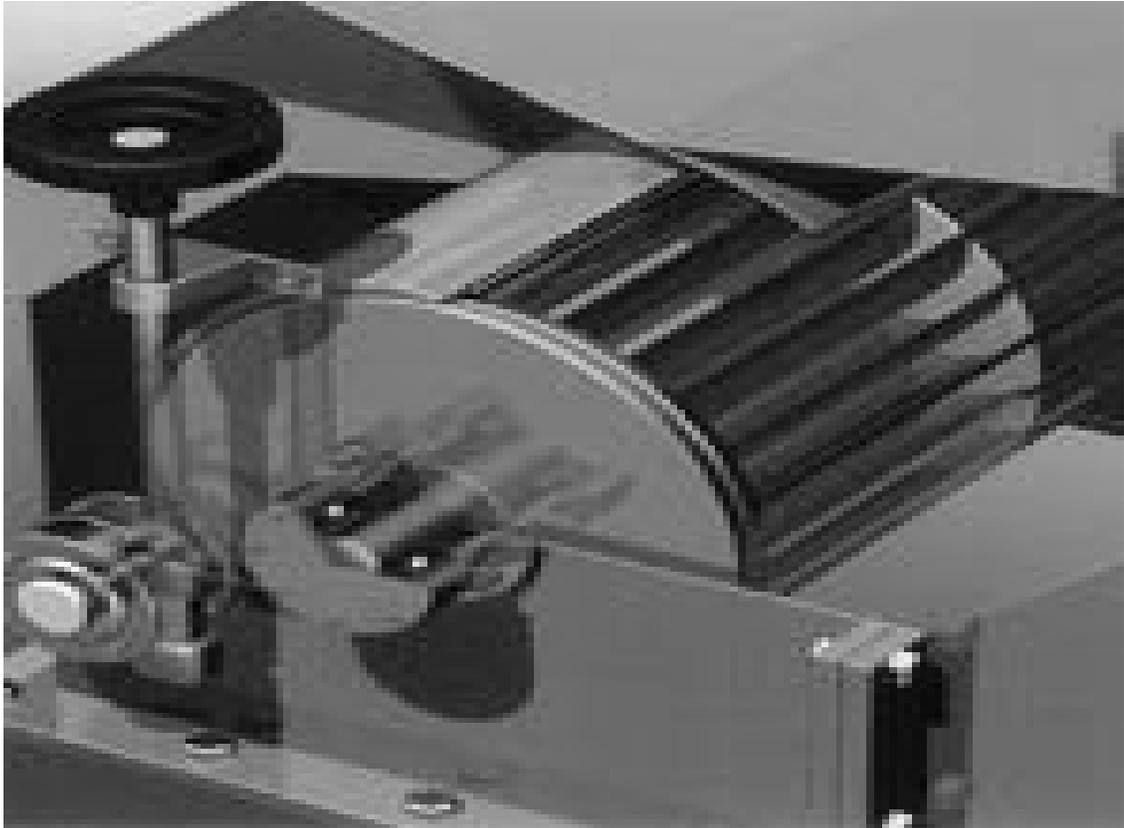
Estos diseños trabajan como turbinas de impulso solo con pequeñas aberturas de compuerta cuando el flujo reducido no llena completamente el pasaje entre álabes y la presión dentro del rodete es, entonces, la atmosférica. Con caudales crecientes, que llenan completamente los pasajes entre álabes, hay una pequeña presión positiva; la turbina trabaja ahora como una máquina de reacción.

La turbina de flujo cruzado puede aplicarse sobre un rango de alturas de caída desde menos de 2 m a más de 100 m. Una gran variedad de caudales pueden acomodarse con un diámetro constante del rotor.

Figura 9. Ranuras del rotor de la turbina tipo Michell Banki



**Figura 10. Turbina tipo Michell Banki**



Fuente// [http://energoclub.it/ms/page/19/turbine\\_idroelettriche.html](http://energoclub.it/ms/page/19/turbine_idroelettriche.html)

## **2.5. Teoría de operación y tipos de turbinas de reacción**

Los principales tipos de turbina de reacción son los siguientes: turbina Francis, Hélice, turbina Kaplan, Tubular y Bulbo. La turbina Francis es muy utilizada en saltos de altura media de cinco a diez metros (5 a 100 m) y la turbina Kaplan lo es en los saltos de baja altura menos de diez metros (10 m).

### **2.5.1. Turbina Francis**

La turbina Francis fue desarrollada por James B. Francis. Se trata de una turbina de reacción de flujo interno que combina conceptos tanto de flujo radial como de flujo axial.

Las turbinas Francis son turbinas hidráulicas que se pueden diseñar para un amplio rango de saltos y caudales, siendo capaces de operar en rangos de desnivel que van de los diez metros hasta varios cientos de metros. Esto, junto con su alta eficiencia, ha hecho que este tipo de turbina sea el más ampliamente usado en el mundo, principalmente para la producción de energía eléctrica mediante centrales hidroeléctricas.

#### **2.5.1.1. Teoría de operación**

La turbina Francis es una turbina de reacción, lo cual significa que el fluido cambia de presión a medida que se desplaza a través de la turbina, perdiendo su energía. Se necesita una carcasa para contener el caudal de agua.

La admisión tiene forma de espiral. Los álabes directores dirigen el agua tangencialmente hacia el rodete. Este flujo radial actúa sobre los álabes del rodete, causando que este gire. Los álabes directores, también conocidos como álabes giratorios, pueden ser ajustables para permitir un funcionamiento eficiente en un rango amplio de condiciones del caudal de agua.

A medida que el agua se mueve a través del rodete su radio de giro disminuye, actuando sobre él. Imagínese una bola girando por dentro una cuerda alrededor de un círculo. Si se empuja la cuerda para hacerla más corta, la bola gira más rápido. Esta propiedad ayuda a las turbinas de flujo interno a extraer la energía del agua.

En la salida, el agua actúa sobre unas excepcionales tazas situadas en el rodete, que hacen su trabajo sobre el agua, dejándola sin remolinos y con muy poca energía cinética o potencial. El tubo de salida tiene una forma especialmente diseñada para ayudar a decelerar el flujo de agua y recuperar energía cinética.

Figura 11. Turbina tipo Francis



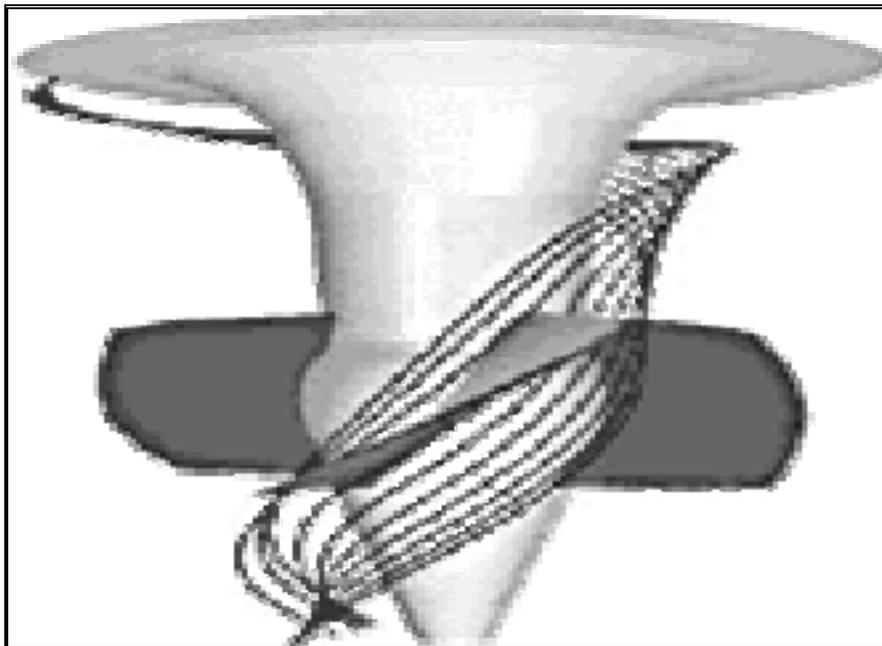
Fuente //www.topomatika.hr/Applications/turbine-en.htm

### 2.5.2. Turbina Kaplan

El aumento de las necesidades de energía hidroeléctrica durante los albores del siglo XX puso de manifiesto la necesidad de turbinas que pudieran aprovechar caídas de agua de tres a nueve metros (3-9 m), que podrían utilizarse en muchos ríos construyendo pequeños embalses de agua. En el año de mil novecientos trece (1913), el ingeniero austriaco Viktor Kaplan planteó por primera vez la turbina de hélice, que actúa al contrario que la hélice de un barco. Kaplan mejoró la turbina haciendo que las palas pudieran pivotar sobre su eje. Los distintos ángulos de las palas aumentaban el rendimiento ajustando el ángulo al volumen de la caída de agua.

*Véase figura 12*

Figura 12. **Turbina tipo Kaplan**



Fuente // [http://energoclub.it/do/page/19/turbine\\_idroelettriche.html](http://energoclub.it/do/page/19/turbine_idroelettriche.html)

### **2.5.2.1. Teoría de operación**

Las turbinas Kaplan son turbinas de agua de reacción de flujo axial, con un rodete que funciona de manera semejante a la hélice de un barco. Se emplean en saltos de pequeña altura. Las amplias palas o álabes de la turbina son impulsadas por agua a alta presión liberada por una compuerta.

Los alabes del rodete en las turbinas Kaplan son siempre regulables y tienen forma de una hélice, mientras que los álabes de los distribuidores pueden ser fijos o regulables. Si ambos son regulables, se dice que la turbina es una turbina Kaplan verdadera; si solo son regulables los álabes del rodete, se dice que la turbina es una turbina Semi-Kaplan. Las turbinas Kaplan son de admisión radial mientras que las semi-Kaplan pueden ser de admisión radial o axial.

Para su regulación, los álabes del rodete giran alrededor de su eje, accionados por unas manijas, que son solidarias de unas bielas articuladas a una cruceta, que se desplaza hacia arriba o hacia abajo por el interior del eje hueco de la turbina. Este desplazamiento es accionado por un servomotor hidráulico, con la turbina en movimiento.

Las turbinas de hélice se caracterizan porque tanto los alabes del rodete como los del distribuidor son fijos, por lo que solo se utilizan cuando el caudal y el salto son prácticamente constantes.



### **3. TURBINA TIPO MICHELL BANKI**

#### **3.1 Características generales**

La turbina de Flujo Transversal o turbina Michell-Banki es una máquina utilizada principalmente para pequeños aprovechamientos hidroeléctricos.

Basa sus ventajas fundamentalmente en un sencillo diseño y fácil construcción lo que la hace especialmente atractiva en el balance económico de un aprovechamiento en 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 seis mega watts (6 MW).

Las principales características de esta máquina son las siguientes:

- 1) La velocidad de giro puede ser seleccionada en un amplio rango
- 2) Se puede regular el caudal

#### **3.2. Composición de la turbina Michell Banki**

La turbina Michell Banki consiste en dos partes esenciales que ha continuación se describirán:

- a) El rodete o rotor
- b) El distribuidor

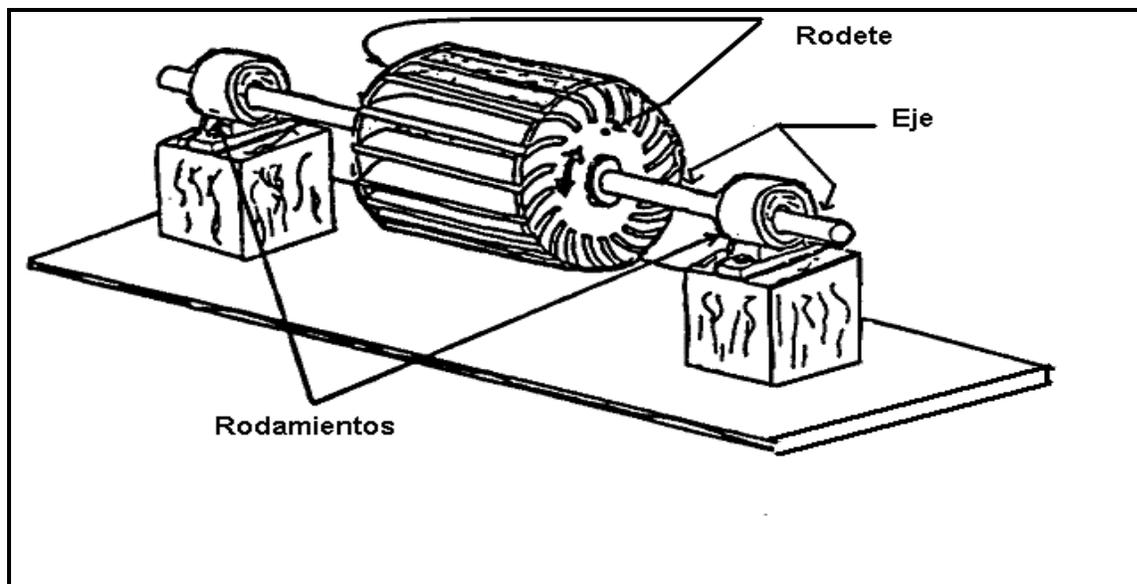
### 3.2.1. Rodete

El rodete constituye la parte esencial de la turbina. Está equipado con palas que, que están fabricadas en acero perfilado estirado blanco y ajustadas y soldadas a ambos lados en discos terminales según un procedimiento especial.

Según sea su tamaño, el rodete puede poseer un número de palas específico. Las palas curvadas linealmente sólo producen un empuje axial pequeño, este empuje axial es amortiguado por medio de los rodamientos. Véase figura 13

Antes del montaje final el eje de la turbina es sometido a un balanceo y un perfecto alineamiento.

Figura 13. Rodete de la turbina tipo **Michell Banki**



Fuente//[www.es.wikipedia.banki\\_turbine](http://www.es.wikipedia.banki_turbine)

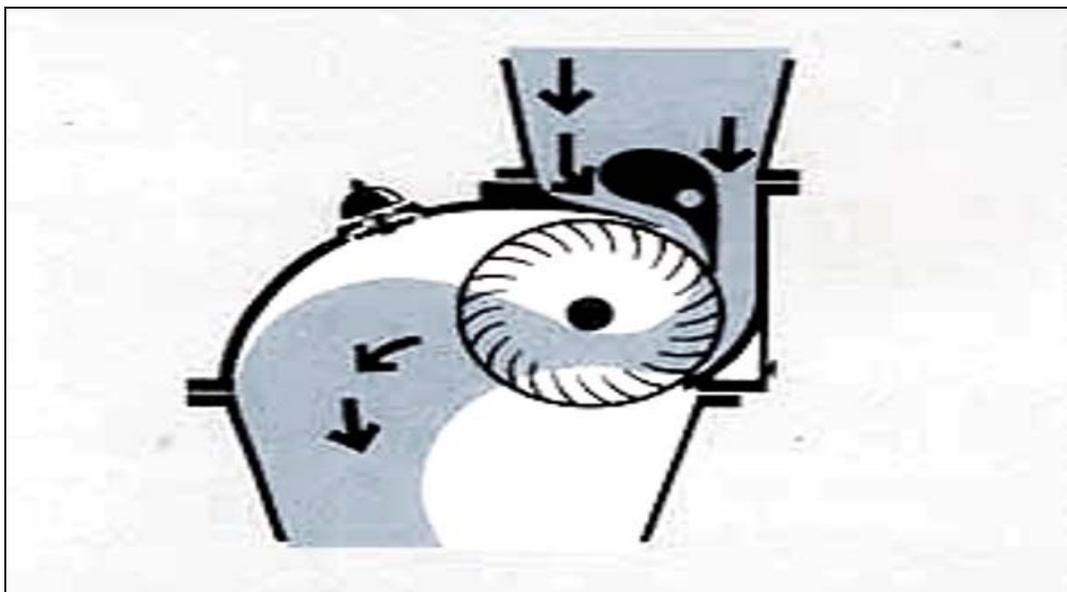
### 3.2.2. Inyector

En la turbina Michell Banki, la entrada del agua es propulsada por una bomba, este flujo de agua se gobierna por medio de palas directrices perfiladas de fuerza compensada.

Las palas directrices dividen y dirigen la corriente de agua que proviene de la bomba haciendo que ésta llegue al rodete sin efecto de golpe – con independencia de la abertura de entrada. Ambas palas giratorias se hallan perfectamente ajustadas.

Las pérdidas por fuga son tan escasas que la pala directriz puede servir de órgano de cierre. De esta manera no es preciso que se prevea ninguna válvula de cierre entre la tubería de presión y la turbina. La palas directriz puede regularse independientemente entre sí mediante una palanca reguladora a la que se acopla la regulación manual.

Figura 14. **Funcionamiento del inyector de la turbina tipo Michell Banki**



### 3.3. Historia de la turbina Michell Banki

El inventor de la turbina de flujo transversal también conocida como turbina Michell-Banki fue el ingeniero Australiano A.G.M. Michell, quien obtuvo una patente para esta máquina en el año de mil novecientos tres (1903).

La turbina fue basada en la teoría de Poncelet, ingeniero francés, año mil setecientos ochenta y ocho - mil ochocientos sesenta y siete (1788-1867) quien desarrolló la clásica rueda hidráulica de eje horizontal.

El profesor húngaro Donat Banki en la ex Alemania Occidental hizo un trabajo extensivo sobre esta máquina entre el año de mil novecientos doce y mil novecientos dieciocho (1912-1918). A través de una serie de publicaciones especificó que, para obtener la máxima eficiencia, el ángulo con el cual el chorro golpea al álabe debe ser tan pequeño como sea posible. Basado en esta suposición calculó: los ángulos de entrada y salida del rotor, ancho del mismo, la forma del flujo a través de éste y la curvatura del álabe.

Considerando todas las pérdidas posibles que ocurren en el inyector y el rotor, expresó el rendimiento máximo posible con la siguiente ecuación:

$$\eta_{\max} = 0.771 - 0.384 \frac{D}{H} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

$\eta_{\max}$  = Rendimiento máximo

D = Es el diámetro de la turbina expresado en metros (m).

H = La altura total expresada en metros (m)

Sonnek, año mil novecientos veintitrés (1923) modificó la teoría de Banki asumiendo un ángulo del álabe constante e igual a treinta grados (30°), con lo que la ecuación del rendimiento máximo resultó en:

$$\eta_{\max} = 0.863 - 0.264 \frac{D}{H} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde:

$\eta_{\max}$  = Rendimiento máximo

D = Es el diámetro de la turbina expresada en metros (m).

H = La altura total expresada en metros (m).

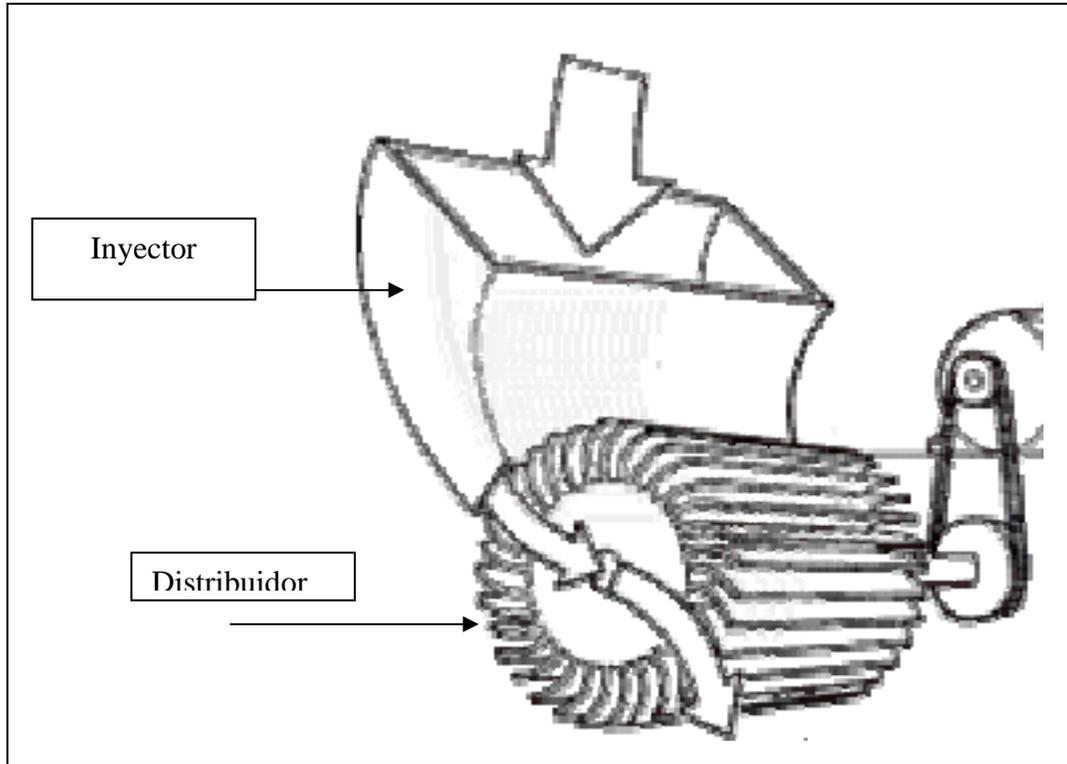
Desde esa época fueron muchas las investigaciones realizadas sobre esta turbina a través del tiempo, las cuales han introducido mejoras sustanciales en la eficiencia de la misma.

### 3.4. Funcionamiento de la turbina Michell Banki

El agua atraviesa la turbina, forzándolo para dar vuelta. Véase *figura 10*. Generalmente, el flujo que atraviesa la turbina es controlado por unas o más válvulas, que permiten que el flujo sea reducido o apagado totalmente.

La turbina está conectada con un generador (alternador), directamente por medio de los engranajes o por medio de las correas y las poleas con el generador o la otra maquinaria que se conducirán.

Figura 15. **Partes de la turbina tipo Michell Banki**



Fuente // [www.wikipedia/hidro\\_banki.org](http://www.wikipedia/hidro_banki.org)

### 3.5. La turbina Michell Banki como turbomáquina de acción

De acuerdo con lo dicho en el comienzo de este capítulo se considerará la turbina de flujo transversal como una máquina de acción o impulso. Según la teoría de las turbomáquinas, se puede relacionar la coplea en el eje de una turbina con el salto o altura útil, arribando a la ecuación de Euler para turbomáquinas, de la cual una de sus formas es la siguiente:

$$g \bullet H_r = \frac{c_1^2 - c_2^2}{2} + \frac{u_1^2 - u_2^2}{2} + \frac{w_1^2 - w_2^2}{2} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde:

$g$  = Aceleración de gravedad expresada en metros sobre segundo cuadrado (m/s<sup>2</sup>)

$H_r$  = Altura útil expresada en metros (m).

$C$  = Velocidad absoluta expresada en metros sobre segundo (m/s)

$u$  = Velocidad tangencial de la turbina expresada en metros sobre segundo (m/s)

$W$  = Velocidad relativa del fluido expresada en metros sobre segundo (m/s)

El primer término de esta ecuación representa la variación de la energía cinética que se produce en el fluido entre la entrada y la salida de la turbina

El segundo término representa el cambio de presión debido a la variación de la fuerza centrífuga entre la entrada y la salida de la misma

El tercer término finalmente, traduce el cambio de presión debido a la variación de la velocidad relativa del fluido entre la entrada y la salida. Por lo tanto el primer término es energía cinética y los otros dos términos son de energía de presión, es decir se expresa de la siguiente manera:

$$\boxed{g \bullet H_r = g \bullet (H_{din} + H_{est})} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde:

$g$  = Aceleración de gravedad expresada en metros sobre segundo cuadrado ( $m/s^2$ )

$H_r$  = Altura útil expresada en metros (m).

$H_{est}$  = Altura estática o de presión expresada en metros (m)

$H_{din}$  = Altura dinámica o de presión expresada en metros (m).

El cambio energético está formado por un término que podemos llamar dinámico y un término representativo del trabajo de las fuerzas de presión, que denominaremos estático. El grado de reacción es la relación entre la energía estática que se transforma dentro del rotor y la energía total, o sea:

$$\boxed{G_r = \frac{H_{est}}{H_{tot}}} \quad (\text{Ecuación 5})$$

Donde:

$G_r$  = Grado de reacción

$H_{est}$  = Altura estática o de presión expresada en metros (m).

$H_{tot}$  = Altura del inyector en cada punto expresada en metros (m).

En las turbinas de "acción" el grado de reacción es igual a cero, es decir que se puede demostrar que la presión en la entrada es igual a la presión en la salida, ( $p_1 = p_2$ ), o sea que el escurrimiento a través del rotor es a presión constante. En definitiva en este caso, a la entrada y salida del rodete reina la presión atmosférica.

$$u_1 = \frac{c_1}{2}$$

(Ecuación 6)

Donde:

$u$  = Velocidad tangencial de la turbina expresada en metros sobre segundo (m/s).

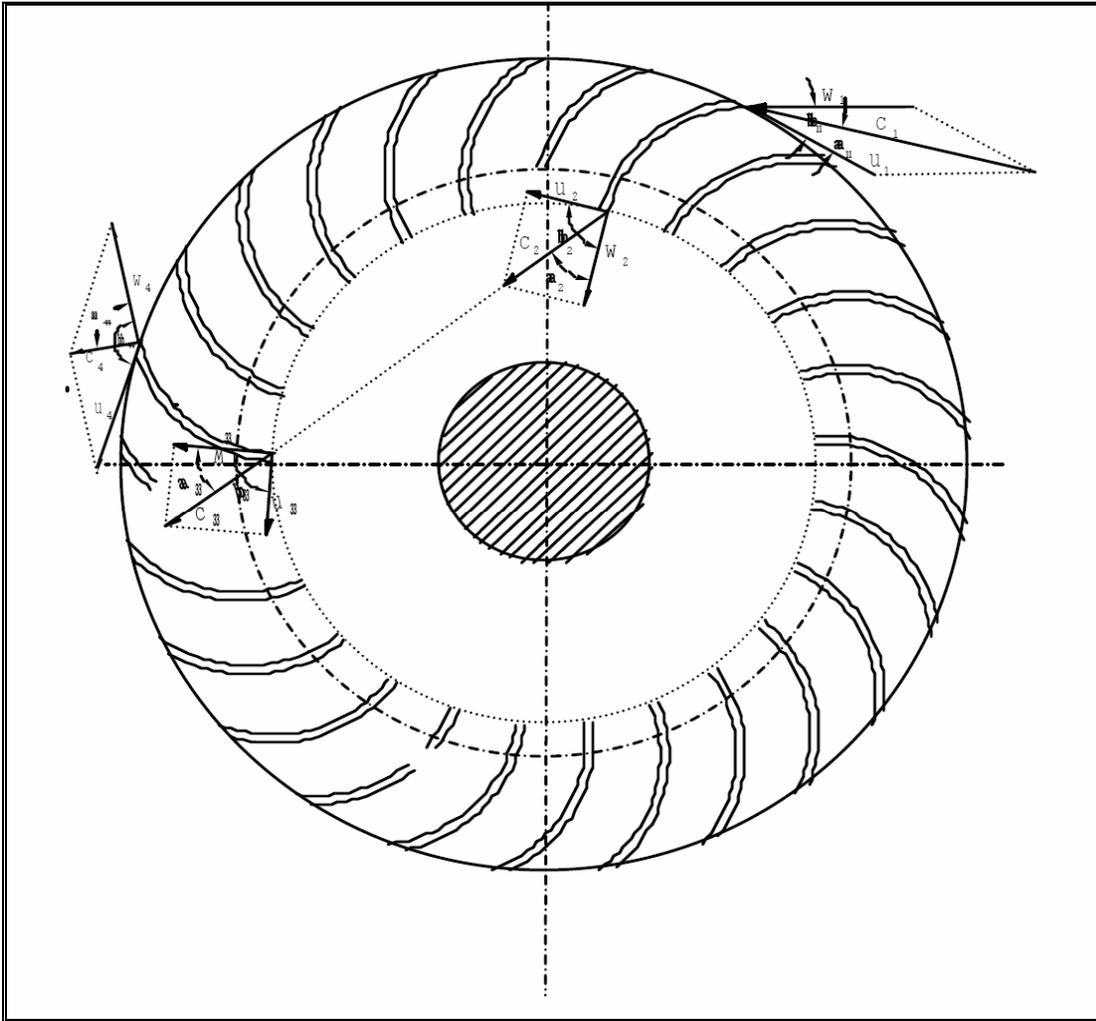
$c_1$  = Velocidad absoluta expresada en metros sobre segundo (m/s).

Considerando a la turbina Michell-Banki como una máquina de acción pura y haciendo el análisis análogamente a lo realizado por diferentes autores para otras turbinas, en dichas investigaciones se parte del hecho de que, para la obtención de la máxima "obtención de la energía del agua" se deberá cumplir con la ecuación (6).

### **3.6. Análisis del diseño hidráulico de la turbina Michell Banki**

En la Figura 16 pueden apreciarse los triángulos de velocidades para las dos etapas ya mencionadas. Como puede verse, existe una total semejanza entre el triángulo de velocidades a la salida de la primera etapa y el de entrada a la segunda etapa. Esto se debe a que el flujo en esa transición es una corriente libre que no interfiere con elemento alguno del rotor.

Figura 16. Triángulo de velocidades de la turbina Michell Banki



Como se mencionó anteriormente realizaremos el diseño hidráulico de esta máquina en base a la suposición de que es una turbina de acción.

Pero debido a las características de ésta debemos modificar el principio de máxima utilización de la energía en lo referente a la relación de velocidades.

De la Figura 16 se desprende que deberá cumplirse que:

$$u_1 = \frac{c_{u1}}{2}$$

(Ecuación 7)

Donde:

$u$  = Velocidad tangencial de la turbina expresada en metros sobre segundo (m/s).

$C_u$  = Componente de la velocidad absoluta en la dirección Tangencial expresada en metros sobre segundo (m/s).

Esto se debe a que el agua no ingresa en forma totalmente paralela al plano longitudinal que contiene al eje como ocurre en una turbina Pelton.

La velocidad absoluta de entrada del agua en el inyector para una máquina de acción está dada por la siguiente ecuación:

$$c_1 = k_c \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_n}$$

(Ecuación 8)

Donde:

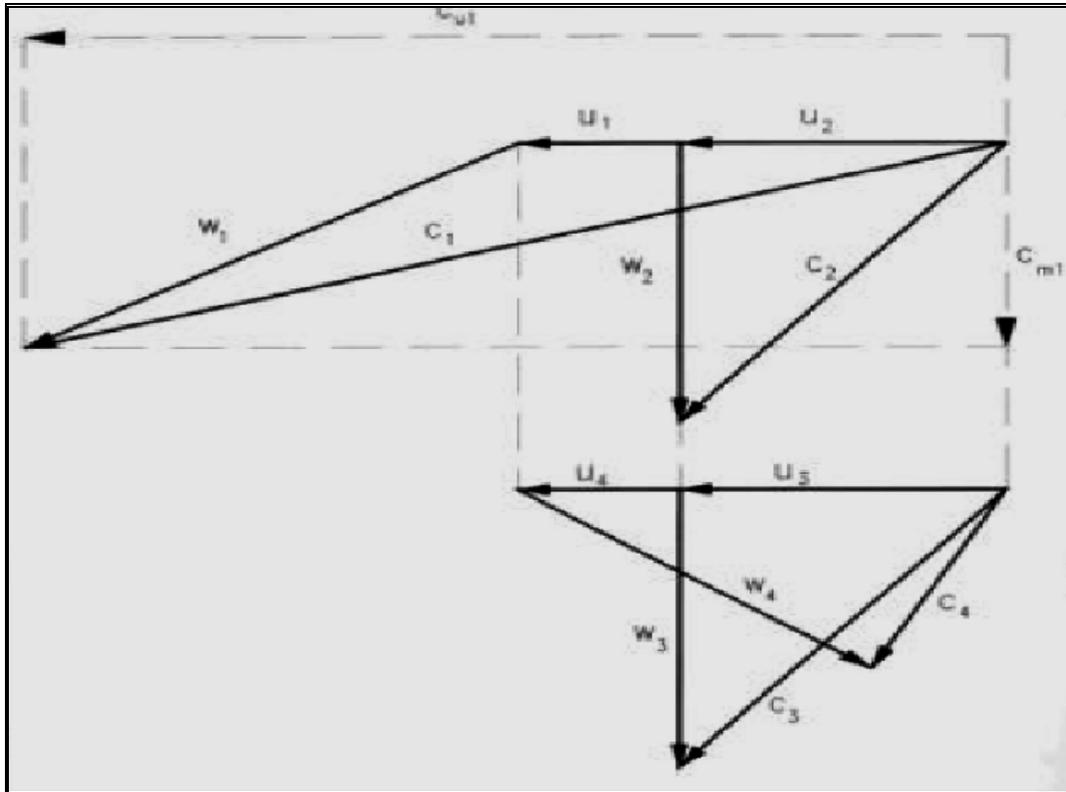
$C$  = Velocidad absoluta expresada en metros sobre segundo (m/s).

$K_c$  = Coeficiente de velocidad del inyector,

$g$  = Aceleración de gravedad expresada en metros sobre segundo cuadrado (m/s<sup>2</sup>)

$H_n$  = Altura neta expresada en metros (m).

Figura 17. Triangulo de velocidades unificados



$$w_1^2 = c_1^2 + u_1^2 - 2 \cdot c_1 \cdot u_1 \cdot \cos \alpha_1 \quad (\text{Ecuación 9})$$

Donde:

$W$  = Velocidad relativa del fluido expresada en metros sobre segundo (m/s).

$C$  = Velocidad absoluta expresada en metros sobre segundo (m/s).

$U$  = Velocidad tangencial de la turbina expresada en metros sobre segundo (m/s).

$\alpha$  = Angulo entre la velocidad absoluta y la velocidad Tangencial expresado en grados ( $^{\circ}$ )

Por lo tanto para la máxima utilización de la energía utilizaremos la siguiente ecuación:

$$w_1^2 = c_1^2 + \left( \frac{c_{u1}}{2} \right)^2 - 2 \cdot c \cdot \frac{c_{u1}}{2} \cdot \cos \alpha_1 \quad (\text{Ecuación 10})$$

Donde:

$W$  = Velocidad relativa del fluido expresada en metros sobre segundo (m/s).

$C$  = Velocidad absoluta expresada en metros sobre segundo (m/s).

$C_u$  = Componente de la velocidad absoluta en la dirección Tangencial expresada en metros sobre segundo (m/s).

$\alpha$  = Ángulo entre la velocidad absoluta y la velocidad Tangencial expresado en grados ( $^\circ$ )

$\beta$  = Ángulo entre la velocidad relativa y la velocidad Tangencial expresado en grados ( $^\circ$ )

Observando los vectores de la figura 16 obtenemos la siguiente ecuación:

$$w_1^2 = c_1^2 + \left( \frac{c_1 \cdot \cos \alpha_1}{2} \right)^2 - 2 \cdot c_1 \cdot \frac{c_{u1}}{2} \cdot \cos \alpha_1 \quad (\text{Ecuación 11})$$

Donde:

$W$  = Velocidad relativa del fluido expresada en metros sobre segundo (m/s).

$C$  = Velocidad absoluta expresada en metros sobre segundo (m/s).

$\alpha$  = Ángulo entre la velocidad absoluta y la velocidad Tangencial expresado en grados (°).

$C_u$  = Componente de la velocidad absoluta en la dirección Tangencial expresada en metros sobre segundo (m/s).

Finalmente obtenemos que:

$$\boxed{w_1^2 = c_1^2 \cdot \left(1 - \frac{3}{4} \cdot \cos^2 \alpha_{.1}\right)} \quad \text{(Ecuación 12)}$$

Donde:

$W$  = Velocidad relativa del fluido expresada en metros sobre segundo (m/s).

$C$  = Velocidad absoluta expresada en metros sobre segundo (m/s).

$\alpha$  = Ángulo entre la velocidad absoluta y la velocidad Tangencial expresado en grados (°).

Si se cumplen con las siguientes condiciones:

$$\boxed{c_{m1} = c_1 \cdot \text{sen } \alpha_1} \quad \text{(Ecuación 13)}$$

$$\boxed{c_{m1} = w_1 \cdot \text{sen } \beta_1} \quad \text{(Ecuación 14)}$$

Donde:

$C_m$  = Componente de la velocidad absoluta en la dirección meridiana.

$C$  = Velocidad absoluta expresada en metros sobre segundo (m/s).

$\alpha$  = Ángulo entre la velocidad absoluta y la velocidad Tangencial expresado en grados (°).

$W$  = Velocidad relativa del fluido expresada en metros sobre segundo (m/s).

Relacionando la (Ecuación 12) y (Ecuación 13) con la (Ecuación 14) obtenemos lo siguiente:

$$\beta_1 = \arcsen \frac{\text{sen } \alpha_1}{\sqrt{1 - \frac{3}{4} \cdot \cos^2 \alpha_1}}$$

Donde:

$\beta$  = ángulo entre la velocidad relativa y la velocidad Tangencial (°).

$\alpha$  = ángulo entre la velocidad absoluta y la velocidad Tangencial expresado en grados (°).

El ángulo  $\alpha_1$  varía generalmente entre los catorce y diez y siete grados (14° - 17°). De acuerdo a esta ecuación tenemos que el ángulo  $\beta_1$  variará de acuerdo a los valores mostrados en la Tabla 3.

Tabla II. Variación del ángulo  $\alpha_1$

$\alpha_1$	$\beta_1$
15.0	28.18
15.2	18.51
15.4	28.85
15.6	29.17
15.8	29.50
15.9	29.67
16.0	29.83
16.1	29.99
<b>16.102</b>	<b>30</b>
16.2	30.15
16.4	30.48
16.6	30.80
16.8	31.12
17	31.44

El ángulo  $\beta_1$  influye en la construcción del rotor, lo que nos lleva a tratar de utilizar los valores que nos faciliten dicha construcción.

De acuerdo a esto será conveniente adoptar un ángulo  $\alpha_1 = 16,102^\circ$  con lo se obtendrá de la ecuación (15) un ángulo  $\beta_1 = 30^\circ$ .

### 3.7. Coeficiente de velocidad del inyector ( $K_c$ .)

Antes de continuar analizando el diseño hidráulico de esta turbina dedicaremos algunas palabras al coeficiente de velocidad del inyector.

Este coeficiente de velocidad del inyector ( $k_c$ ) afecta a la velocidad absoluta de entrada y tiene en cuenta las pérdidas que se generan en el escurrimiento dentro del inyector. De acuerdo a esto se puede decir que el coeficiente de velocidad del inyector ( $k_c$ ) afectará de manera directa al rendimiento hidráulico de la turbina.

Cuando el coeficiente de velocidad del inyector ( $k_c$ ) se aleja de la unidad decreciendo su valor (lo que equivale a un inyector ineficiente) se hace necesario un incremento en el ángulo de admisión de la turbina.

El coeficiente de velocidad del inyector ( $k_c$ ) es un valor determinado generalmente en forma experimental.

Investigaciones realizadas sobre esta máquina arrojan valores tales como  **$K_c = 0,967$**

### 3.7.1. Resolución del triángulo de velocidades a la entrada del rotor

Como se mencionó anteriormente la velocidad en el inyector está dada por la ecuación (8). Reduciendo esta expresión se obtiene lo siguiente:

$$C_1 = 4.429 \cdot K_c \cdot \sqrt{H_n} \quad (\text{Ecuación 16}).$$

Donde:

$C$  = Velocidad absoluta expresada en metros sobre segundo (m/s).

$K_c$  = Coeficiente de velocidad del inyector.

$H_n$  = Altura neta expresada en metros (m).

De acuerdo al triángulo de velocidades en la entrada del inyector se tiene:

$$u_1 = \frac{c_{u1}}{2} = \frac{c_1 \cdot \cos \alpha_1}{2} = \frac{4.429 \cdot k_c \cdot \sqrt{H_n} \cdot \cos \alpha_1}{2} \quad (\text{Ecuación 17})$$

Donde:

$u$  = Velocidad tangencial de la turbina expresada en metros sobre segundo (m/s).

$C_u$  = Componente de la velocidad absoluta en la dirección Tangencial expresada en metros sobre segundo (m/s).

$C$  = Velocidad absoluta expresada en metros sobre segundo (m/s).

$\alpha$  = Angulo entre la velocidad absoluta y la velocidad Tangencial expresado en grados (°).

Luego tenemos la siguiente ecuación:

$$u_1 = 2.214 \cdot k_c \cdot \sqrt{H_n} \cdot \cos \alpha_1 \quad (\text{Ecuación 18})$$

Y si el ángulo  $\alpha_1 = 16.102^\circ$  la velocidad tangencial será:

$$u_1 = 2.127 \cdot k_c \cdot \sqrt{H_n} \quad (\text{Ecuación 19})$$

Aplicando el teorema del seno sobre el triángulo de velocidades a la entrada del inyector obtenemos la siguiente ecuación:

$$\frac{c_1}{\text{sen}(180 - \beta_1)} = \frac{w_1}{\text{sen} \alpha_1} \quad (\text{Ecuación 20})$$

Luego despejando velocidad relativa del fluido expresada en metros sobre segundo ( $w_1$ ) se tiene la siguiente ecuación,

$$w_1 = \frac{c_1 \cdot \text{sen} \alpha_1}{\text{sen}(180 - \beta_1)} \quad (\text{Ecuación 21})$$

Reemplazando la ecuación (17) en la última expresión se obtiene el valor de velocidad relativa del fluido expresada en metros sobre segundo  $w_1$

$$w_1 = 4.429 \cdot k_c \cdot \sqrt{H_n} \cdot \frac{\text{sen } \alpha_1}{\text{sen}(180^\circ - \beta_1)} \quad (\text{Ecuación 22})$$

Si  $\alpha_1 = 16,102^\circ$  entonces  $\beta_1 = 30^\circ$ , por lo tanto la velocidad relativa a la entrada del rotor será:

$$w_1 = 2.458 \cdot k_c \cdot \sqrt{H_n} \quad (\text{Ecuación 23})$$

Por último para completar la resolución del triángulo de velocidades a la entrada del inyector se obtiene el valor del Componente de la velocidad absoluta en la dirección meridiana. ( $C_m$ )

$$c_{m1} = c_1 \cdot \text{sen} \alpha_1 = c_1 4.429 \cdot k_c \cdot \sqrt{H_n} \cdot \text{sen} \alpha_1 \quad (\text{Ecuación 24})$$

O sea

$$c_{m1} = 1.229 \cdot k_c \cdot \sqrt{H_n} \quad (\text{Ecuación 25})$$

### **3.8. Velocidad de embalamiento**

En el funcionamiento de una turbina hidráulica acoplada a un generador eléctrico (alternador) el par motor se mantiene siempre igual gracias al sistema de regulación al par originado por las resistencias pasivas y la carga útil del generador.

Si la turbina queda sin carga y fallan los mecanismos de seguridad que complementan normalmente todo sistema de regulación la velocidad del grupo aumenta, aumentando el par de las resistencias pasivas hasta que se hace igual al par motor y la aceleración se reduce a cero (0).

Si no existiesen las resistencias pasivas la aceleración nunca se reducirá a cero y teóricamente se hará infinita, sobreviniendo antes la destrucción del grupo. A la velocidad máxima que adquiere la turbina en marcha en vacío se la denomina velocidad de embalamiento. Esta velocidad es distinta para cada apertura del álabe regulador.

El rotor del grupo incluyendo el rotor del alternador, ha de estar diseñado para resistir la velocidad de embalamiento. En las turbinas de flujo transversal la velocidad de embalamiento máxima corresponde al 100% de apertura del álabe regulador y disminuye a medida que se cierra el mismo.

Las turbinas de flujo transversal permiten alturas nominales 1.8 veces la velocidad nominal, lo que permite el uso de un generador (alternador) estándar.





Existen generadores de corriente directa y generadores de corriente alterna. En aplicaciones de micro-hidroeléctricas carecen de interés los primeros (corriente directa), salvo en aplicaciones especiales de pequeñas dimensiones. La principal limitación está en la poca disponibilidad de aparatos electrodomésticos de corriente directa.

Los generadores de corriente alterna son los utilizados normalmente. Ya sea del tipo monofásico, con una tensión nominal de servicio de doscientos veinte vatios (220 V) (corriente alterna), o trifásicos con una tensión de servicio nominal de trescientos ochenta vatios (380 V) (corriente alterna).

#### **4.1.1. Generadores sincrónicos**

La cantidad de polos depende del número de revoluciones a la cual ha de girar para entregar los 50 Hz. En la práctica la mayoría de los generadores son de 1.500 rpm por lo que son de 4 polos. El ajuste entre la velocidad de la turbina y la del generador se logra generalmente mediante correas, si es que no giran al mismo número de vueltas.

Existe una alternativa en cuanto a la elección del generador. Los generadores pueden ser Sincrónicos o de Inducción. Ambos son empleados en micro-hidroeléctricas con buenos resultados.

Los generadores sincrónicos autoexcitados son los generadores normales en generación diesel y su empleo en micro-hidroeléctricas se ha realizado con éxito. Son capaces de suministrar la energía reactiva de la carga. Son más complejos debido a que poseen un sistema de control de la excitación y casi siempre el inductor es un bobinado de cobre.

Estos componentes hacen que el generador sea más caro. Los generadores sincrónicos que se obtienen en el mercado deben ser intervenidos para adecuarlos a ciertas características propias de su funcionamiento acoplado a una turbina hidroeléctrica.

Uno de ellos es que los bobinados rotóricos deben ser amarrados en mejores condiciones dado que la sobrevelocidad por embalamiento de la turbina puede llevarlos a girar a más de 2 a 2,5 del valor nominal (normalmente 1.500 rpm).

El segundo problema a resolver se origina si el generador se acopla a la turbina mediante correas. Es sabido que el rendimiento de las correas planas es superior al de las correas en "V". El tensado de estas correas exige esfuerzos importantes en el rodamiento del lado de la polea del generador que en algunos casos debe ser reemplazado de superiores condiciones provisto normalmente.

La tercera condición a tener en cuenta es la posibilidad de sobreexigencias en la corriente de excitación originadas por variaciones en la carga. Normalmente los generadores diesel, a los que van acoplados los generadores sincrónicos normales, son de una potencia de alrededor de un 30% más que la del generador.

Cuando el regulador de tensión detecta una variación importante de la tensión demanda un incremento muy fuerte de la corriente de excitación. Esta demanda se suma al incremento de potencia de la carga. Este esfuerzo combinado es resuelto en el Diesel con el margen de potencia mencionado.

En una micro-hidroeléctrica esto no sucede, ya si la máquina está funcionando a régimen nominal, en la generalidad de los casos no hay un margen de potencia disponible. En estos casos resulta conveniente, aunque no imprescindible, que el regulador de tensión sea diseñado para desfasar la corrección de la tensión, dando tiempo a que la turbina se acomode al nuevo valor de potencia demandada.

#### **4.1.2. Generadores de Inducción**

Los Generadores de Inducción han sido empleados también en micro-hidroeléctricas, con un aceptable grado de confiabilidad y calidad de la energía. A diferencia de los sincrónicos, no pueden suministrar energía reactiva por lo que, tanto la que demanda la excitación propia como el reactivo de la carga, debe ser suministrado por capacitores, los cuales pasan a formar parte esencial de la instalación.

La gran ventaja de este tipo de generador es que se encuentran en el mercado con una gran variedad de ofertas, puesto que se trata de motores normales utilizados como generador.

Son muy adecuados para su empleo en sistemas de regulación de carga por absorción en los cuales el generador trabaja a carga máxima y el sistema de control realiza el balance de la energía que entrega a la demanda y la que envía a las resistencias disipadoras.

Su empleo en micro-hidroeléctricas se ha expandido debido al menor precio final resultante de la instalación y a su sencillez. Un simple motor de jaula de ardilla puede ser obtenido a precios muy favorables.

## 4.2. Controles reguladores

La carga eléctrica de cualquier sistema demanda que las condiciones de la energía recibida, tanto en frecuencia como en voltaje, sean estables dentro de ciertos límites. Por esta exigencia tenemos un tablero de control, donde podemos tener las lecturas de voltaje y el amperaje.

Figura 19. **Tablero de control**



Cuando la carga eléctrica se incrementa o disminuye, origina en el eje de la turbina una variación en la velocidad. Si la carga aumenta, la velocidad tiende a disminuir y viceversa.

Si estas variaciones de la velocidad no son controladas, entonces ni la tensión ni la frecuencia de la energía generada serán estables. Esta situación origina la necesidad de la regulación que efectúa el "Sistema de Control o de Regulación del flujo de agua " de la turbina.

#### **4.2.1. Sistema de control manual de flujo de agua**

Es el primer sistema conocido, y por lo tanto el más ampliamente utilizado. Emplea una válvula para el control del flujo de agua que ingresa a la turbina.

Cuando los requerimientos de la carga son aproximadamente constantes y no existen grandes exigencias en la calidad del suministro, puede recurrirse a un sistema de control manual de la turbina. Es el sistema más económico dado que solo se debe intercalar en el circuito de tubería del flujo de agua un elemento manual de control.

Posiblemente una válvula de bajo costo Este sistema requiere que la sala de máquinas sea accesible al operador.

El operador ajusta el caudal de ingreso cuando detecta un bajo funcionamiento (parpadeos en la luz o disminución en la tensión.)

### 4.3. Medidores de flujo utilizados en la instalación

#### 4.3.1 Vertedero triangular

La medición del caudal mediante vertedero triangular resulta apropiada para caudales inferiores a los 0.2 metros cúbicos sobre segundo ( $m^3/s$ ). Es decir que si en la micro-hidroeléctrica son esperables valores inferiores a éste caudal, puede utilizarse este tipo de vertedero.

En este caso la garganta del vertedero tendrá forma de "V", con un ángulo de  $45^\circ$ . ver figura 19

La fórmula de cálculo del caudal en este caso será la siguiente:

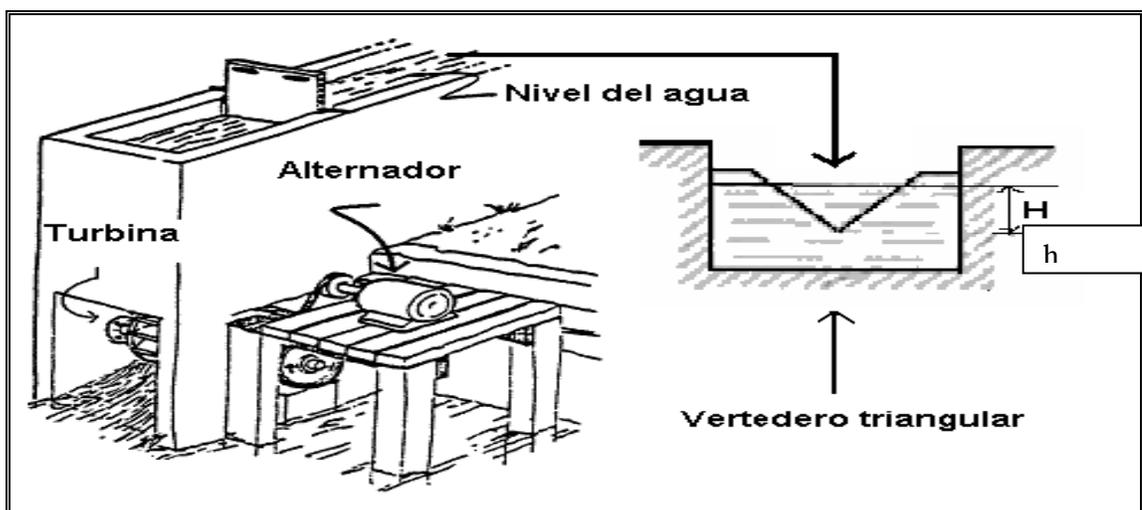
$$Q = 1.415 \cdot h^{\frac{5}{2}} \quad (\text{Ecuación 26})$$

Donde:

Q: Caudal, medido en metros cúbicos sobre segundo ( $m^3/s$ ).

H: Altura, medida en metros (m)

Figura 20. **Medidor de flujo tipo vertedero triangular utilizado en la instalación**



#### **4.3.2. Determinación del salto o altura útil**

El salto o altura útil es la altura disponible a la entrada de la turbina. Es el valor que interviene, junto con el caudal, en el cálculo de la potencia de la turbina. La determinación del salto o altura útil es una tarea de gabinete en la cual se analizan las distintas pérdidas de altura que se originan por la velocidad con que el agua circula por los distintos componentes de la micro-central.

El agua, en su pasaje por los distintos elementos de la micro central, origina pérdidas de altura.

#### **4.4. Tubería de cloruro de polivinilo (PVC)**

Las tuberías de cloruro de polivinilo (PVC), pueden obtenerse con diferentes características. Su precio las hace la opción más ventajosa en diámetros inferiores a los 300 mm. Son livianas, flexibles y de fácil manipuleo. Son resistentes a la corrosión. Pueden contar con uniones deslizantes con aro de goma o fijas pegadas.

Las presiones normales de trabajo de estas tuberías comercialmente disponibles llegan a los  $10 \text{ kg/cm}^2 = 143 \text{ psi}$

#### **4.5. Descripción del equipo para la realización del ensayo**

Para la realización del ensayo se cuenta con los siguientes elementos: un sistema de tuberías de Policloruro de Vinilo (PVC), una bomba de flujo continuo marca *Maratón Electric*, una turbina tipo Michell Banki, un generador eléctrico tipo alternador, una batería o acumulador de energía, un panel de control, tres manómetros. Todos estos aparatos conforman el modelo de una mini-hidroeléctrica, en la cual la bomba de flujo continuo, bombea el agua almacenada en la carcasa y la entrega a la turbina Michell, haciendo el papel del nivel de una represa, en la cual la energía de elevación o potencial está dada por la energía de presión a la salida de la bomba.

La turbina tipo Michell Banki, es puesta en marcha mediante el flujo entregado por la bomba, éste flujo entregado a la turbina hace girar el eje del generador eléctrico tipo alternador, el cual, para cierto rango de velocidad de giro del eje produce potencia eléctrica, la cual puede ser medida mediante un medidor de intensidad de corriente (amperímetro) y otro medidor de potencial (voltímetro) los cuales están ubicados en el panel de control junto con unos bombillos (un rojo y un azul) que se encienden como indicadores que se esta generando energía eléctrica.

##### **4.5.1. Ensayo en la turbina tipo Michell Banki**

Objetivo específico:

- a. Básicamente este ensayo consiste en la medición de los diferentes parámetros que definen el rendimiento de la turbina, esto es: caudales, presiones, revoluciones por minuto.

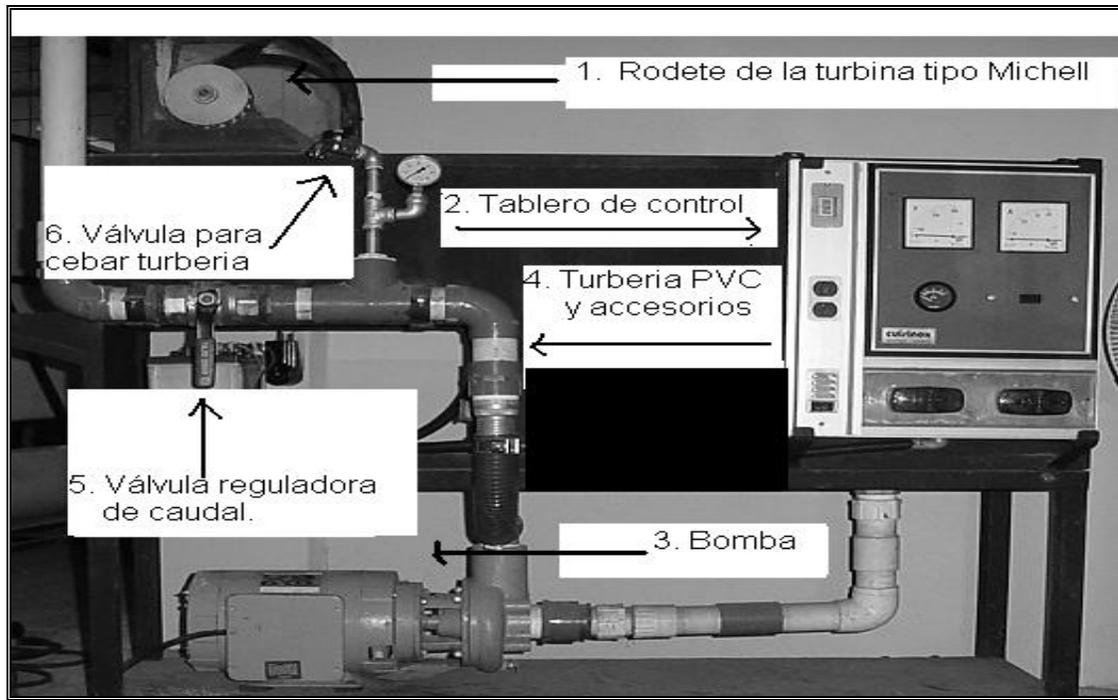
#### **4.5.2. Instrucciones para poner en marcha la turbina tipo Michell Banki**

1. Revisar el nivel de agua de la carcaza, y llenarlo hasta el nivel indicado.
2. Cerrar la válvula reguladora de caudal (*véase figura 21*)
3. Conectar la bomba.
4. Abrir la válvula para cebar la tubería inducción (*véase figura 21*)
5. Cerrar la válvula para cebar la tubería hasta que salga solamente agua.
6. Una vez que la turbina este en marcha, realizar los siguientes pasos

#### **4.5.3 Realización del ensayo de la turbina tipo Michell Banki**

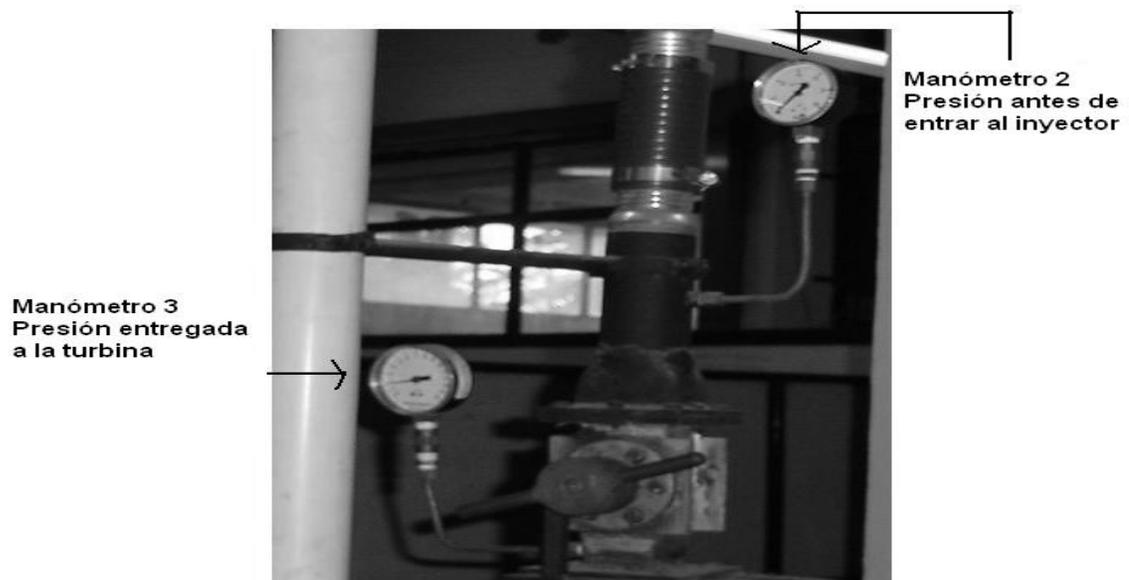
1. Colocar el alabe del inyector en una posición determinada. (el alabe del inyector tiene 4 posiciones )
2. Maniobrar la válvula reguladora de caudal, para obtener una altura determinada en el piezómetro.
3. Anotar la lectura obtenida del piezómetro, nos servirá para calcular el caudal.
4. Tomar la lectura del manómetro (1) (*véase figura 21*), que será la presión de salida de la bomba.
5. Tomar la lectura del manómetro (2) (*véase figura*).
6. Tomar la lectura del manómetro (3), la cual representa la presión entregada a la turbina. (*véase figura*).
7. Determine con un tacómetro revoluciones por minuto del (rpm) del eje.
8. Anote los datos en una tabla,
9. Repita el mismo procedimiento desde el paso número dos, con diferentes alturas. (como mínimo de siete alturas diferentes).

Figura 21. **Controles reguladores**



Fuente// \_Laboratorio\_hidráulica\_Facultad\_de\_Ingenieria\_USAC

Figura 22. **Juego de manómetros**



Fuente// ILaboratorio\_hidráulica\_Facultad\_Ingenieria\_USAC.

Tabla III. Datos obtenidos del ensayo de la turbina tipo Michell Banki con el alabe del inyector en la posición 4

Altura h piezométrica (m.)	Presión Manómetro 1. (psi.) (kPa)	Presión Manómetro 2 (psi.) (kPa)	Presión Manómetro 3 (psi) (kPa)	Velocidad de rotación del eje en (rpm)
0.06	32 = 220.63		-	-
0.065	34 = 234.42	-	-	-
0.07	34 = 234.42	-	-	-
0.075	36 = 248.21	2 = 13.79	4 = 27.58	-
0.08	36 = 248.21	4 = 27.58	5 = 34.47	-
0.085	36 = 248.21	6 = 41.37	6 = 41.37	450
0.09	36 = 248.21	10 = 68.95	9 = 62.05	1100
0.093	36 = 248.21	11 = 75.84	10 = 68.95	1200
0.095	36 = 248.21	12 = 82.74	12 = 82.74	1300
0.098	36 = 248.21	14 = 96.57	14 = 96.53	1500
0.10	36 = 248.21	16 = 110.32	16 = 110.32	1800
0.103	36 = 248.21	18 = 124.11	18 = 124.11	1950
0.105	36 = 248.21	20 = 137.90	20 = 137.90	2100

#### 4.5.4 Obtención de datos o cálculos

4.5.4.1 Determine el salto o altura útil con la ecuación (28)

$$H_t = \frac{P_3}{\gamma}$$

Donde:

$H_t$  = Altura útil en metros (m)

$P_3$  = Presión entregada a la turbina en kilo Pascales (Kpa)

$\gamma$  = Peso específico del agua expresado en Newton sobre

metro cúbico.  $1000 \frac{Kgf}{m^3} * \frac{9.81N}{1Kgf} = 9810 \frac{N}{m^3}$

**Ejemplo:** De cómo calcular el salto o altura útil con los datos anotados en la **tabla IV**

Datos:

$$P = 4 \text{ (Psi)} = 27.58 \text{ kPa}$$

$$\gamma = 9810 \frac{N}{m^3}$$

Ecuación:  $H_t = \frac{P_3}{\gamma}$

Sustituyendo:

$$H_t = 27.58 \text{ kPa} \cdot \frac{1000 \frac{N}{m^2}}{1 \text{ kPa} \cdot 9810 \cdot \frac{N}{m^3}} = 2.81 \text{ m}$$

**4.5.4.2. Determine el caudal con la ecuación 30. (Véase apéndice 1, demostración del cálculo de la ecuación 30.)**

$$Q = 1.4508 \left( 1.145 \cdot h^{5/2} \right)$$

Donde:

$Q$  = Caudal dado en metros cúbicos sobre segundo  $\left( \frac{m^3}{s} \right)$

$C_d$  = coeficiente de descarga = 1.4508.

$h$  = altura del piezómetro expresada en metros (m)

**Ejemplo** para calcular el caudal con la ecuación (30)

Datos:

h = altura piezométrica, la lectura directa del piezómetro la obtenemos en centímetros (cm); pero para ingresar el dato a la fórmula hay que hacer la conversión a metros (m)

$$h = 6.cm \cdot \frac{1.m}{100cm} = 0.06.metros$$

Sustituyendo en la fórmula:

$$Q = 1.4508 \left( 1.145 \cdot 0.06^{5/2} \right) = 0.001464 \cdot m^3/s$$

Tabla IV. **Datos de la altura piezométrica h y el resultado del cálculo del caudal obtenido con la ecuación (30)**

No.	Altura h (m)	Caudal (m <sup>3</sup> /s)
		$Q = 1.4508 \left( 1.145 \cdot h^{5/2} \right)$
1	0.06	0.001464
2	0.065	0.001789
3	0.070	0.002153
4	0.075	0.002559
5	0.080	0.003007
6	0.085	0.003499
7	0.090	0.004036
8	0.093	0.004381
9	0.095	0.004620
10	0.098	0.004994
11	0.010	0.005253
13	0.105	0.005934

**3. Determine la potencia hidráulica extraída por la turbina, con la siguiente expresión**

$$\text{Ecuación (29)} \quad P_{hidraulica} = \gamma \cdot Q \cdot H_t$$

Donde:

$\gamma$  = Peso específico del agua en  $N/m^3$

$Q$  = Caudal expresado en metro cúbico sobre segundo ( $m^3/s$ )

$H_t$  = Salto o altura útil expresada en metros (m)

Ejemplo:

Datos:

$$\gamma = 1000 \frac{kgf}{m^3} \cdot \frac{9.81 N}{1kgf} = 9810 \frac{N}{m^3}$$

$$Q = 0.005934 \frac{m^3}{s}$$

$$H_t = 14.05m$$

Sustituyendo en la ecuación  $P_{hidraulica} = \gamma \cdot Q \cdot H_t$

$$P_{hidraulic} = 9810 \frac{N}{m^3} \cdot 0.005934 \frac{m^3}{s} \cdot 14.05 m = 817.87 \text{ watts}$$

**La potencia hidráulica obtenida expresada en kilo Watts = 0.81787 Kw.**

Tabla V. Resultados de la potencia hidráulica

Altura h (m)	Caudal $Q = m^3/s$ $Q = 1.4508 \left( 1.145 \cdot h^{5/2} \right)$	Peso Específico $\gamma = N/m^3$	Altura útil Ht (m)	Potencia hidráulica $Ph = \gamma \cdot Q \cdot Ht$ (Watts)
0.06	0.001464	9810	--	-----
0.065	0.001789	9810	---	-----
0.070	0.002153	9810	---	-----
0.075	0.002559	9810	2.81	<b>70.54</b>
0.080	0.003007	9810	3.51	<b>103.54</b>
0.085	0.003499	9810	4.21	<b>144.51</b>
0.090	0.004036	9810	6.32	<b>250.53</b>
0.093	0.004381	9810	7.03	<b>302.13</b>
0.095	0.004620	9810	8.43	<b>382.07</b>
0.098	0.004994	9810	9.85	<b>482.56</b>
0.010	0.005253	9810	11.24	<b>579.22</b>
0.103	0.005655	9810	12.66	<b>702.32</b>
0.105	0.005934	9810	14.05	<b>817.87</b>

Figura 23. Gráfica de la curva del salto o altura útil en función del caudal

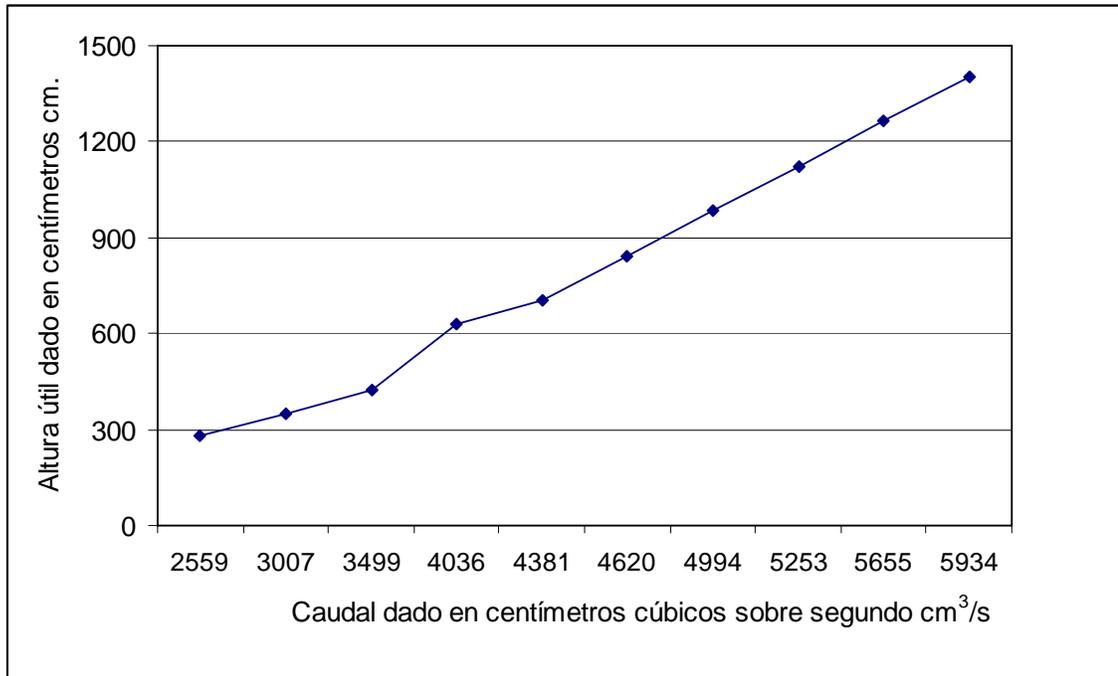
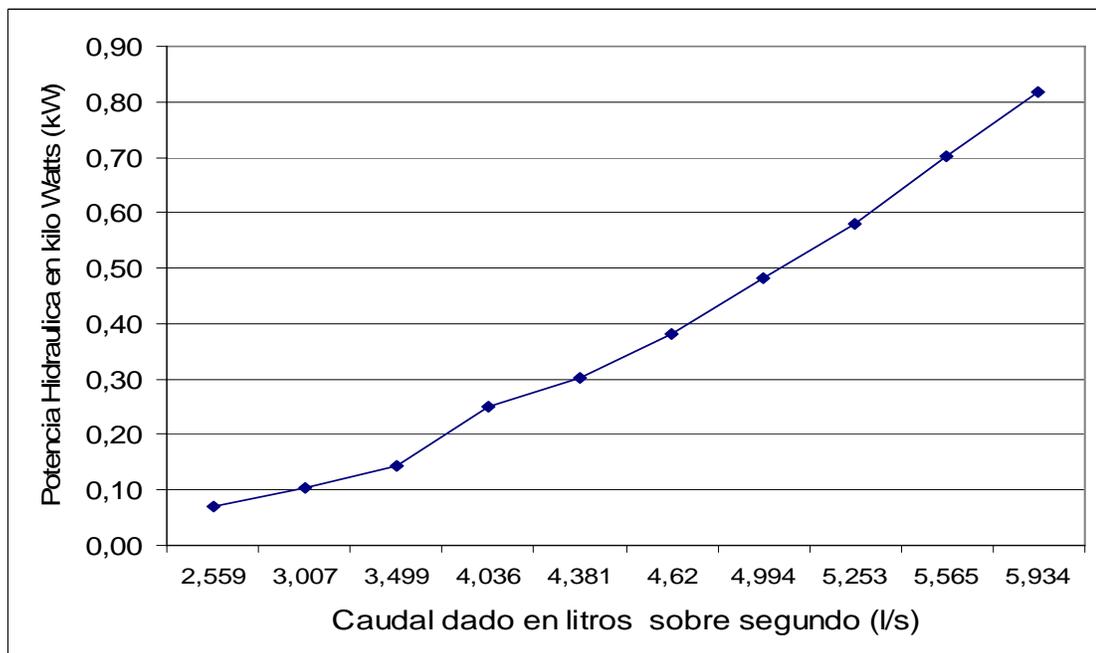


Figura 24. Gráfica de caudal versus potencia hidráulica de la turbina  
Michell Banki



#### **4.6. Mantenimiento para la turbina tipo Michell Banki**

1. El mantenimiento de la turbina Michell Banki es relativamente bajo.
2. Solamente las piezas como los cojinetes pueden tener que ser substituidos con el tiempo.
3. Hacer un cambio anual de grasa.
4. El eje desalineado o un mal montaje de la turbina dañara los rodamientos muy rápidamente.
5. Puede ser necesario limpiar la pantalla cada cierto tiempo.
6. Es necesario cambiar el agua cada cierto tiempo.

## CONCLUSIONES

1. Las plantas micro-hidroeléctricas no necesitan del consumo de combustibles para la generación de energía, ya que con pequeñas fuentes de agua se puede generar suficiente energía para suplir las necesidades básicas de electrificación: iluminación, televisión y radio.
2. Del ensayo hecho a la turbina Michell Banki, observamos que cuando el caudal aumenta la potencia que desarrolla es proporcional al caudal que circula, de igual forma la velocidad de rotación del eje, y sí mayor es el caudal, mayor será el impacto producido por éste en el rodete.
3. Un sistema con sólo 50 vatios de potencia podría generar suficiente energía durante un día de trabajo para mover 6 bombillos eficientes durante seis o más horas ( $50 \text{ w} * 24 \text{ hr} = 1200 \text{ Whr/día}$ ). Estos sistemas generan en corriente directa y requieren de un banco de baterías para almacenar la energía producida.
4. En el presente trabajo se encuentran los pasos secuenciales para realizar la práctica con el prototipo de la turbina Michell Banki, ya que es de utilidad para los estudiantes del curso de Máquinas Hidráulicas.



## RECOMENDACIONES

1. Es importante tomar en cuenta en el ensayo del prototipo de la turbina Michell Banki, los pasos especificados en el capítulo 4, los cuales facilitan la comprensión del sistema, a los practicantes.
2. Para maximizar la precisión de los ensayos es necesario adquirir un tacómetro digital para tomar lecturas del eje de la turbina.
3. Para el mantenimiento óptimo de la bomba es recomendable la aplicación de un refrigerante, el cual ayudará a evitar corrosión.



## BIBLIOGRAFÍA

1. Mott, Robert L. **Mecánica de fluidos aplicada**. 4ª. ed. México: Editorial Prentice Hall Hispanoamericana, S.A. 1999. 580pp.
2. Gardea Villegas, Humberto. **Aprovechamientos hidroeléctricos y de bombeo**. 2ª ed. México: Editorial Trillas, 1994. 290pp.
3. Rosada Méndez, Ricardo Antonio. **Manual para los ensayos del laboratorio de máquinas hidráulicas**. Tesis Ing. Mecánica. Guatemala, universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1998, 120pp.
4. Viejo Subicaray, Manuel y Pedro Alonso Palacios. **Energía Hidroeléctrica, Turbinas y plantas generadoras**. 2ª ed. México: Editorial Limusa, 1993. 320pp.
5. **Referencias electrónicas**  
<http://archivo.greenpeace.org/energia/index.htm> junio 2006  
<http://www.ossberger.de/index.php?sprache=es&fid=2> junio 2006  
<http://www.uca.edu.sv/deptos/ccnn/dlc/pdf/turbinas.pdf> julio 2006



## APÉNDICE I

Realización del ensayo de la turbina tipo Michell Banki, para calibrar el vertedero triangular y calcular el coeficiente de descarga ( $C_d$ ) para obtener una ecuación directa de caudal

1. Colocar el alabe del inyector en la posición (4).
2. Maniobrar la válvula reguladora de caudal, para obtener una altura en el piezómetro.
3. Anotar la lectura obtenida del piezómetro, nos servirá para obtener el caudal teórico que viene dado por la **ecuación (26)**  $Q = 1.415 \cdot h^{\frac{5}{2}}$
4. Tomar la lectura del manómetro (1) (véase figura 21), que será la presión de salida de la bomba.
5. Tomar la lectura del manómetro (2) (véase figura).
6. Tomar la lectura del manómetro (3), la cual representa la presión entregada a la misma. (véase figura).
7. Con un recipiente de volumen conocido, tomar el tiempo de llenado, para calcular el caudal real que viene dado por la **ecuación (27)**  $Q = V/t$
8. Determine con un tacómetro revoluciones por minuto del (rpm) del eje.
9. Anote los datos en una tabla,
10. Repita el mismo procedimiento desde el paso número dos, con diferentes alturas. (como mínimo de siete alturas diferentes)

Tabla IV. Datos obtenidos del ensayo de la turbina tipo Michell Banki con el alabe del inyector en la posición 4 para calcular el coeficiente de descarga ( $C_d$ ).

Altura h piezométrica (m)	Presión manómetro 1 (psi) (kPa)	Presión manómetro 2 (psi) (kPa)	Presión entregada ha la turbina manómetro 3 (psi) (kPa)	Velocidad de rotación del eje en (rpm)	Voltaje (Voltios)	Volumen del recipiente (cm <sup>3</sup> )	Tiempo de llenado (s)
0.06	32 = <b>220.63</b>		-	-	-	7000	4.20
0.065	34 = <b>234.42</b>	-	-	-	-	7000	3.64
0.07	34 = <b>234.42</b>	-	-	-	-	7000	3.0
0.075	36 = <b>248.21</b>	2 = <b>13.79</b>	4 = <b>27.58</b>	-	-	7000	2.70
0.08	36 = <b>248.21</b>	4 = <b>27.58</b>	5 = <b>34.47</b>	-	-	7000	2.25
0.085	36 = <b>248.21</b>	6 = <b>41.37</b>	6 = <b>41.37</b>	450	-	7000	2.0
0.09	36 = <b>248.21</b>	10 = <b>68.95</b>	9 = <b>62.05</b>	1100	<b>8</b>	7000	1.76
0.093	36 = <b>248.21</b>	11 = <b>75.84</b>	10 = <b>68.95</b>	1200	<b>9</b>	7000	1.57
0.095	36 = <b>248.21</b>	12 = <b>82.74</b>	12 = <b>82.74</b>	1300	<b>10</b>	7000	1.45
0.098	36 = <b>248.21</b>	14 = <b>96.57</b>	14 = <b>96.53</b>	1500	<b>12</b>	7000	1.36
0.10	36 = <b>248.21</b>	16 = <b>110.32</b>	16 = <b>110.32</b>	1800	<b>14</b>	7000	1.30
0.103	36 = <b>248.21</b>	18 = <b>124.11</b>	18 = <b>124.11</b>	1950	<b>15</b>	7000	1.21
0.105	36 = <b>248.21</b>	20 = <b>137.90</b>	20 = <b>137.90</b>	2100	16	7000	1.15

## OBTENCIÓN DE DATOS O CÁLCULOS

1. Determine el salto o altura útil con la **ecuación (28)**

$$H_t = \frac{P_3}{\gamma}$$

Donde:

$H_t$  = Altura útil en metros (m)

$P_3$  = Presión entregada a la turbina en kilo Pascales (kPa)

$$\gamma = 1000 \frac{\text{Kgf}}{\text{m}^3} * \frac{9.81\text{N}}{\cancel{1\text{Kgf}}} = 9810 \cdot \frac{\text{N}}{\text{m}^3}$$

Ejemplo:

Datos de la tabla IV:

$$P = 4 \text{ psi} = 27.58 \text{ kPa}$$

$$\gamma = 9810 \frac{\text{N}}{\text{m}^3}$$

$$\text{Ecuación: } H_t = \frac{P_3}{\gamma}$$

Sustituyendo:

$$H_t = 27.58\text{kPa} \bullet \frac{1000 \text{ N} / \text{m}^2}{1\text{kPa} \bullet 9810 \cdot \text{N} / \text{m}^3} = 2.81\text{m}$$

2. Determine el caudal teórico con la **ecuación (26)**

$$Q = 1.415 \cdot h^{\frac{5}{2}}$$

Donde:

Q = caudal en metros cúbicos sobre segundo (m<sup>3</sup>/s)

h = altura indicada por el piezómetro en metros (m)

Nota: Al resultado se le hace la conversión para obtener el caudal en centímetros cúbicos por segundo (cm<sup>3</sup>/s).

**Ejemplo:**

Datos de la tabla IV:

$$H = 7.5 \text{ centímetros (cm.)} = 0.075 \text{ metros (m)}$$

Sustituyendo en la **ecuación (26)**  $Q = 1.415 \cdot H^{\frac{5}{2}}$

$$Q = 1.415 \cdot 0.075^{\frac{5}{2}} = 0.00176384 \frac{m^3}{s}$$

Y haciendo la conversión obtenemos el caudal en centímetros cúbicos

sobre segundo  $\left(\frac{cm^3}{s}\right)$

$$0.001763837 \frac{\cancel{m^3}}{s} * \frac{100^3 \cancel{cm^3}}{1^3 \cancel{m^3}} = 1763.837 \frac{cm^3}{s}$$

3. Determine el caudal real, con el flujo que pasa por el vertedero triangular utilizando la **ecuación (27)**  $Q = V/t$

Donde:

V = volumen del recipiente en centímetros cúbicos (cm<sup>3</sup>)

t = tiempo de llenado del recipiente en segundos (s); Se recomienda tener un tiempo promedio de llenado para mejores resultados.

**Ejemplo:**

Datos de la tabla IV:

V= 7000 centímetros cúbicos (cm<sup>3</sup>)

t = 2.42 segundos (s).

Sustituyendo en la fórmula tenemos:

$$Q = \frac{7000 \text{ .cm}^3}{2.42 \text{ .s}} = 2892.56 \frac{\text{cm}^3}{\text{s}}$$

Tabla V. Resultado de los cálculos de los caudales y el salto o altura útil

<b>Altura piezométrica h (m.)</b>	<b>Caudal Real (cm<sup>3</sup>/s) <math>Q = V/t</math></b>	<b>Caudal teórico (cm<sup>3</sup>/s) <math>Q = 1.415 \cdot h^{\frac{5}{2}}</math></b>	<b>Salto o altura útil (m.) <math>H_t = \frac{P_3}{\gamma}</math></b>
0.06	1667	1010	----
0.065	1922	1234	----
0.070	2328	1485	----
0.075	2592	1764	2.81
0.080	3100	2073	3.51
0.085	3500	2412	4.21
0.090	3977	2783	6.32
0.093	4447	3020	7.03
0.095	4827	3186	8.43
0.098	5147	3442	9.85
0.10	5384	3621	11.24
0.103	5785	3898	12.66
0.105	6086	4090	14.05

Figura 23 Gráfica de la altura piezométrica versus caudal real

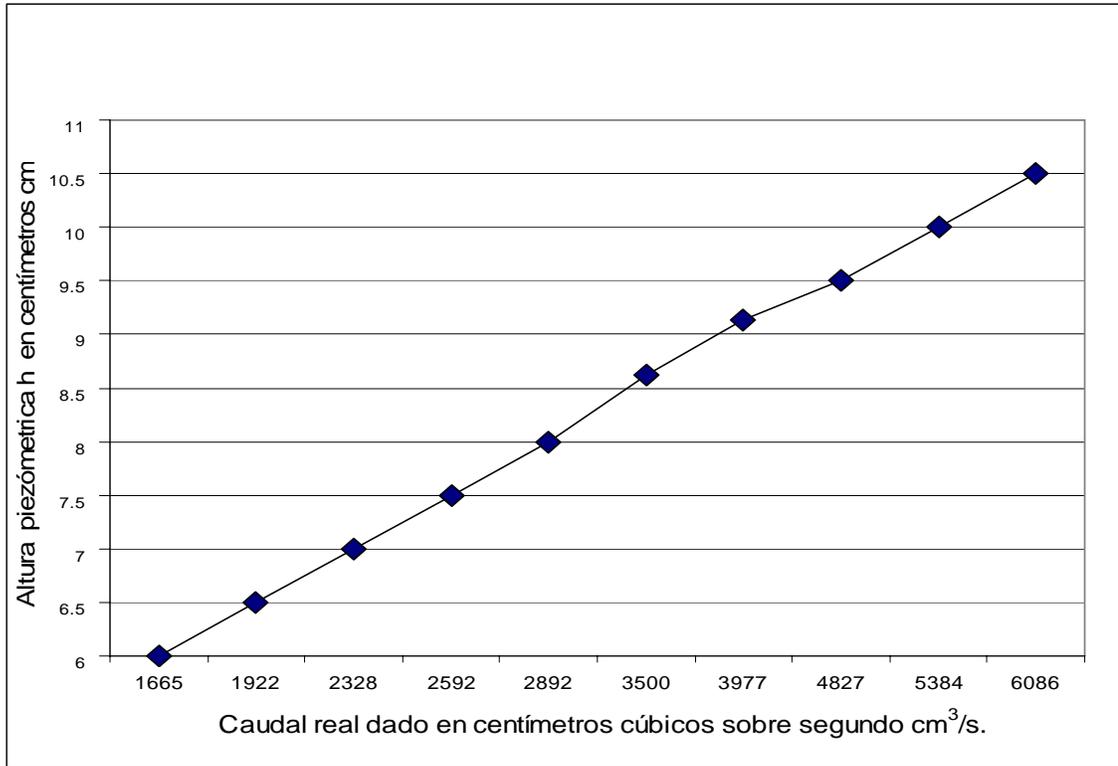


Figura 24. Gráfica de caudal real versus caudal teórico

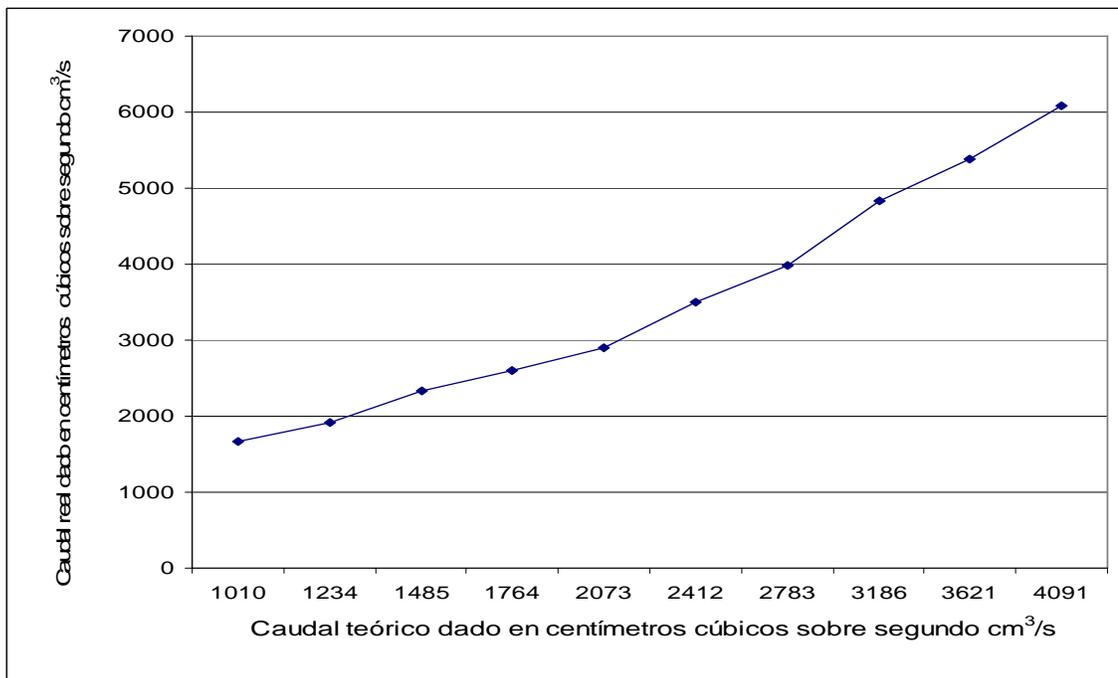
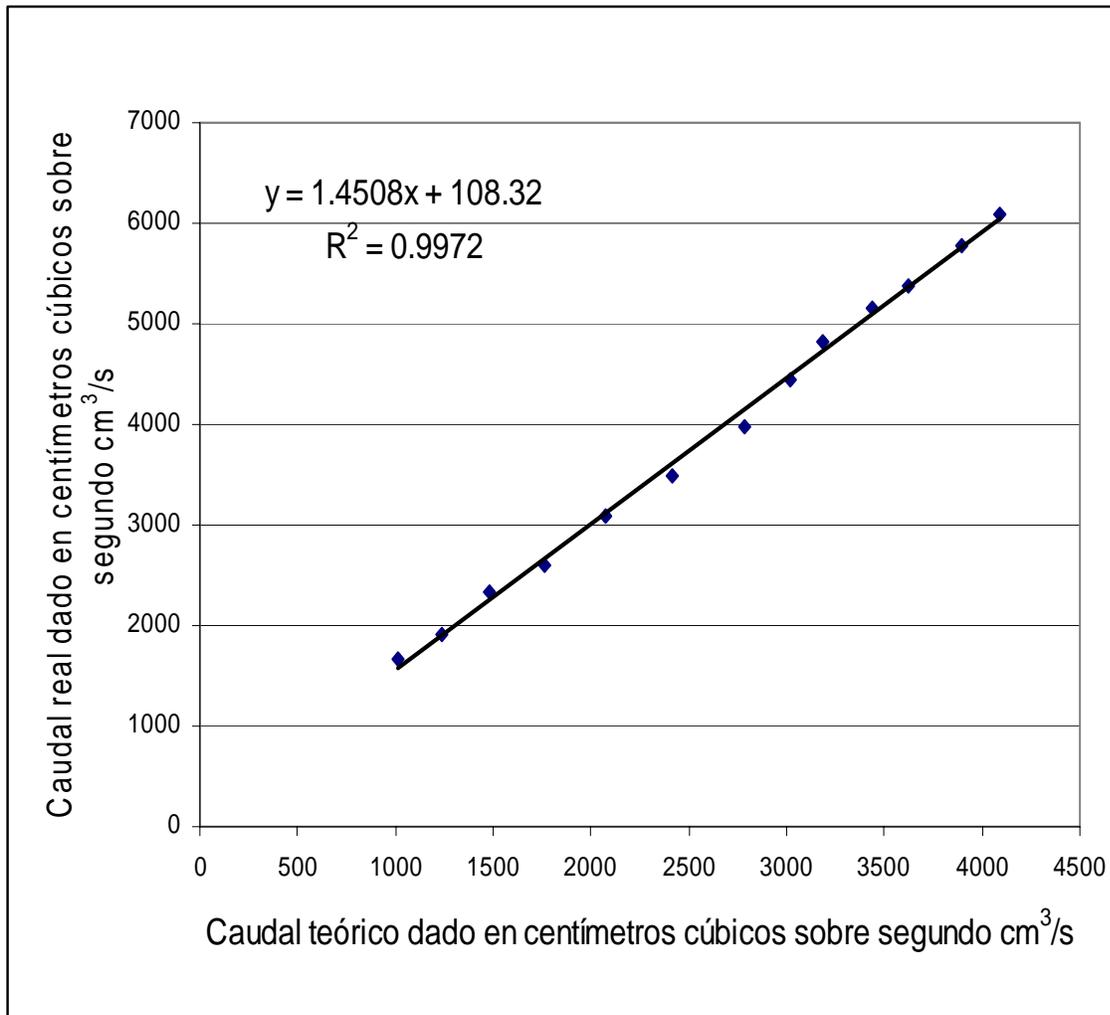


Figura 25. Gráfica de la regresión lineal para la determinación del coeficiente de descarga (Cd)



Obteniendo el coeficiente de descarga  $C_d = 1.4508$  nuestra ecuación para calcular el caudal en nuestra instalación nos queda de la siguiente manera:

$$Q = 1.4508 \left( 1.145 \cdot h^{5/2} \right)$$