



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE  
SAN NICOLÁS DE HIDALGO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**“DISEÑO Y ADAPTACIÓN DEL INYECTOR AL  
PROTOTIPO DE LA MICROTURBINA PELTON  
UBICADA EN EL LABORATORIO DE  
INGENIERÍA ELÉCTRICA”**

**TESIS**

Que para obtener el Título de:

**INGENIERO ELECTRICISTA**

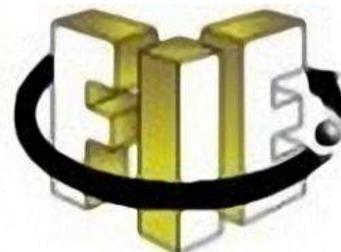
Presenta:

**Darío Cárdenas Pérez**

Asesor de Tesis:

**Ing. Víctor Quintero Rojas**

Morelia, Michoacán. Noviembre del 2011



## **Agradecimientos**

- A mi asesor. Ing. Víctor por su infinita paciencia y ayuda en este trabajo de tesis, por sus consejos, por confiar en mí, pero sobre todo por su amistad.
- A mi hermana Brenda, que siempre fue mi modelo a seguir, como estudiante y profesionalista.
- A mi hermana Denalyn, que es mi motivo de alegría y tranquilidad.
- A todos mis amigos, pero en especial a Brenda, Fraga, Edgar, Jorge, Aldo y Norberto, que siempre estuvieron ahí para los buenos y malos momentos de mi vida.

# Dedicatoria

Dedico esta tesis con mucho cariño:

- ❖ A mis padres Carmen y Severo, a quienes amo y admiro profundamente, les dedico esta tesis por haberme brindado su comprensión y apoyo incondicional durante toda mi vida académica, por sus consejos que me orientaron a tomar las mejores decisiones y por creer en mi.

# Resumen

En este trabajo de tesis se diseña y adapta un inyector de agua para una micro-turbina Pelton, ya existente en el Laboratorio de Ingeniería Eléctrica (LIE), la importancia que tiene el diseño del inyector para esta turbina, así como sus ecuaciones que rigen su elaboración, las características que se deben de tomarse en cuenta para su construcción y también la importancia que representa el caudal para realizar este diseño, todo esto es importante para lograr tener la máxima eficiencia de esta micro-turbina. Se realizaron las pruebas necesarias para asegurar que se logró mejorar la eficiencia de la turbina, y especificar todos los resultados obtenidos.

# Contenido

Agradecimientos .....	i
Dedicatoria .....	ii
Resumen .....	iii
Contenido .....	iv
Lista de Figuras .....	vii
Lista de Tablas .....	ix
Lista de Símbolos y Abreviaciones .....	x
<b>Capítulo 1. Introducción</b> .....	<b>1</b>
1.1. Propuesta de diseño .....	3
1.2. Objetivo .....	3
1.3. Justificación .....	3
1.4. Metodología .....	4
1.5. Contenido de la tesis .....	4
<b>Capítulo 2. Breve historia de las turbinas hidráulicas</b> .....	<b>6</b>
2.1 Primeras turbinas .....	7
2.2 Turbina Pelton .....	9
2.3 Distribuidor de una turbina Pelton .....	10
2.3.1 Elementos constitutivos de un distribuidor .....	11
2.4 La Hidrodinámica de Daniel Bernoulli .....	16
2.4.1 El principio de Bernoulli .....	17
2.4.2 Ecuación de Bernoulli para el fluido real con pérdidas .....	17
2.4.3 Ecuación de Bernoulli generalizada .....	18

<b>Capítulo 3. Elección entre Inyector y Eyector</b>	20
3.1 El inyector .....	21
3.1.1. Condiciones actuales del Inyector .....	22
3.1.2. Diámetro del Inyector.....	23
3.1.3. Velocidad del chorro a la salida del Inyector .....	24
3.2 El caudal .....	25
3.2.1. Cálculo del caudal de agua en tubería .....	25
3.3 Condiciones actuales del sistema de bombeo .....	27
3.4 Parámetros actuales del sistema de bombeo .....	28
3.4.1. Caudal actual de la bomba centrífuga .....	28
3.4.2. Potencia entregada por el sistema de bombeo .....	30
<b>Capítulo 4. Modificación y adaptación del inyector</b>	33
4.1 Características del inyector existente .....	33
4.2 Características del inyector nuevo .....	34
4.2.1 Pruebas y resultados .....	35
4.3 Re-adaptación del inyector .....	36
4.3.1 construcción del inyector .....	36
4.3.2 Equipo para el diseño del inyector .....	36
4.3.3 Tobera .....	36
4.3.4 Regulador de caudal .....	38
4.4 Características de la válvula de esfera .....	39
4.5 Armado del inyector .....	41
4.6 Colocación del nuevo inyector .....	41
4.6.1 Sistema de bombeo .....	43
4.6.2 Medición del caudal .....	44
4.7 Pruebas del sistema de generación .....	45
4.7.1 Generación de energía eléctrica .....	47
4.7.2 Mediciones de voltaje generado utilizando la micro turbina Pelton	49
4.8 Apertura a ¼ de la válvula .....	51

4.8.1 Apertura a ½ de la válvula .....	52
4.9 Comparación de resultados .....	52
<b>Capítulo 5. Conclusiones y Trabajos Futuros</b> .....	<b>54</b>
5.1 Conclusiones .....	54
5.2 Trabajos futuros .....	55
<b>Referencias</b> .....	<b>56</b>

# Lista de Figuras

1.1 Distribuidor y rotor .....	2
1.2 Diferencia de nivel existente entre la entrada y la salida del agua de alimentación a una turbina.....	2
2.1 Rueda Persa .....	6
2.2 Diferentes tipos de ruedas hidráulicas .....	8
2.3 Partes principales de la turbina .....	9
2.4 Esquema de un distribuidor .....	10
2.5 Componentes de una turbina Pelton de eje horizontal, con dos equipos de inyección .....	11
2.6 Cámara de distribución de una turbina Pelton .....	12
2.7 Inyector .....	13
2.8 Detalles de la tobera de una turbina Pelton .....	13
2.9 Distintos aspectos de la aguja o punzón, del inyector de una turbina Pelton	14
2.10 Representación esquemática de la actuación de un deflector .....	15
2.11 Corriente de un fluido ideal en régimen rotacional entre dos placas paralelas .....	16
3.1 Eyector .....	20
3.2 Inyector .....	20
3.3 Regulador .....	22
3.4 Chorro incidiendo sobre los álabes de la turbina .....	23
3.5 Corriente de un fluido ideal en régimen rotacional entre dos placas paralelas .....	26
3.6 Sistema de bombeo .....	28
4.1 Inyector existente .....	33
4.2 Inyector colocado y en funcionamiento .....	34
4.3 Inyector con regulación de caudal .....	35
4.4 Embudo .....	37
4.5 Tobera .....	37
4.6 Válvula de esfera .....	38

4.7 Representación de la válvula de esfera corte transversal .....	39
4.8 Inyector armado .....	41
4.9 Inyector armado vista superior .....	41
4.10 Inyector mejorado .....	42
4.11 Válvula de esfera acoplada con la tobera .....	43
4.12 Acoplamiento del motor trifásico .....	44
4.13 Caudalímetro .....	45
4.14 Vista general de rieles y turbina .....	45
4.15 Prueba de bombeo con el nuevo inyector .....	46
4.16 Vista desde otro ángulo .....	47
4.17 Conexión interna del motor trifásico .....	47
4.18 Conexión física de la máquina síncrona .....	48
4.19 Sistema de generación eléctrica .....	49
4.20 Turbina en operación lado frontal .....	50
4.21 Turbina en operación lado posterior .....	50
4.22 Turbina en operación lado superior .....	51
4.23 Inyector existente .....	53
4.24 Inyector mejorado .....	53

# Lista de Tablas

3.1 Voltaje aplicado a la bomba y tiempos de llenado del recipiente .....	29
3.2 Revoluciones de la bomba centrífuga y tiempos de llenado .....	29
3.3 Caudales .....	30
3.4 Altura simulada por la bomba en metros .....	31
4.1 Resultados obtenidos .....	35
4.2 Resultados de las pruebas a $\frac{1}{4}$ de apertura de la válvula .....	51
4.3 Resultados de las pruebas a $\frac{1}{2}$ de apertura de la válvula .....	52
4.4 Revoluciones y voltaje obtenido en el generador de CD .....	52
4.5 Revoluciones y voltaje obtenido en el generador de CA .....	52

# Lista de Símbolos y Abreviaturas

<i>K</i>	kilo
<i>M</i>	metro
<i>W</i>	watts
<i>Hz</i>	hertz
<i>W-h</i>	watt-hora
<i>G</i>	aceleración de la gravedad
<i>T</i>	tiempo
<i>d/dt</i>	derivada con respecto del tiempo
$\Omega$	ohms
<i>P</i>	potencia real
<i>V</i>	voltaje
<i>Rpm</i>	revoluciones por minuto
<i>LIE</i>	laboratorio de ingeniería eléctrica
<i>S</i>	segundo
<i>Lts</i>	litros
<i>CD</i>	corriente directa
<i>CA</i>	corriente alterna
<i>Plg</i>	pulgada
<i>I</i>	corriente
<i>HP</i>	caballos de fuerza
<i>Q</i>	caudal

# Capítulo 1

## Introducción

La aplicación inmediata del trabajo mecánico desarrollado en la turbina, es la de hacer girar al rotor del generador de energía eléctrica, en el cual se realiza la transformación de la energía mecánica en energía eléctrica. Todo ello, como consecuencia de estar rígidamente unidos, generalmente, los ejes de ambas máquinas, turbina-generador, formando un eje único con el que se obtiene sincronismo de giro entre las mismas, es decir, idéntico número de revoluciones durante espacios de tiempo iguales.

En base a la anterior consideración, podemos decir que turbina hidráulica es la máquina destinada a transformar la energía hidráulica, de una corriente o salto de agua, en energía mecánica. Por lo tanto, toda turbina convierte la energía del agua, manifestada bien en su forma de presión (energía potencial) como en la de velocidad (energía cinética), en el trabajo mecánico existente en un eje de rotación.

Hemos expuesto ¿qué? función tiene una turbina. Ahora se trata de analizar ¿cómo? se origina esa función en la misma.

Una turbina hidráulica es accionada por el agua en movimiento, una vez que ésta es debidamente encauzada hacia el elemento de turbina denominado distribuidor, el cual, circularmente, distribuye, regula y dirige un caudal de agua que tiende a incidir, con mayor o menor amplitud, hacia el centro del círculo descrito, sobre un rotor o rueda móvil conocida con el nombre de rotor, que, conjuntamente con el eje en el que está montado, ha de estar perfectamente equilibrado dinámica y estáticamente (Fig. 1.1).

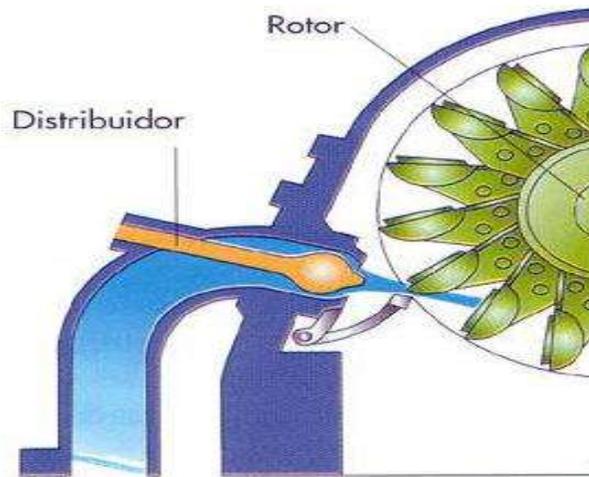


Fig. 1.1 - Distribuidor y Rotor.

De lo expuesto se deduce cómo la energía del agua, originalmente la mayoría de los casos en forma de energía potencial de tipo gravitatorio, se convierte en energía cinética al pasar sucesivamente por el distribuidor y el rodete, debido a la diferencia de nivel existente entre la entrada y la salida de la conducción (Fig. 1.2). En consecuencia, se provocan cambios en la magnitud y dirección de la velocidad del fluido, lo que hace que se produzcan fuerzas tangenciales en el rodete, generándose así energía mecánica al girar éste.

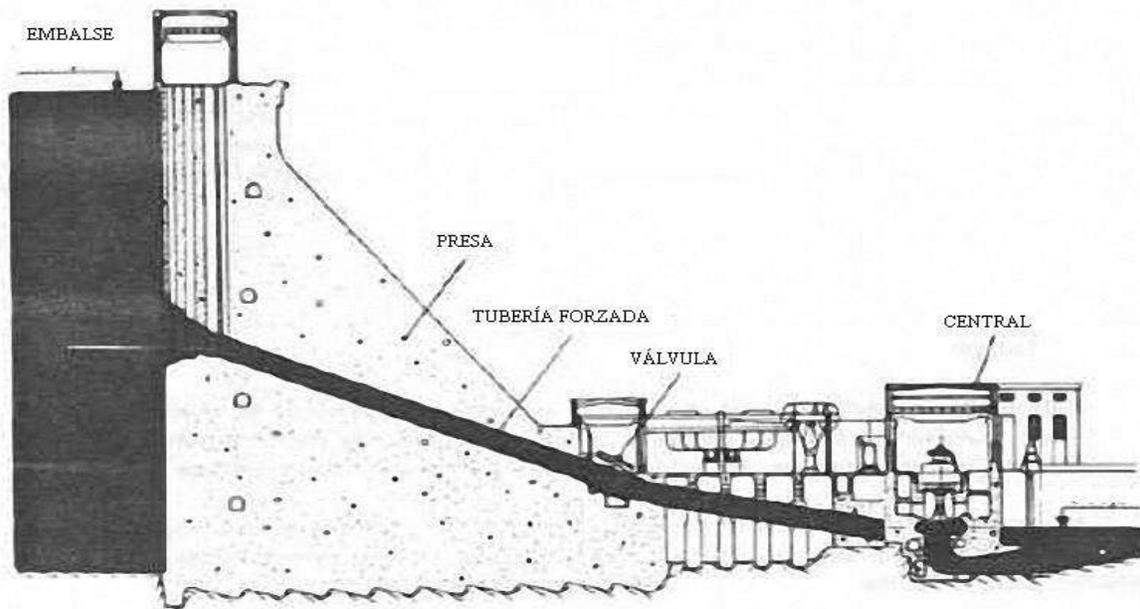


Fig. 1.2 - Diferencia de nivel existente entre la entrada y la salida del agua de alimentación a una turbina.

El rendimiento de las instalaciones con turbinas hidráulicas, siempre es elevado, pudiendo llegar desahogadamente al 90% o más, después de tener en cuenta todas las pérdidas hidráulicas por choque, de caudal, de fricción en el generador, mecánicas, etc.

## **1.1 Propuesta de diseño**

El diseño que se propone (Fig. 1.1) consiste en un distribuidor a escala para ser colocado en la micro-turbina anteriormente mencionada, especificar los elementos mecánicos que son importantes para el distribuidor, las características de su construcción y poder lograr la mayor incidencia del chorro hacia los alabes, para tener la máxima eficiencia de la turbina.

## **1.2 Objetivo**

El objetivo de esta tesis pretende diseñar, calcular y renovar el inyector de agua para ayudar al mejoramiento de la micro-turbina Pelton que se encuentra en el LIE, para que alumnos que lleven materias que involucren máquinas o generadores puedan realizar prácticas futuras, entender mejor el funcionamiento y la importancia que tienen estas plantas hidroeléctricas como energías renovables. En pruebas realizadas anteriormente la micro-turbina Pelton, arrojó una potencia de 40 Watts (W) a 3300 revoluciones por minuto con ayuda de un motor primario (r.p.m.); por lo que se pretende en este diseño mejorar esa potencia sin necesidad de tener un motor primario, utilizando herramientas que se encuentren en el LIE.

## **1.3 Justificación**

Las pérdidas de carga se producen por la fricción (rozamiento) del fluido con la superficie de la tubería de conducción forzada. Las pérdidas de carga dependen de la naturaleza de las paredes internas de dicha conducción, del caudal, de la sección y de la longitud de la misma. A mayor caudal o menor sección (aumento de la velocidad del líquido) aumentan las pérdidas de carga. A mayor longitud de la tubería mayor son dichas pérdidas. Si el caudal se hace cero la pérdida de carga desaparece.

Actualmente la turbina cuenta con una tubería que hace las veces del distribuidor y del chiflón, no tiene una fijación adecuada para proporcionar la máxima potencia, por lo que se hace necesario diseñar y construir este sistema hidráulico para ser más eficiente dicha turbina.

De acuerdo a esto es importante analizar, diseñar y mejorar el distribuidor para lograr tener la mínima pérdida de carga que sea posible, realizar y comprobar los cálculos necesarios para tener la máxima eficiencia. Estas comprobaciones pueden también justificarse para la fabricación de un distribuidor en tamaño real. Este diseño permitirá que generaciones futuras puedan corroborar aspectos teóricos aprendidos en el aula.

## **1.4 Metodología**

La metodología aplicada en este trabajo de tesis es la siguiente

- Investigar artículos.
- Consultar libros.
- Revisar tesis que hablen de la turbina Pelton.
- Obtener información que lleve al mejoramiento del inyector.
- Calcular parámetros reales.

## **1.5 Contenido de la tesis**

La organización de la presente tesis es la siguiente:

En el capítulo 1 se describe una introducción sobre esta tesis, el objetivo al cual se quiere llegar, la metodología que se va a utilizar, la justificación y la propuesta de diseño.

En el capítulo 2 se describe una breve historia de las turbinas, de donde surge la idea de generar energía hidráulica, cuáles fueron los modelos a seguir, hago mención especial sobre la turbina Pelton que es el tema de interés, comento acerca de las partes que conforman a la turbina especialmente del distribuidor y sus partes. Explico brevemente sobre los aportes

que realizó Daniel Bernoulli hacia la Hidrodinámica y las ecuaciones que son necesarias entender para el caudal que circula por una tubería.

En el capítulo 3 Se abordan los temas relacionados con el aspecto constructivo de un inyector.

En el capítulo 4 Se aborda el tema del material necesario para construir un inyector, cómo se elaboró, y la representación física del inyector construido y adaptado a la micro turbina Pelton.

En el capítulo 5 Se dan las conclusiones de la tesis así como una explicación de sí se logro el objetivo, también se da la oportunidad de realizar trabajos futuros que lleven a poder diseñar otro inyector.

## Capítulo 2

# Breve historia de las turbinas hidráulicas

No se sabe con exactitud quién, dónde o hace cuanto tiempo se aprovechó por primera vez la fuerza y energía que posee una corriente de agua, aunque parece probable que la inspiración haya venido de otro uso más antiguo del agua: la irrigación. Eran empleados diversos medios en los tiempos antiguos para elevar el agua de los ríos a una altura mayor que la de sus márgenes, de donde correría por canales y zanjas a los campos. Uno de éstos era la rueda persa o saqia (Fig. 2.1) que es una rueda grande montada en un eje horizontal con cucharas en su periferia. Estas ruedas pueden verse todavía trabajando en Egipto, acopladas a engranes y movidas por un búfalo, burro o camello.

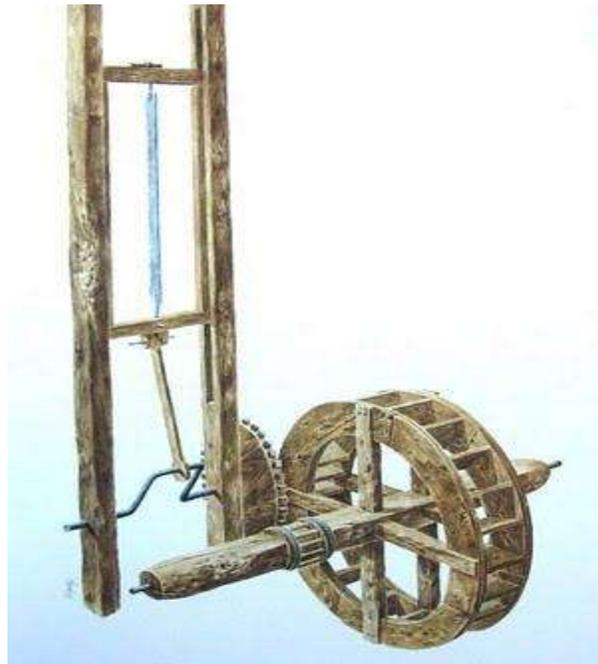


Fig. 2.1 - Rueda Persa.

Los romanos conocían y usaban las ruedas hidráulicas como una fuente de fuerza mecánica, y la Historia recoge el nombre de Vitruvius como el ingeniero que llevó a cabo tal modificación. Se cree que las guarniciones del muro Adriano, tenían unas cuantas ruedas hidráulicas para mover molinos de trigo; pero quizás porque contaban con abundantes esclavos, los romanos no explotaron la energía de la corriente de agua extensamente. En su imperio, el trigo se molía generalmente en molinos de mano, algunos de los cuales se han encontrado en los sitios donde existieron colonias romanas en Inglaterra.

Las ruedas hidráulicas comunes que obran principalmente por el peso del agua, por ser las más elementales y obvias fueron también las primeras turbinas que construyó el hombre.

## **2.1 Primeras turbinas**

Las primeras ruedas hidráulicas se construyeron posiblemente en Asia, China y la India, hace unos 2200 años; de Asia pasaron a Egipto y desde allí a Europa (unos 600 años después que en Asia) y América. *Leonardo Da Vinci, Galileo y Descartes*, entre otros, realizaron estudios teóricos y matemáticos sobre las ruedas hidráulicas. Las figuras siguientes (Fig. 2.2a, b, c, d, e, f) presentan los tipos principales de ruedas hidráulicas y en ellas se puede notar su evolución en el uso, no sólo de la energía gravitacional sino también de la variación de la cantidad de movimientos, constituyéndose así estas ruedas en las precursoras de las modernas turbinas hidráulicas. El uso de la energía hidráulica no es nada nuevo y se remonta a más de 2000 años atrás, pero se desarrollo lentamente durante espacio de 18 siglos, debido al inconveniente de que las instalaciones deberían situarse junto a los ríos; mientras que las máquinas de vapor se podían instalar en cualquier lado. Al evolucionar la tecnología de la transmisión eléctrica, está permitió el gran desarrollo de las plantas hidroeléctricas y por consiguiente, de las turbinas hidráulicas.

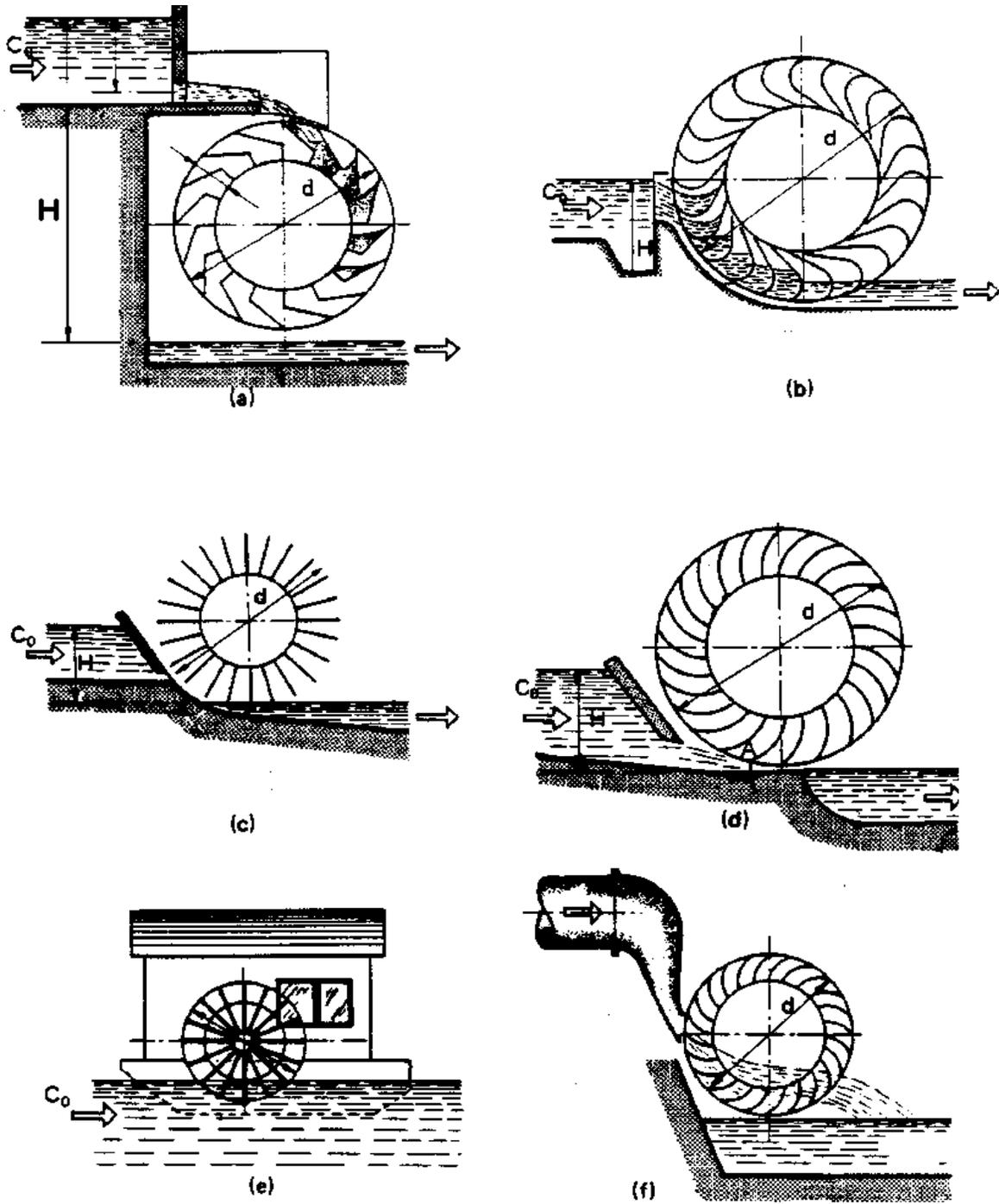


Fig. 2.2. - Diferentes tipos de ruedas hidráulicas: a) alimentación superior b) lateral; c) de paletas planas; d) de impulsión inferior; e) paletas de alimentación inferior; f) turbina Banki.

## 2.2 Turbina Pelton

Las turbinas Pelton (Fig. 2.3), se conocen como turbinas de presión por ser ésta, constante en la zona del rodete, de chorro libre, de impulsión, o de admisión parcial por ser atacada por el agua sólo una parte de la periferia del rodete. El rodete o rueda Pelton, como se muestra en la figura 2.3 (a), está constituido por un disco de acero con álabes periféricos en forma de doble cuchara. En la figura 2.3 (b), se muestra el tipo de presa en las cuales son colocadas las turbinas Pelton, como debe de incidir el chorro de agua y el modo en que la energía potencial se convierte en energía cinética.

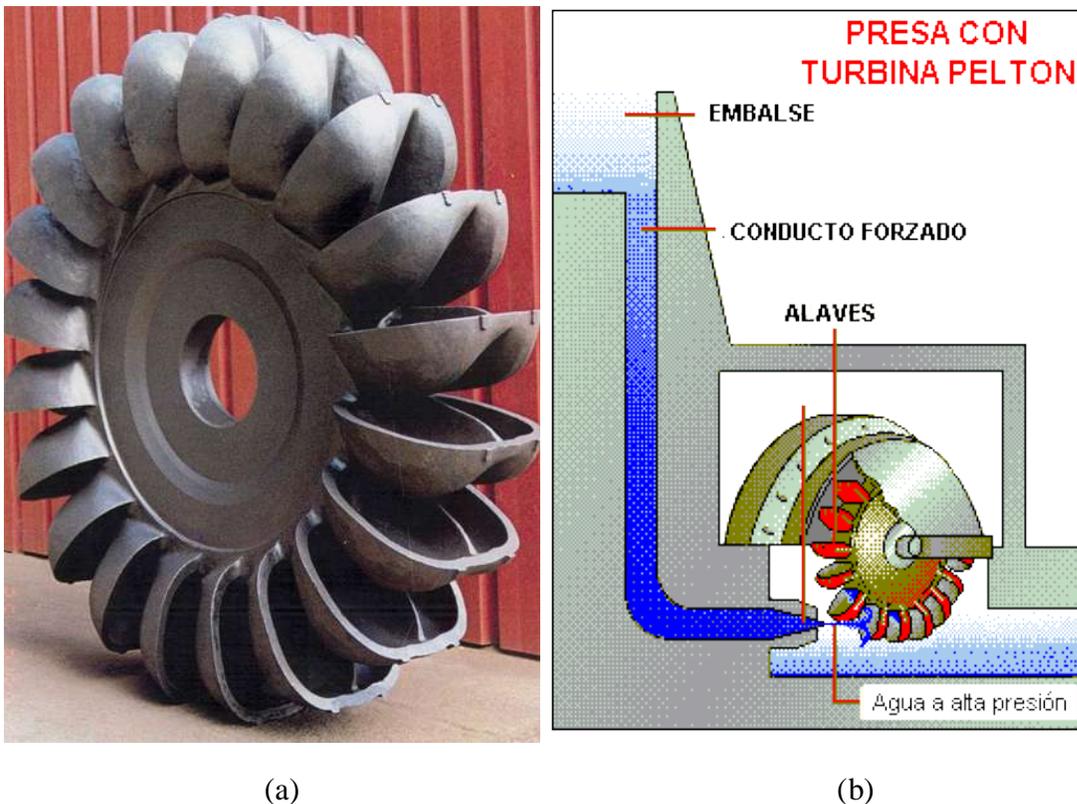


Fig.2.3 - Partes principales de la turbina a) Rodete de la Turbina Pelton, b) Presa con Turbina Pelton.

Su utilización es idónea en saltos de gran altura (alrededor de 200 m y mayores), y caudales relativamente pequeños (hasta  $10 \text{ m}^3/\text{s}$  aproximadamente).

Por razones hidroneumáticas, y por sencillez de construcción, son de buen rendimiento para amplios márgenes de caudal (entre 30 % y 100 % del caudal máximo). Por ello se colocan pocas unidades en cada central que requiere turbinas de estas características.

Pueden ser instaladas con el eje en posición vertical u horizontal, siendo esta última disposición la más adecuada, la cual nos servirá de referencia para hacer las descripciones necesarias.

### 2.3 Distribuidor de una turbina Pelton

Está constituido por uno o varios equipos de inyección de agua. Cada uno de dichos equipos, formado por determinados elementos mecánicos, tiene como misión dirigir, convenientemente, un chorro de agua, cilíndrico y de sección uniforme, que se proyecta sobre el rodete, así como también, regular el caudal preciso que ha de fluir hacia dicho rodete, llegando a cortarlo totalmente cuando proceda (Fig. 2.4).

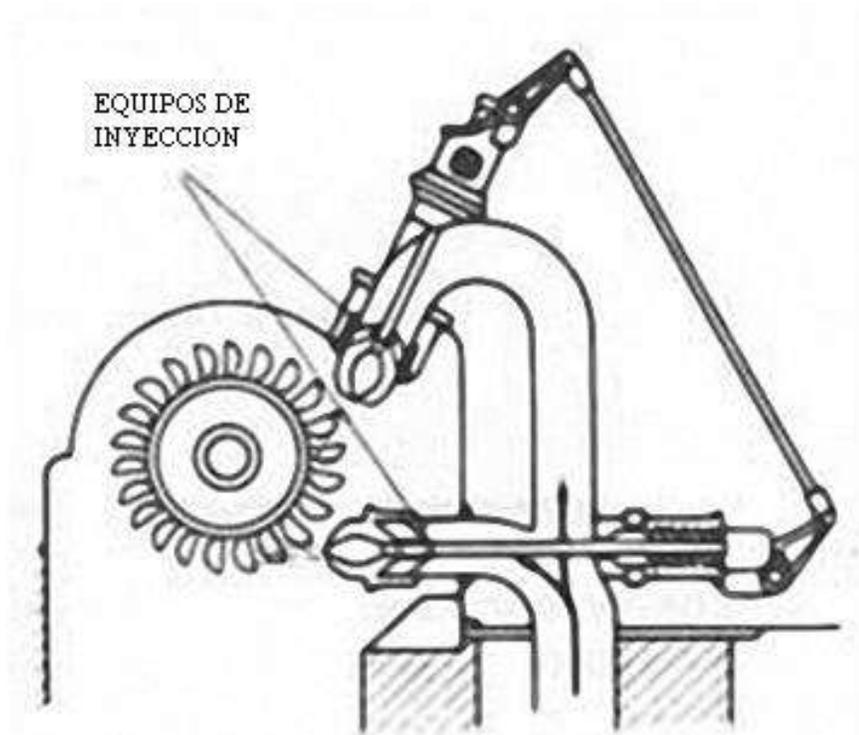


Fig. 2.4 - Esquema de un distribuidor.

El número de equipos de inyección, colocados circunferencialmente alrededor de un rodete, depende de la potencia y características del grupo, según las condiciones del salto de agua. Así mismo, se puede disponer de más de un rodete en el mismo eje, cada uno de ellos dotado del distribuidor apropiado.

Hasta seis suelen ser los equipos que proyectan chorros de agua sobre un mismo rodete, derivando todos y cada uno de ellos de la tubería forzada. Dicho número de equipos de inyección, se instala en turbinas Pelton con eje vertical, siendo, normalmente, uno o dos inyectoros los instalados cuando la disposición del eje es horizontal (Fig. 2.5).

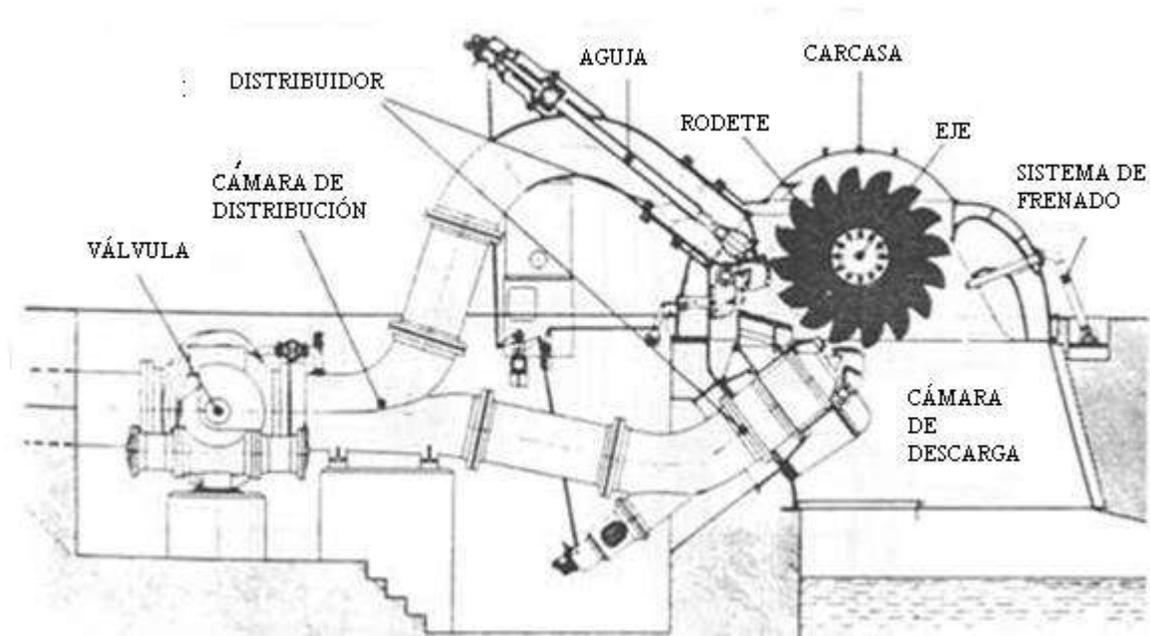


Fig. 2.5 - Componentes de una turbina Pelton de eje horizontal, con dos equipos de inyección.

### 2.3.1 Elementos constitutivos de un distribuidor

Para mejor comprensión, describiremos los elementos que forman un solo equipo de inyección, mediante el cual se obtiene un chorro de agua. Estos elementos son:

### A) Cámara de distribución

Consiste en la prolongación de la tubería forzada, acoplada a ésta mediante brida de unión, posteriormente a la situación de la válvula de entrada a turbina, según la trayectoria normal del agua (Fig. 2.5). También se nombra cámara de inyectores.

Tiene como misión fundamental, conducir el caudal de agua. Igualmente, sirve de soporte a los demás mecanismos que integran el distribuidor (Fig. 2.6).

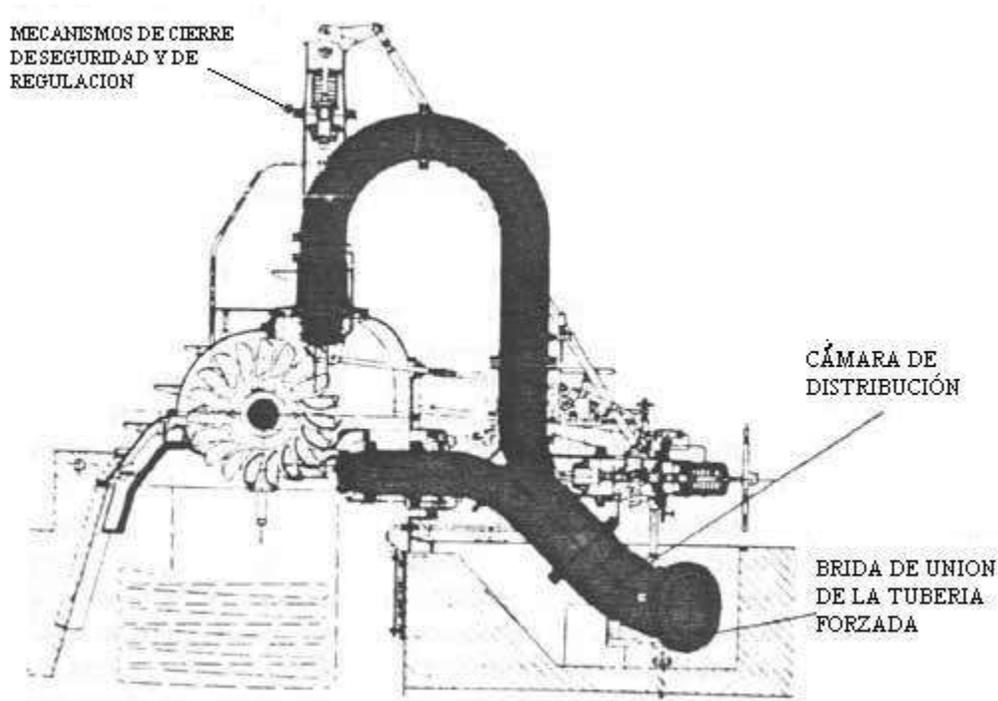


Fig. 2.6 - Cámara de distribución de una turbina Pelton.

### B) Inyector

Es el elemento mecánico (Fig. 2.7) destinado a dirigir y regular el chorro de agua. Está compuesto por:

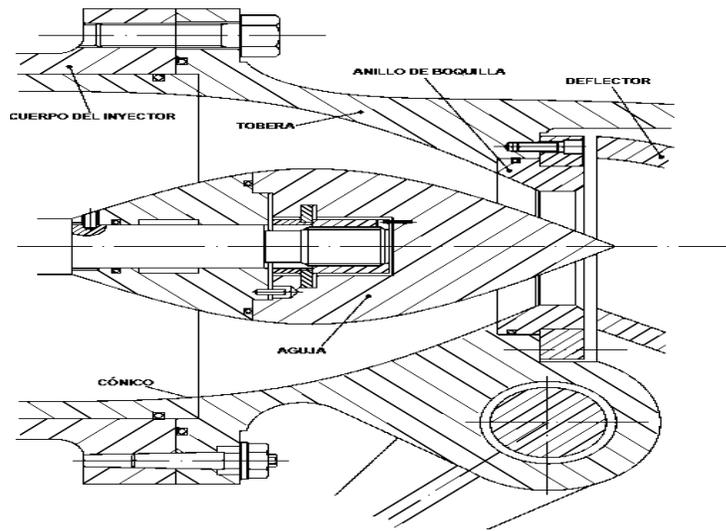


Fig. 2.7 – Inyector.

#### a) Tobera

Se entiende como tal, una boquilla, normalmente con orificio de sección circular (puede tratarse de otra sección), de un diámetro aproximado entre 5 y 30 cm, instalada en la terminación de la cámara de distribución (Fig. 2.8).

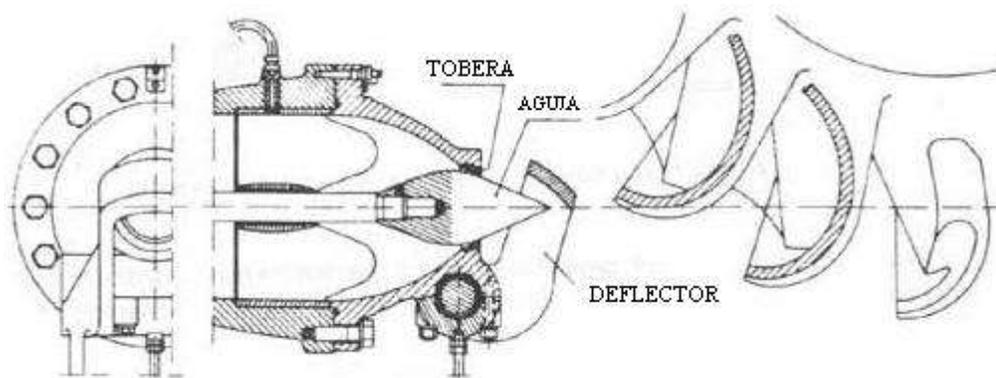


Fig. 2.8 - Detalles de la tobera de una turbina Pelton.

Proyecta y dirige, tangencialmente hacia la periferia del rodete, el chorro de agua, de tal modo que la prolongación de éste forma un ángulo prácticamente de  $90^\circ$  con los imaginarios radios de aquel, en los sucesivos puntos de choque o incidencia del agua. Con

lo últimamente expuesto se explica el concepto de turbina tangencial, del cual se hizo mención al iniciar el estudio de las turbinas Pelton.

### b) Aguja

Está formada por un vástago situado concéntricamente en el interior del cuerpo de la tobera, guiado mediante cojinetes sobre los cuales tiene un libre movimiento de desplazamiento longitudinal en dos sentidos (Fig. 2.7).

Uno de los extremos del vástago (Fig. 2.8), es orientado hacia el orificio de salida de la tobera, termina en forma esférico-cónica a modo de punzón (Fig. 2.9), fácilmente recambiable, el cual regula el caudal de agua que fluye por la misma, de acuerdo con el mayor o menor grado de acercamiento hacia el orificio, llegando a cortar totalmente el paso de agua cuando se produce el asentamiento de dicho punzón sobre el mencionado orificio, según las circunstancias de funcionamiento del grupo.

En el otro extremo (Fig. 2.6), están dispuestos mecanismos tales como un muelle de cierre de seguridad, que tiende a cerrar el orificio de tobera, presionando al punzón sobre el mismo, cuando la turbina está parada, o se pone fuera de servicio de manera brusca debido a un determinado defecto que afecte al grupo. También, sobre dicho extremo, actúan una serie de palancas o de servomecanismos, que regulan la posición del punzón, al que de ahora en adelante llamaremos aguja o válvula de aguja, según las órdenes recibidas del regulador de velocidad, al que nos referiremos más adelante.

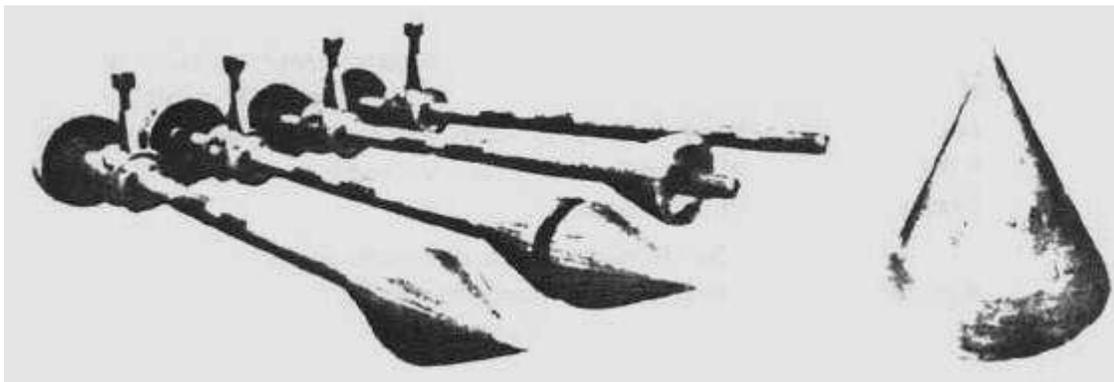


Fig. 2.9 - Distintos aspectos de la aguja o punzón, del inyector de una turbina Pelton. Detalle de punta de aguja erosionada.

### c) Deflector

Es un dispositivo mecánico que, a modo de pala o pantalla, puede ser intercalado con mayor o menor incidencia en la trayectoria del chorro de agua, entre la tobera y el rodete, presentando la parte cóncava hacia el orificio de tobera (Fig. 2.8 y 2.10).

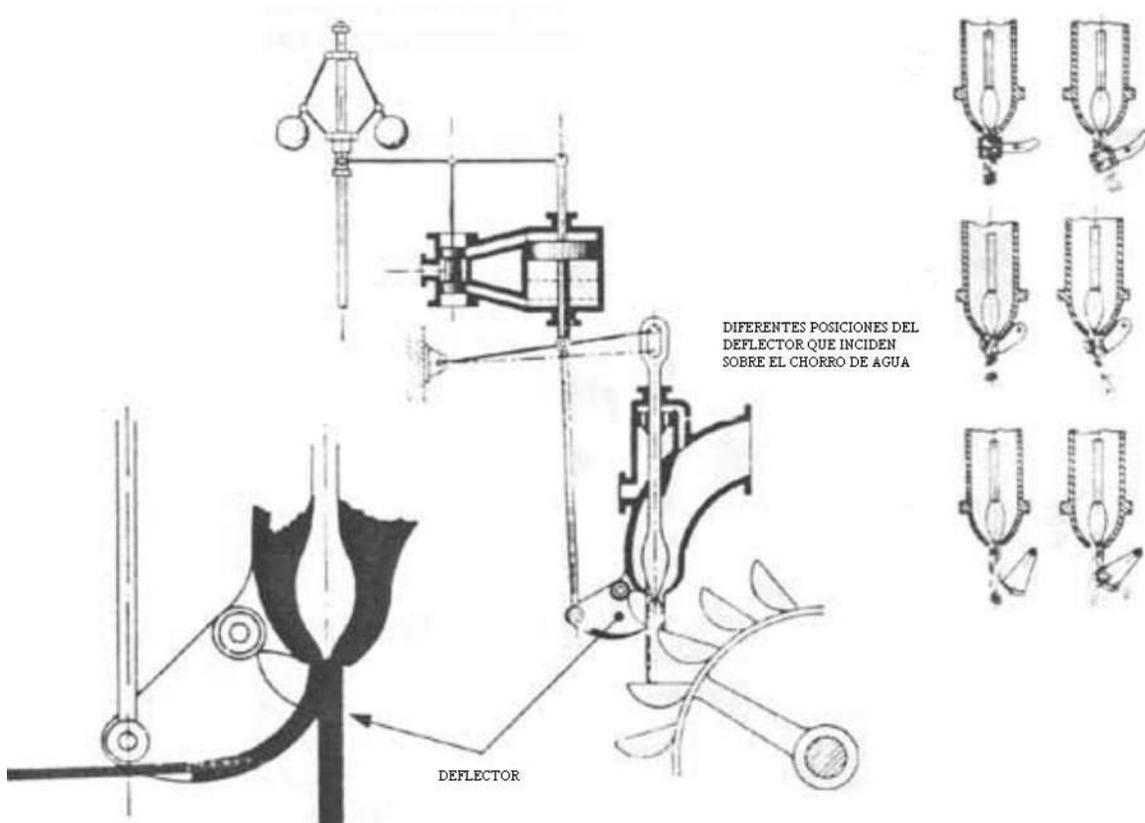


Fig. 2.10 - Representación esquemática de la actuación de un deflector. Distintas formas de acción sobre el chorro de agua.

Tiene como misión desviar, total o parcialmente según proceda, el caudal de agua, impidiendo el embalsamiento del rodete al producirse un descenso repentino de la carga. Su intervención, evita variaciones bruscas de presión en la tubería forzada, al permitir una respuesta más lenta de la válvula de aguja, ante fuertes oscilaciones de carga.

La situación del deflector se controla con el regulador de velocidad; al igual que las distintas secciones de paso de agua por las toberas, al controlar las posiciones de la válvula de aguja. Oportunamente se ampliarán estas actuaciones.

## 2.4 La Hidrodinámica de Daniel Bernoulli

Toda la estructura de la Hidrodinámica de Daniel Bernoulli, en la que investiga gran cantidad de problemas teórico-prácticos, gira en torno a un tema central, que se conoce como el teorema que lleva su nombre. Describe el movimiento de un fluido moviéndose a lo largo de una línea de corriente (Fig. 2.11). Y expresa que en un fluido ideal, sin viscosidad ni rozamiento, que circule por un circuito cerrado, la energía que posee se mantiene constante a lo largo de su recorrido.

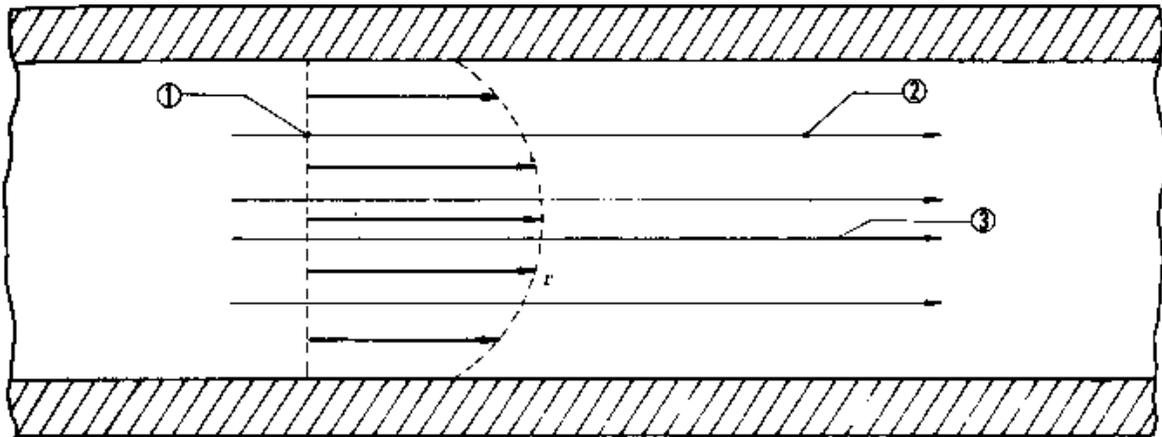


Fig. 2.11 - La figura representa la corriente de un fluido ideal en régimen rotacional entre dos placas paralelas. No hay pérdida de energía, pero en filamento de corriente 1-2 transporta menos energía que el filamento de corriente 3.

Si el régimen fuera irrotacional todas las líneas de corriente serían paralelas y equidistantes y todos los filamentos de corriente transportarían la misma cantidad de energía. La ecuación de Bernoulli en un fluido ideal en flujo irrotacional se cumpliría entre dos puntos cualesquiera aunque dichos puntos no pertenezcan a la misma línea de corriente.

### 2.4.1 El principio de Bernoulli

El principio de Bernoulli, también denominado ecuación de Bernoulli o Trinomio de Bernoulli (Ec. 2.1), describe el comportamiento de un fluido moviéndose a lo largo de una línea de corriente.

La energía de un fluido en cualquier momento consta de tres componentes:

Cinética: es la energía debida a la velocidad que posea el fluido.

Potencial gravitacional: es la energía debido a la altitud que un fluido posea.

Energía de flujo: es la energía que un fluido contiene debido a la presión que posee.

La siguiente ecuación conocida como " Ecuación de Bernoulli " consta de estos mismos términos.

$$\frac{v^2 \rho}{2} + P + \rho g z = \text{constantante} \quad (\text{Ec. 2.1})$$

Donde:

- $V$  = velocidad del fluido en la sección considerada.
- $g$  = aceleración gravitatoria
- $z$  = altura en la dirección de la gravedad desde una cota de referencia.
- $P$  = presión a lo largo de la línea de corriente.
- $\rho$  = densidad del fluido.

### 2.4.2 Ecuación de Bernoulli para el fluido real con pérdidas

En un fluido real la viscosidad origina un rozamiento tanto del fluido con el contorno (tubería, canal, etc.) cuanto de las partículas de fluido entre sí. Por lo tanto la ecuación de Bernoulli (Ec. 2.1) no se cumple, ya que esta es para un flujo de agua ideal.

Por lo tanto la ecuación que rige para el cálculo del caudal con pérdidas está dada por la ecuación siguiente (Ec. 2.2) expresada en alturas.

$$\frac{P_1}{\rho g} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} - H_{r1-2} = \frac{P_2}{\rho g} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g} \quad (\text{Ec. 2.2})$$

Donde:

- P = presión a lo largo de la línea de corriente.
- $\rho$  = densidad del fluido.
- z = altura en la dirección de la gravedad desde una cota de referencia.
- g = aceleración gravitatoria.
- $v_1$  y  $v_2$  = velocidades medias en las secciones 1 y 2.
- $H_{r1-2}$  = altura perdida entre el punto 1 y el punto 2

### 2.4.3 Ecuación de Bernoulli generalizada

Si la corriente atraviesa una o varias máquinas que le suministran energía (bombas) experimentan un incremento de energía que, expresada en forma de altura, la llamaremos  $\sum H_b$ . Asimismo si la corriente atraviesa una o varias máquinas a las que cede energía (turbinas) experimenta un decremento de energía que, expresada en forma de altura la llamaremos  $-\sum H_t$ . Por tanto:

La energía del fluido en el punto 1 - la energía perdida entre el punto 1 y el punto 2 + la energía suministrada al fluido por las bombas que haya entre el punto 1 y el punto 2 - la energía cedida por el fluido a las turbinas o motores que haya entre el punto 1 y el punto 2, ha de ser igual a la energía en el punto 2. En hidráulica se prefiere como hemos dicho, expresa todas estas energías en forma de alturas equivalentes (dividiendo todos los términos por g.) Expresando el párrafo anterior mediante una ecuación se tiene la siguiente expresión (Ec. 2.3):

$$\frac{p_1}{\rho g} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} - \sum H_{r1-2} + \sum H_b - \sum H_t = \frac{p_2}{\rho g} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g} \quad (\text{Ec. 2.3})$$

Donde:

$p_1/\rho g, p_2/\rho g$  = alturas de presión

$z_1, z_2$  = alturas geodésicas

$v_1^2/2g, v_2^2/2g$  = alturas de velocidad

$\Sigma H_{r1-2}$  = suma de todas las pérdidas hidráulicas entre 1 y 2

$\Sigma H_b$  = suma de los incrementos de altura proporcionados por las bombas instaladas entre 1 y 2

$\Sigma H_t$  = suma de los incrementos de altura absorbida por los motores (turbinas) instalados entre 1 y 2.

## Capítulo 3

### Elección entre Inyector y Eyector

El eyector acelera (o desacelera) una corriente de fluido produciendo una depresión (o compresión) (Fig. 3.1). El fluido puede ser agua, vapor de agua, aire, o cualquier otro gas. Si se utiliza para producir una compresión, se llama inyector (Fig. 3.2), si para producir una depresión o vacío eyector propiamente, o exhaustor. Este vacío puede utilizarse, por ejemplo, para elevar otro fluido igual o distinto, que se mezcla con el que produce vacío.

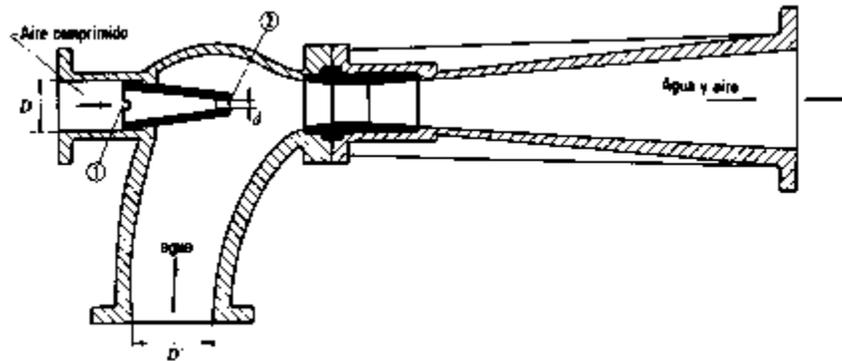


Fig. 3.1 - Eyector.

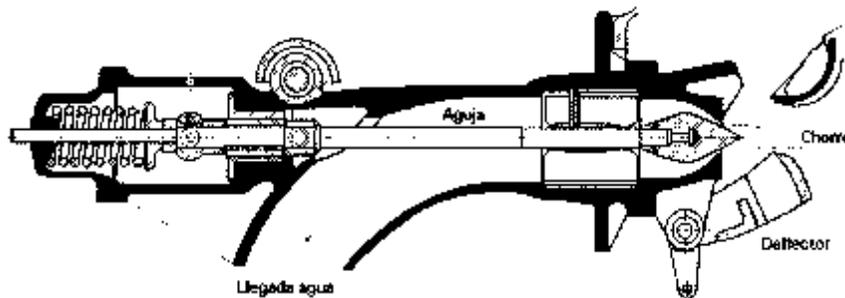


Fig. 3.2 - Inyector.

### 3.1 El inyector

El inyector es el órgano regulador del caudal del chorro; consta de una válvula de aguja cuya carrera determina el grado de apertura del mismo; para poder asegurar el cierre, el diámetro máximo de la aguja tiene que ser superior al de salida del chorro cuyo diámetro se mide en la sección contraída, situada aguas abajo de la salida del inyector y en donde se puede considerar que la presión exterior es igual a la atmosférica.

El chorro está constituido por un núcleo central convergente de agua y una sección anular creciente que contiene una emulsión de agua y aire.

Con el fin de asegurar una buena regulación, conviene diseñar el inyector de forma que exista una proporcionalidad entre la potencia de la turbina y la carrera  $x$  de la aguja, por cuanto la potencia es proporcional al caudal y éste, a su vez, a la sección de paso normal al flujo.

La variación del caudal del chorro para regular la potencia se consigue mediante una aguja de forma especial, con cuyo accionamiento se puede estrangular la sección de salida de la boquilla; su regulación puede ser manual o automática mediante un servomotor.

Tiene además otro sistema de regulación por desviación del chorro (Fig. 3.3), que consiste en una superficie metálica llamada deflector, que se introduce en medio del chorro, dividiéndolo y desviando una parte del mismo, de forma que en vez de dirigirse contra las cazoletas, sale lateralmente sin producir ningún efecto útil.

De esta forma se evitan sobrepresiones en la tubería, por cuanto el caudal que circula por ésta continua siendo el mismo, (Fig. 3.3). Cuando se dispone de un solo inyector, el rodete tiene el eje de giro horizontal y el eje de salida del chorro es tangente horizontal, inferior a la circunferencia del rodete, cuyo diámetro se denomina diámetro Pelton, cayendo el agua a la salida de las cucharas al fondo de la turbina, sin interferir el giro de la rueda.

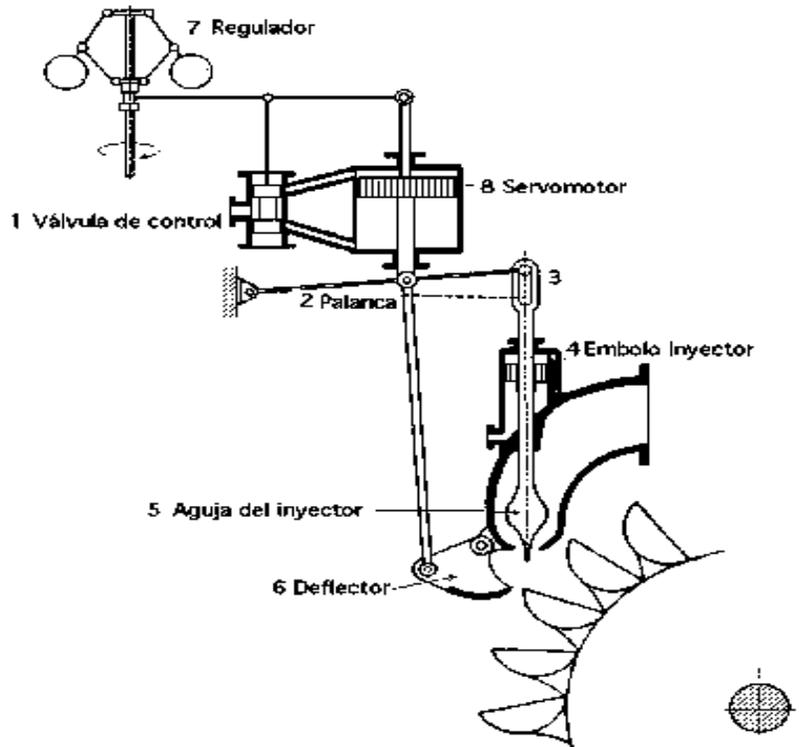


Fig. 3.3 - Regulador.

### 3.1.1 Condiciones actuales del Inyector

Actualmente el inyector fue colocado sin especificar un ángulo de incidencia hacia los álabes, ni tampoco se cálculo un caudal apropiado para generar una potencia deseada, las pruebas realizadas fueron hechas sin estos parámetros calculados, a continuación muestro una imagen (Fig. 3.4) que fue tomada al momento de realizar dichas pruebas.

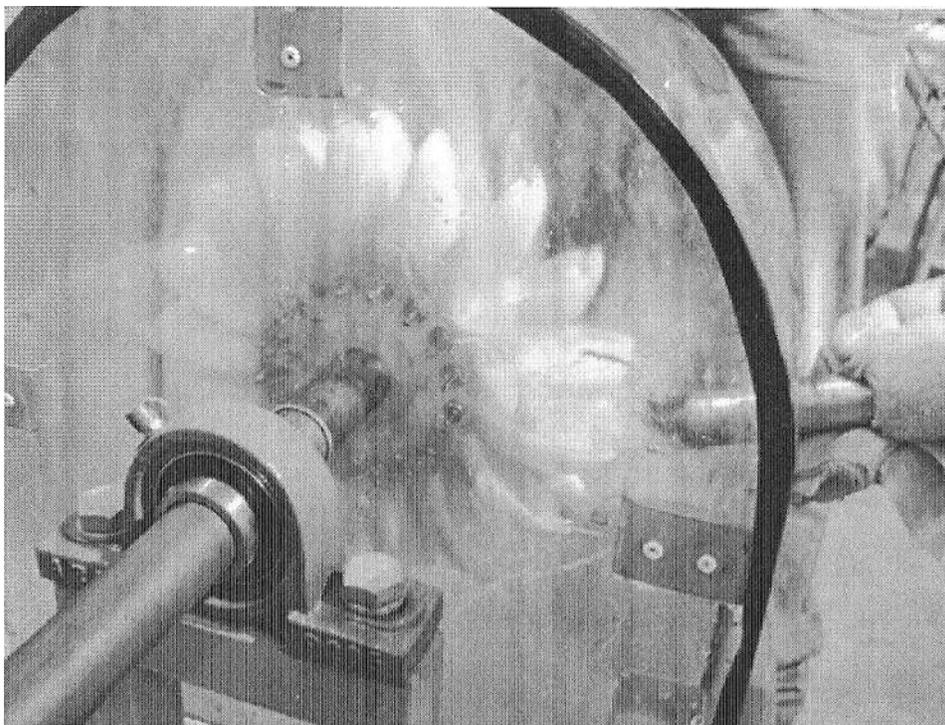


Fig. 3.4 - Chorro incidiendo sobre los álabes de la turbina.

La imagen muestra parte de la prueba que se hizo, en la cual se bloqueo el movimiento de la flecha para obtener una imagen clara de la entrada y salida del fluido en la cuchara, en la prueba se notó claramente como el chorro entra de una manera suave a la cuchara siguiente a la que impacta en el momento.

### **3.1.2 Diámetro del inyector**

El diámetro del chorro del inyector esta dado por el caudal que se disponga en el lugar donde se explotará el recurso hidráulico, a mayor caudal se puede contar con un chorro más grande para la turbina y si por el contrario se tiene un caudal menor se tendrá un chorro de diámetro pequeño.

Al momento de hablar del diámetro del chorro se deben considerar dos etapas del agua a través de la tobera.

- El diámetro del chorro  $d$  que es el diámetro de la salida de la tobera que aloja la aguja del inyector.
- El diámetro de salida del inyector  $d_0$  que es el diámetro del chorro en la vena contracta. El diámetro  $d$  de salida de la tobera será:

$$d = \frac{1}{C_c} d_0 \quad (\text{Ec. 3.1})$$

Donde  $C_c$  es el coeficiente de contracción, cuyo valor suele oscilar entre .87 y .8 y por lo tanto:

$$d = (1.15 - 1.25)d_0 \quad (\text{Ec. 3.2})$$

### 3.1.3 Velocidad del chorro a la salida del inyector

La velocidad del chorro está ligada directamente con la altura de salto disponible así como la gravedad, la velocidad teórica del chorro está dada por la siguiente ecuación:

$$c_1 = \sqrt{2gH} \quad (\text{Ec. 3.3})$$

En donde:

$c_1$  = es la velocidad del chorro al entrar en contacto con el álabe.

$g$  = es la aceleración debida a la fuerza de gravedad.

$H$  = es la altura del salto disponible.

Esto sería lo ideal pero la velocidad en la práctica se ve afectada por pérdidas en la tubería y el inyector y aquí es donde entra el coeficiente de velocidad  $k_{c1}$  y éste oscila entre .97 y .99 así que la velocidad del chorro queda de la siguiente manera:

$$c_1 = k_{c1}\sqrt{2gH} \quad (\text{Ec. 3.4})$$

## 3.2 El caudal

El caudal es la cantidad de fluido que pasa en una unidad de tiempo. Normalmente se identifica con el flujo volumétrico o volumen que pasa por un área dada en la unidad de tiempo. Menos frecuentemente, se identifica con el flujo másico o masa que pasa por un área dada en la unidad de tiempo.

### 3.2.1 Cálculo de caudal de agua en tubería

El cálculo del caudal de agua viene expresado por la ecuación de continuidad:

$$Q = V * S \quad (\text{Ec. 3.5})$$

En la que:

- Q es el caudal (m<sup>3</sup>/s)
- V es la velocidad (m/s)
- S es la sección de la tubería (m<sup>2</sup>)

Para que el fluido pase entre dos puntos a lo largo de una línea de flujo (Fig. 3.5), debe existir una diferencia de energía entre esos dos puntos. Esta diferencia corresponderá, exactamente, a las pérdidas por rozamiento, que son función de los organismos.

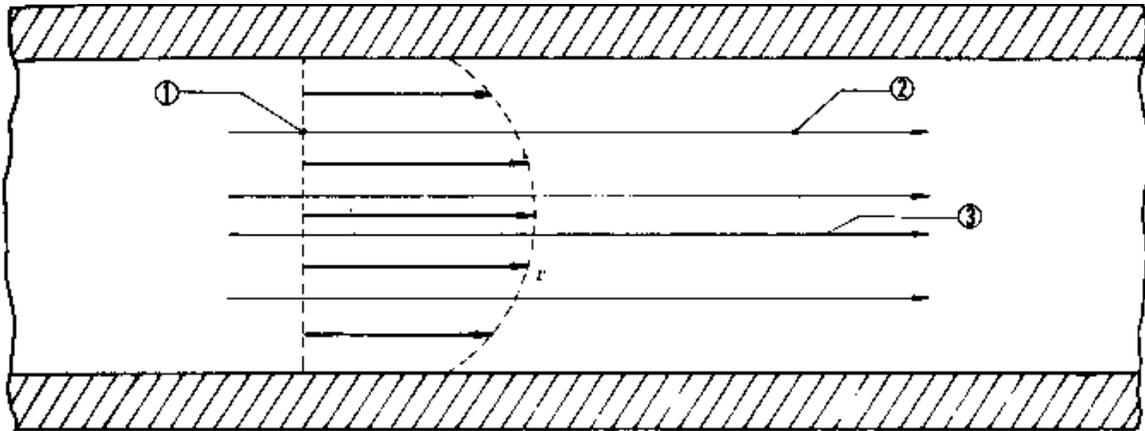


Fig. 3.5 - La figura representa la corriente de un fluido ideal en régimen rotacional entre dos placas paralelas. No hay pérdida de energía, pero en filamento de corriente 1-2 transporta menos energía que el filamento de corriente 3.

- la rugosidad del conducto
- la viscosidad del fluido
- el régimen de funcionamiento (régimen laminar o régimen turbulento)
- el caudal circulante, es decir de la velocidad (a más velocidad, más pérdidas)

El cálculo de caudales se fundamenta en el Principio de Bernoulli que, para un fluido sin rozamiento, se expresa como:

$$h + \frac{v^2}{2g} + \frac{P}{\rho g} = \text{constante} \quad (\text{Ec. 3.6})$$

Donde

- $g$  es la aceleración de la gravedad
- $\rho$  es la densidad del fluido
- $P$  es la presión

Se aprecia que los tres sumandos son, dimensionalmente, una longitud, por lo que el principio normalmente se expresa enunciando que, a lo largo de una línea de corriente, la

suma de la altura geométrica ( $h$ ) la altura de velocidad ( $\frac{v^2}{2g}$ ) y la altura de presión ( $\frac{P}{\rho g}$ ) se mantiene constante.

Considerando el rozamiento, la ecuación entre dos puntos 1 y 2 (Fig. 2.11) se puede expresar como:

$$h_1 + \frac{v_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\rho g} = h_2 + \frac{v_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\rho g} + \text{pérdidas}(1, 2) \quad (\text{Ec. 3.7})$$

O lo que es igual

$$(h_1 - h_2) + \frac{(v_1^2 - v_2^2)}{2g} + \frac{(P_1 - P_2)}{\rho g} = \text{pérdidas}(1, 2) \quad (\text{Ec. 3.8})$$

Donde pérdidas (1,2) es la pérdida de energía (o de altura) que sufre el fluido por rozamiento al circular entre el punto 1 y el punto 2. Esta ecuación es aplicable por igual al flujo por tuberías como por canales y ríos.

Si  $L$  es la distancia entre los puntos 1 y 2 (medidos a lo largo de la conducción), entonces el cociente (pérdidas (1,2)) /  $L$  representa la pérdida de altura por unidad de longitud de la conducción. A este valor se le llama pendiente de la línea de energía y se lo denomina **J**.

### 3.3 Condiciones actuales del Sistema de bombeo

El sistema de bombeo está conformado por una bomba centrífuga y un motor de corriente directa, el uso de un motor de C.D tiene la finalidad de poder controlar el caudal con que se alimentará la turbina y así poder recopilar datos para distintos caudales de operación. El recipiente en el cual es depositada el agua tiene la capacidad de almacenar 30 litros del líquido a utilizar, este volumen es suficiente para que la bomba realice la recirculación de la manera adecuada. En la figura 3.5 se puede ver la manera en que está conformado el quipo

de bombeo y cómo se conecta el recipiente contenedor del agua mediante tubería galvanizada (coples y codos), la figura muestra también un caudalímetro acoplado a la salida de la bomba centrífuga con la finalidad de poder tomar lectura del caudal bombeado hacia el sistema.

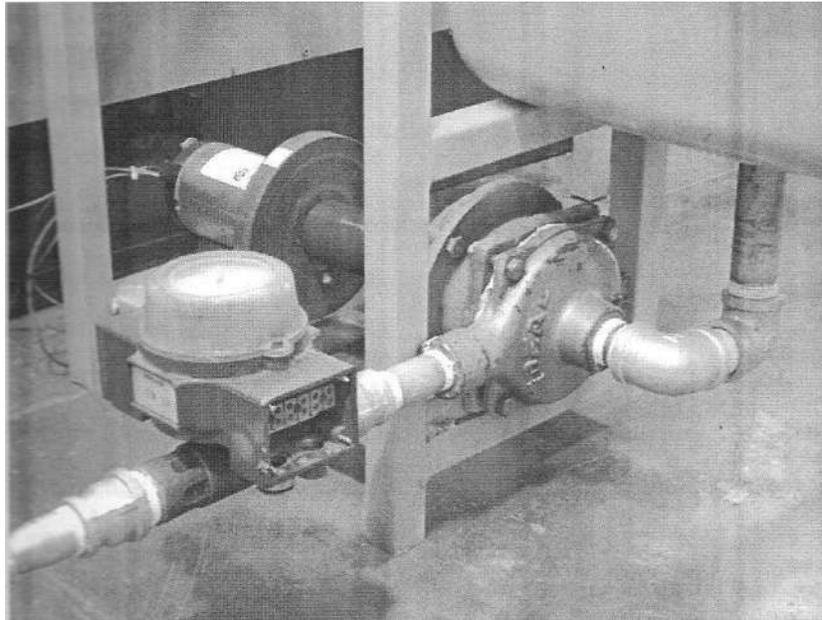


Fig. 3.6 - Sistema de bombeo.

### **3.4 Parámetros actuales del sistema de bombeo**

El sistema de bombeo cuenta con un caudalímetro para realizar las mediciones del caudal mas sin embargo, se decidió para una mayor precisión obtener el caudal aproximado que entrega la bomba centrífuga dependiendo de otros parámetros como son el voltaje de alimentación del motor de CD que impulsan la misma así como de las revoluciones a las que gira la bomba centrífuga. De esta manera se podrá conocer la potencia que consume el motor de CD la potencia hidráulica que la bomba entrega a la turbina, estos datos fueron los utilizados para hacer las mediciones correspondientes.

#### **3.4.1 Caudal actual de la bomba centrífuga**

La siguiente tabla (Tabla. 3.1) muestra el voltaje aplicado a la bomba y los tiempos de llenado del recipiente de 40 litros.

Voltaje (v)	Tiempos (s)
25.59	215.4
34.68	98.1
43.5	62
52.8	48.5
56	40
57	38.3
64	32
70	28

Tabla 3.1 - Voltaje aplicado a la bomba y tiempos de llenado del recipiente.

Las mediciones consistieron en llenar un recipiente de 40 litros (Lts.) con diferentes voltajes aplicados al primotor de la bomba cronometrando el tiempo que éste tarda en ser llenado. De las distintas mediciones realizadas se obtuvo como resultado la tabla 3.1. Donde la primera columna muestra los distintos voltajes aplicados al motor de CD, la segunda columna enlista los tiempos en los que se lleno el recipiente de 40 Lts. Con estos datos es posible obtener el caudal proporcionado a la turbina dependiendo del voltaje aplicado al primotor.

Otro parámetro que se tomó en cuenta al igual que el voltaje para hacer una comparación mas del caudal aportado por la bomba fueron las revoluciones a las que giraba ésta, así se tendrán dos puntos de referencia y obtener una aproximación más cercana del caudal entregado a la turbina. La tabla 3.2 muestra las revoluciones de la bomba y tiempos de llenado del recipiente utilizado en la medición.

r.p.m	Tiempos (s)
1240	215.4
1721	98.1
2147	62
2570	48.5
2747	40
2770	38.3
3140	32
3300	28

Tabla 3.2 - Revoluciones de la bomba centrífuga y tiempos de llenado.

Una vez determinado el tiempo que el recipiente tarada en ser llenado se puede obtener el caudal aproximado para cada voltaje de alimentación o revoluciones de la bomba centrífuga, sólo hay que dividir el volumen a ser llenado entre el tiempo, el resultado son los litros por segundo que la bomba entrega. Para el cálculo es conveniente manejar el volumen en metros cúbicos de tal manera que se hace la conversión de litros por segundo a metros cúbicos por segundo obteniendo la siguiente tabla.

Voltaje	r.p.m	L/s	$\frac{m^3}{s}$
25.59	1240	0.186027778	0.000186028
34.68	1721	0.408138889	0.000408139
43.5	2147	0.645138889	0.000645139
52.8	2570	0.824736111	0.000824763
56	2747	1	0.001
57	2770	1.044361111	0.001044361
64	3140	1.25	0.00125
70	3300	1.428333333	0.001428333

Tabla 3.3 - Caudales.

### 3.4.2 Potencia entregada por el sistema de bombeo

La potencia hidráulica se calcula mediante la fórmula siguiente.

$$Ph = \rho QgH \quad (\text{Ec. 3.9})$$

Donde

P = es la potencia hidráulica suministrada por la turbina [W]

$\rho$  = es la densidad del agua que es igual a 1000 [kg/m<sup>3</sup>]

Q = es el caudal [m<sup>3</sup>/s]

$g$  = es la gravedad que es  $9.81 \left[ \frac{m}{s^2} \right]$

$H$  = es el salto neto [m]

La única variable aún desconocida para determinar la potencia hidráulica es  $H$ , el salto neto o altura que el sistema de bombeo esta simulando. Se sabe que la velocidad del fluido a la salida del inyector es:

$$v = \sqrt{2gh} \quad (\text{Ec. 3.10})$$

Despejando  $h$  de la ecuación anterior obtenemos:

$$h = \frac{v^2}{2g} \quad (\text{Ec. 3.11})$$

Así, se genera la tabla 3.4 donde se muestra los distintos valores de altura simulada por el equipo de bombeo dependiendo de las revoluciones de la bomba.

r.p.m	Altura estimada $v = \sqrt{2gh}$
1240	0.04953932
1721	0.238457176
2147	0.59580053
2570	0.973698414
2747	1.431510182
2770	1.561334027
3140	2.236734659
3300	2.920475615

Tabla 3.4 - Altura simulada por la bomba en metros.

Teniendo los valores de altura, caudal y potencias entregadas se procede a realizar la remodelación del inyector para poder mejorar estos valores, lo anterior dicho se muestra en el capítulo siguiente.

## Capítulo 4

# Modificación y adaptación del inyector

En esta parte de la tesis consiste en retirar el inyector existente y cambiarlo por uno que mejore la regulación del caudal, que aumente la potencia del chorro y por lo tanto que genere más electricidad.

También se retiró la bomba de C.D que tenía y se colocó un motor de C.A para aumentar la presión del chiflón.

### 4.1 Características del inyector existente

La idea de retirar el inyector existente proviene de que con éste no se podía variar el caudal por lo tanto siempre se tenía un caudal constante. Por lo que en esta parte de la tesis corresponde a mejorarlo para poder así regular el caudal, realizar pruebas, ver el comportamiento de nuestra turbina y por lo tanto lograr mejorar la generación.

El inyector existente es el que se muestra en la siguiente figura 4.1 como se ve solamente era un tubo de acero el cual hacía la representación de un inyector y en el cual no se podía regular el caudal que salía por él.



Fig. 4.1 - Inyector existente

En la figura 4.2 se muestra el inyector ya colocado y en funcionamiento donde la presión y el caudal eran constantes para la turbina.

Viendo la problemática que esto originaba (no regulación de caudal) se pretendió retirar este inyector y cambiarlo por uno que se asemejara lo más posible a un inyector que se utilizan en las verdaderas turbinas hidráulicas.

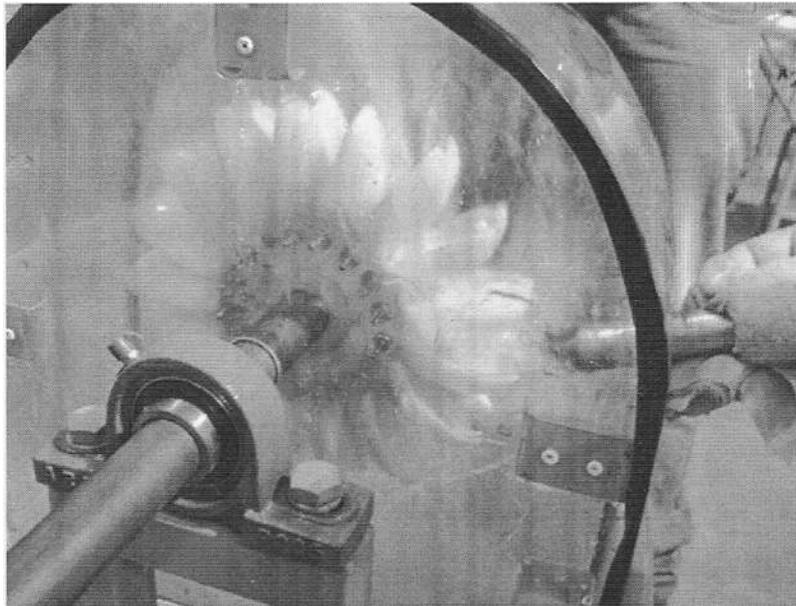


Fig. 4.2 - Inyector colocado y en funcionamiento

## **4.2 Características del Inyector nuevo**

En este apartado retiramos el inyector existente (Fig. 4.1) y se colocó el nuevo inyector (fig. 4.3) el cual se asemeja más a uno de la vida real.



Fig. 4.3 – Inyector con regulación de caudal.

Las características principales de este inyector son:

Modelo: CHMA-3.5

Material: Latón Maquinado

Diámetro: 3.5 plg.

Marca: TRUPER.

#### 4.2.1 Pruebas y Resultados

Se realizaron las siguientes pruebas con la adaptación de este Inyector y se obtuvieron los siguientes parámetros que se muestran en la siguiente tabla 4.1:

<b>Caudal (Lts/s)</b>	<b>Apertura del Inyector</b>	<b>Presión del Chiflón</b>	<b>r.p.m del Generador</b>	<b>Voltaje (V)</b>	<b>Corriente (I)</b>	<b>Potencia (W)</b>
<b>1000</b>	<b>100%</b>	<b>Máxima</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>

Tabla. 4.1 - Resultados Obtenidos.

Nota: los valores obtenidos de voltaje, r.p.m; corriente y potencia fueron realizados con una Generador de C.A. La presión calculada a la salida del chiflón se obtuvo mediante la fórmula de Bernoulli en el [Cap. 2 – (Ec. 2.1)].

## **4.3 Re-adaptación del Inyector**

Con la adaptación del primer inyector no se obtuvieron resultados exitosos, por lo tanto se volvió a rediseñar un modelo de inyector que tuviera un mayor diámetro, que pudiera regular su caudal y que tuviera una presión mayor a la salida.

### **4.3.1 Construcción de Inyector**

Esta vez se optó por diseñar un inyector en el cual tomando las medidas de la manguera y el caudal que nos proporcionaba la bomba hidráulica, se pueda crear un inyector que no tenga límites en la entrega de potencial hidráulico que entregue ésta o que si con el tiempo se requiriera modificar la bomba, este inyector no se sature como lo hizo el anterior.

### **4.3.2 Equipo para el Diseño del Inyector**

Los materiales que se utilizaran para la construcción del inyector son aquellos en los cuales se pueda regular la salida del chiflón y se pueda disminuir el diámetro a la salida del inyector para tener un chiflón a presión.

### **4.3.3 Tobera**

Una tobera es un dispositivo que convierte la energía potencial de un fluido (en forma térmica y de presión) en energía cinética. Como tal, es utilizado en turbo máquinas y otras máquinas, como inyectores (dispositivo utilizado para bombear fluidos). El aumento de velocidad que sufre el fluido en su recorrido a lo largo de la tobera es acompañado por una disminución de su presión y temperatura, al conservarse la energía.

Para aumentar la presión de nuestro inyector se diseñó una tobera a partir de un embudo de plástico como se muestra en la siguiente figura (Fig. 4.4).



Fig. 4.4 - Embudo.

Se recortó la parte inferior del embudo (Fig. 4.5) que es la parte principal que necesitamos, para poder formar lo que será nuestra tobera y así poder aumentar la presión de salida del caudal.



(a)



(b)

Fig. 4.5 – Tobera a) antes de ser cortada, b) ya realizada la modificación.

### 4.3.4 Regulador de caudal

Para el regulador del caudal se necesitó acoplar una válvula de esfera (Fig. 4.6) que es un mecanismo que sirve para regular el flujo de un fluido canalizado y se caracteriza porque el mecanismo regulador situado en el interior tiene forma de esfera perforada.

Se abre mediante el giro del eje unido a la esfera o *bola* perforada, de tal forma que permite el paso del fluido cuando está alineada la perforación con la entrada y la salida de la válvula. Cuando la válvula está cerrada, el agujero estará perpendicular a la entrada y a la salida. La posición de la manilla de actuación indica el estado de la válvula (abierta o cerrada).

Este tipo de válvulas no ofrecen una regulación tan precisa al ser de  $\frac{1}{4}$  de vuelta. Su ventaja es que la bola perforada permite la circulación directa en la posición abierta y corta el paso cuando se gira la bola  $90^\circ$  y cierra el conducto (Fig. 4.7).



Fig. 4.6 - Válvula de Esfera.

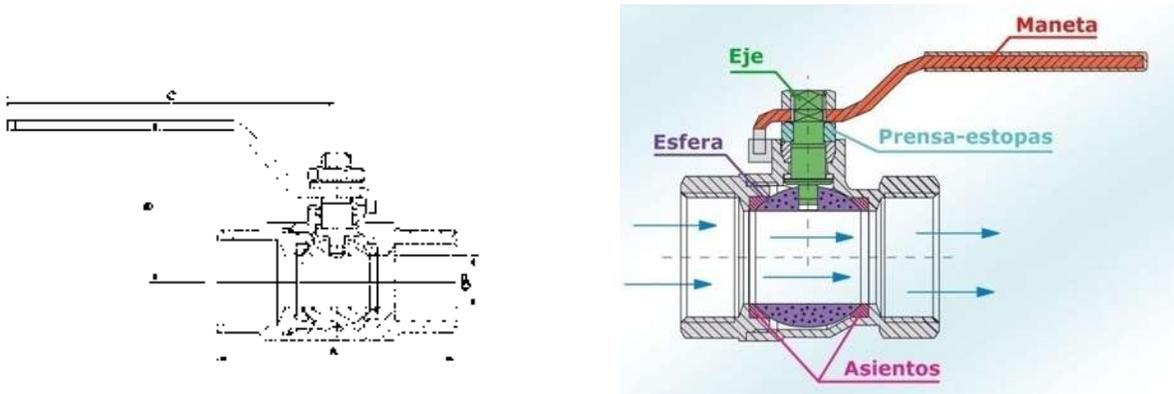


Fig. 4.7 - Representación de la válvula de esfera corte transversal.

#### 4.4 Características de la válvula de esfera

Las válvulas de bola o esfera son de  $\frac{1}{4}$  de vuelta, en las cuales una bola taladrada gira entre asientos elásticos, lo cual permite la circulación directa en la posición abierta y corta el paso cuando se gira la bola  $90^\circ$  y cierra el conducto (fig. 4.7).

#### Recomendada para:

- Servicio de conducción y corte, sin estrangulación.
- Cuando se requiere apertura rápida.
- Temperaturas moderadas.
- Cuando se necesita resistencia mínima a la circulación.

#### Aplicaciones

Servicio general y pastas semilíquidas.

## **Ventajas**

- Bajo costo.
- Alta capacidad.
- Corte bidireccional.
- Circulación en línea recta.
- Pocas fugas.
- Se limpia por sí sola.
- Poco mantenimiento.
- No requiere lubricación.
- Tamaño compacto.
- Cierre hermético con baja torsión (par).

## **Desventajas**

- Características deficientes para estrangulación.
- Alta torsión para accionarla.
- Susceptible al desgaste de sellos o empaquetaduras.

## **Materiales**

- Cuerpo: hierro fundido, hierro dúctil, bronce, latón, aluminio, aceros al carbono, aceros inoxidables, titanio, Tántalo, zirconio; plásticos de polipropileno y PVC.
- Asiento: TFE, TFE con llenador, Nylon, Buna-N, neopreno.

## **Instrucciones especiales para instalación y mantenimiento**

- Dejar suficiente espacio para accionar una manija larga.

## 4.5 Armado del Inyector.

Se acoplaron los 2 instrumentos principales que es la tobera (Fig.4.5) y la válvula (Fig. 4.6) mediante cinta de aislar y abrazaderas quedando el inyector como se muestra (Fig. 4.8 y 4.9)



Fig. 4.8 - Inyector armado.



Fig. 4.9 - Inyector armado vista superior.

## 4.6 Colocación del nuevo inyector.

Conseguido el material se armó lo que será ahora el nuevo Inyector (Fig. 4.10) con el cual realizaremos las pruebas necesarias para ver si se logró aumentar el caudal y por lo tanto la presión del chiflón.

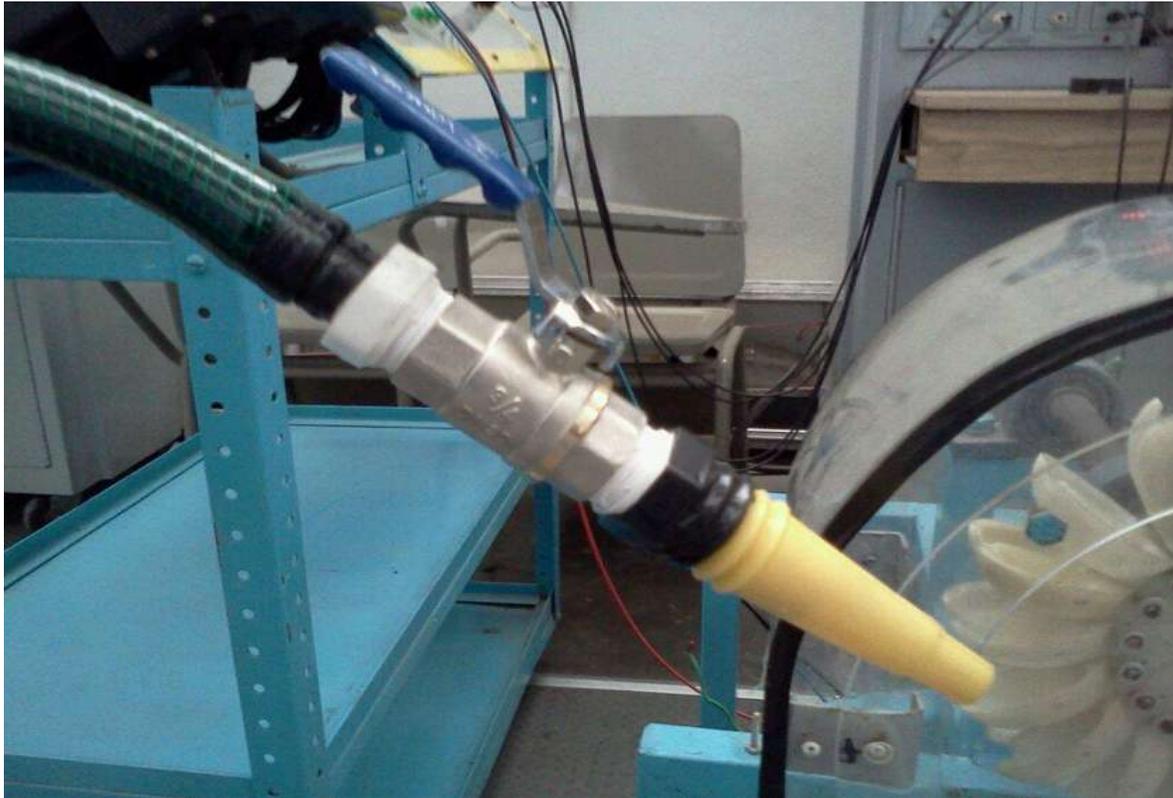


Fig. 4.10 - Inyector mejorado.

En la figura 4.10 y 4.11 se muestra ya acoplado el inyector y con el cual haremos las pruebas para demostrar la eficiencia que tiene este nuevo modelo.



Fig. 4.11 - Válvula de esfera acoplado con la tobera.

#### **4.6.1 Sistema de bombeo**

El sistema de bombeo está conformado por un motor de  $\frac{1}{4}$  de HP 3F, 1800rpm, 60Hz a 208V de alterna, como se muestra en la figura 4.12. Al cual se le manipulará la frecuencia para obtener más revoluciones y así tener mayor caudal.



Fig. 4.12 - Acoplamiento del Motor Trifásico.

#### **4.6.2 Medición del Caudal**

La medición del caudal será monitoreado por un caudalímetro (Fig. 4.13) que ya trae integrado el sistema de bombeo.



Fig. 4.13 - Caudalímetro.

#### 4.7 Pruebas del sistema de generación

Las pruebas de generación se realizarán utilizando una máquina de corriente alterna del laboratorio de ingeniería eléctrica, el acoplamiento será mediante una banda y una polea dentada montada en la flecha de la turbina, la base donde se encuentra montada la turbina cuenta con un par de rieles que permiten ubicar la máquina de CA a un costado de la flecha de la turbina. La figura 4.14 muestra la disposición en la que se encuentran los elementos mencionados, la flecha de la turbina se maquinó para poder montar una polea igual a la que se usa en las distintas máquinas del laboratorio, todos estos detalles permitirán un montaje sencillo y rápido del equipo para realizar pruebas.

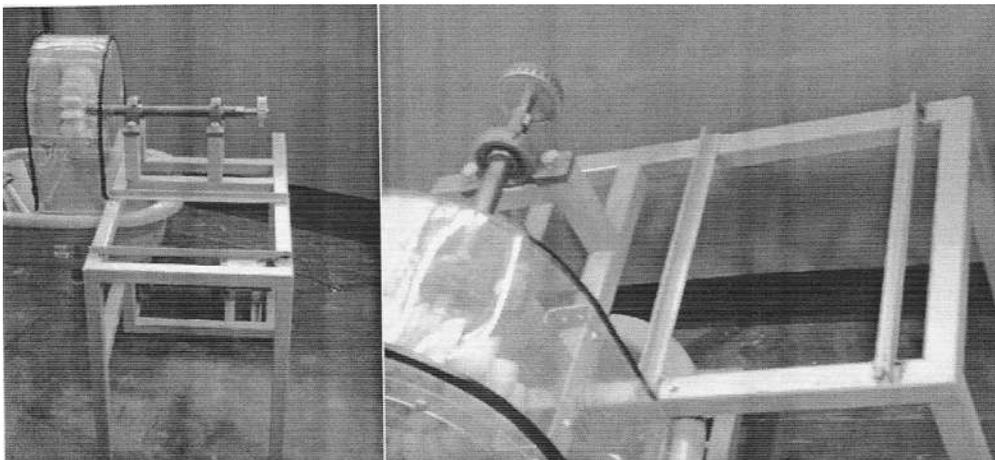


Fig. 4.14 - Vista general de rieles y turbina.

Se realizaron pruebas de bombeo sin el generador acoplado a la turbina para poder observar cómo se comportaba el chorro del inyector al entrar en contacto con los alabes como se muestra en la figura 4.15

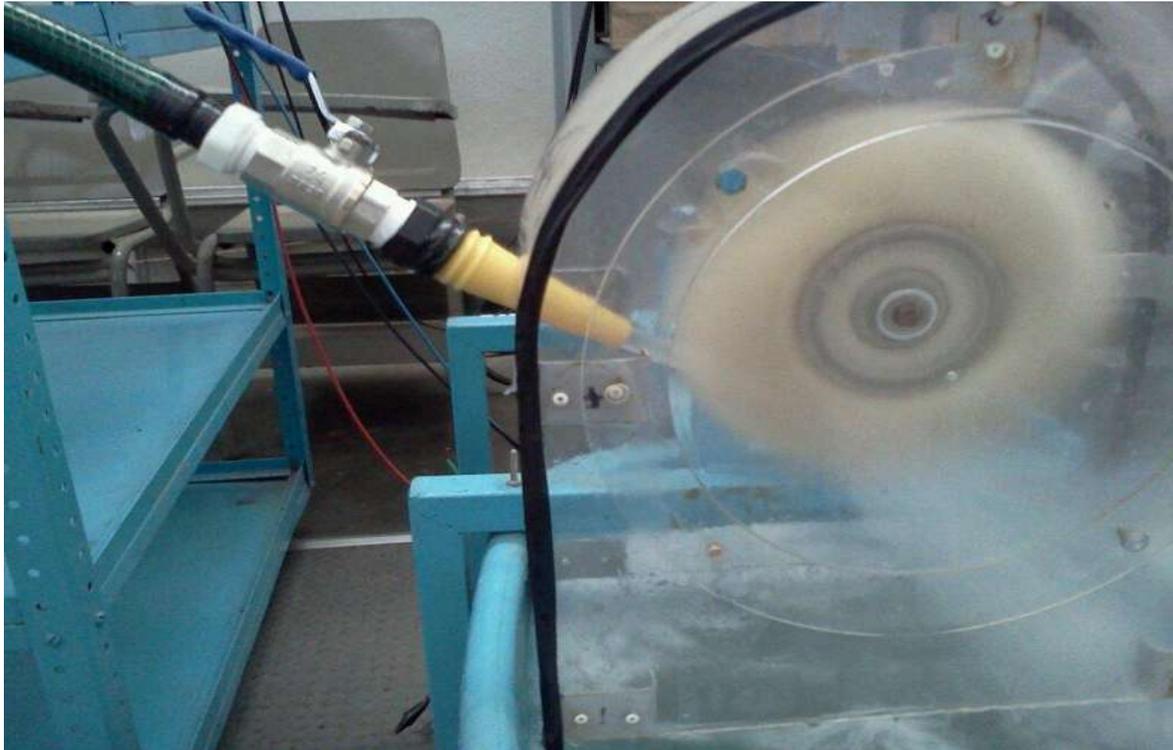


Fig. 4.15 - Prueba de bombeo con el nuevo inyector.

Se observó que el chorro impactaba con gran potencia llegando a tener aproximadamente 750 r.p.m. sin tener acoplado aún el motor de CA. Y sin tener aún un ángulo preciso para que el chorro tuviera la mayor concentración en los álabes de la turbina.

En la Fig.4.16 Se muestra desde otro ángulo como la potencia del chorro incide sobre los alabes haciéndola girar a una velocidad aceptable.



Fig. 4.16 - Visto desde otro ángulo.

#### 4.7.1 Generación de energía eléctrica

Para la generación de energía eléctrica se está utilizando el esquema de la máquina de CA como generador en conexión estrella como se muestra en la figura 4.17 y 4.18

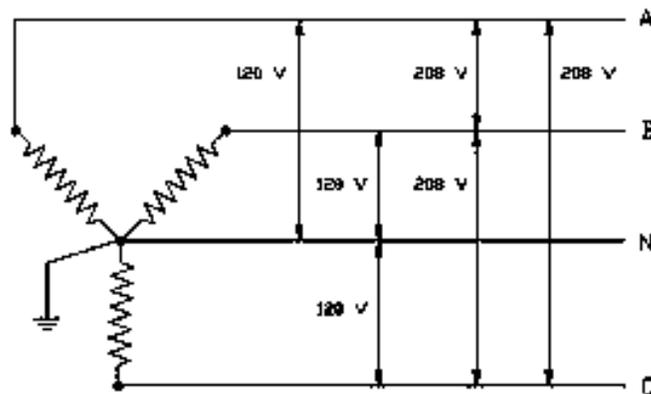


Fig. 4.17 - Conexión interna del motor trifásico.



Fig. 4.18 - Conexión física de la máquina síncrona.

En la figura 4.19 se muestra físicamente la máquina y sus conexiones, ésta es la configuración que estará siendo utilizada para las pruebas, se optó por realizar mediciones del voltaje generado en terminales, caudal entregado por la bomba, frecuencia a la cual está siendo sometida la bomba que alimenta el inyector, las revoluciones a la que está girando, la apertura del inyector y el ángulo de incidencia del chorro hacia los álabes.



Fig. 4.19 - Sistema de generación eléctrica.

#### **4.7.2 Mediciones de voltaje generado utilizando la turbina Pelton**

La figura 4.20 ilustra el acoplamiento de la turbina y el generador utilizando una banda, se ve también la conexión del generador en estrella. En las figuras 4.20, 4.21 Y 4.22 se ve la turbina ya en operación mientras se toman los datos. Las mediciones de voltaje se obtuvieron de 2 de las 3 fases del generador obteniendo los datos correspondientes en las siguientes tablas.



Fig. 4.20 - Turbina en operación lado frontal.



Fig.4.21 - Turbina en operación lado posterior.



Fig.4.22 - Turbina en operación lado superior.

#### 4.8 Apertura a $\frac{1}{4}$ de la válvula

La tabla 4.2 muestra la apertura a  $\frac{1}{4}$  de la válvula, es decir apertura total donde se tuvo la mayor eficiencia de salida de caudal por el chiflón y mayor presión del chorro sobre los álabes obteniendo así los siguientes datos:

Frecuencia (Hz)	Caudal (Q)	Velocidad (r.p.m)	Voltaje (V)	Angulo
95	2000	521	59.3	45°
98	2000	520	57.2	45°
110	1200	232	38.9	45°
80	1800	454	48.8	45°
70	1600	356	41.2	45°
60	1200	232	38.7	45°

Tabla. 4.2 - Resultados de las pruebas a  $\frac{1}{4}$  de apertura de la válvula.

### 4.8.1 Apertura a ½ de la válvula

La tabla 4.2 muestra la apertura a ½ de la válvula, es decir la mitad de la apertura total donde se tuvo la mitad de eficiencia de caudal y por lo tanto menor presión del chorro sobre los álabes obteniendo así los siguientes datos:

Frecuencia (Hz)	Caudal (Q)	Velocidad (r.p.m)	Voltaje (V)	Angulo
95	2000	232	38.9	45°
98	2000	231	37.2	45°
110	1200	86	12.5	45°
80	1800	211	24.8	45°
70	1600	197	18.6	45°
60	1200	87	13.2	45°

Tabla. 4.3 - Resultados de las pruebas a ½ de apertura de la válvula.

### 4.9 Comparación de resultados

Ya realizadas las pruebas y obtenido valores (Tabla 4.4 y 4.5), se hace una breve comparación de éstas en donde se muestran los voltajes generados.

Rpm	Voltaje (CD)
447	3.2
590	4.76
666	6.23
800	8.3
848	10

Tabla. 4.4 - Revoluciones y voltaje obtenido en el generador de CD.

Rpm	Voltaje (CA)
521	59.3
520	57.2
454	48.8
356	41.2
232	38.9

Tabla. 4.5 - Revoluciones y voltaje obtenido en el generador de CA.

En la tabla 4.4 se muestran los valores obtenidos con el inyector (Fig. 4.23), en el cual se muestran **10V** de generación de CD, mientras que en la tabla 4.5 se muestran **59.3V** de generación de CA con el inyector mejorado (Fig. 4.24).



Fig. 4.23 - Inyector existente.

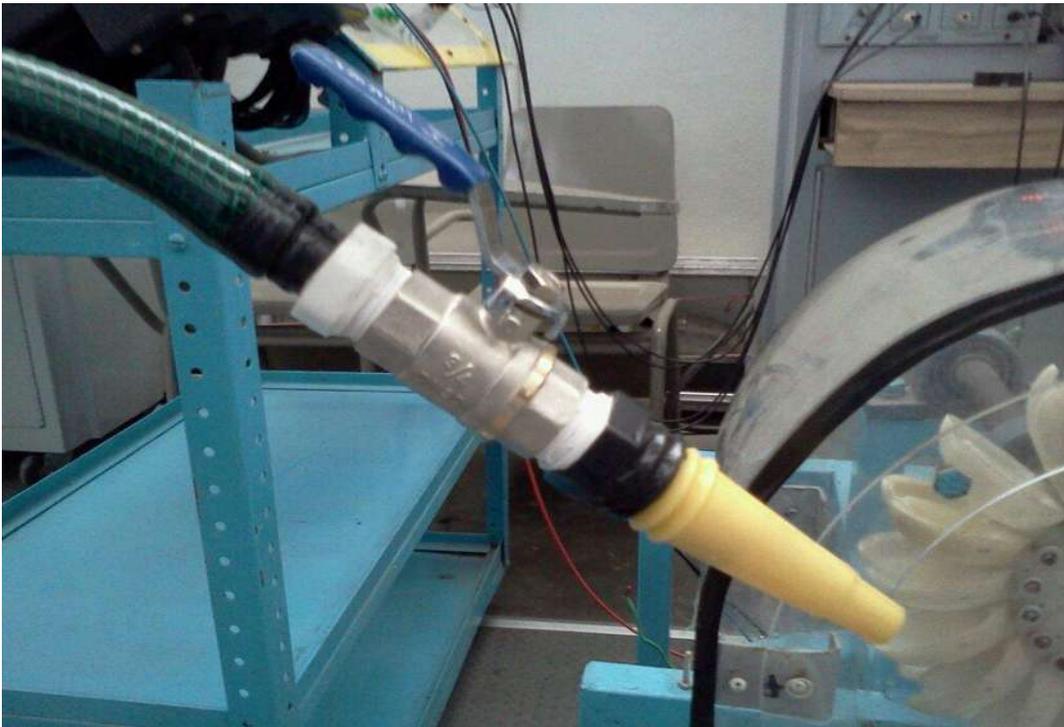


Fig. 4.24 - Inyector Mejorado.

# Capítulo 5

## Conclusiones y trabajos futuros

En este capítulo se presentan las conclusiones de este trabajo de tesis y se indican algunas recomendaciones.

### 5.1 Conclusiones

En este trabajo de la tesis, se logró mejorar la construcción y adaptación del inyector, del pequeño sistema de generación de energía eléctrica, implementada por una micro turbina Pelton que se encuentra en el laboratorio de ingeniería eléctrica.

Observando las características principales que tiene los inyectores que se encuentran ya instalados en macro turbinas Pelton, se logro construir un prototipo que se asemeje lo más parecido a él, con los recursos que se tuvieron en el almacén del laboratorio de ingeniería eléctrica.

Con la construcción del primer inyector, no se lograron obtener resultados exitosos ya que el diámetro del inyector era muy angosto, por lo tanto, la potencia del caudal superaba el diámetro del inyector provocando que este no dejara salir el máximo caudal.

La re-construcción y adaptación del segundo inyector mejoró la incidencia del chorro hacia los álabes, por lo tanto, mejoró la potencia de impacto hacia éstas ocasionando que se generaran mayores revoluciones.

Se mejoró la regulación del inyector, esto para poder modificar la presión del fluido que saldrá por éste, así para poder aumentar o disminuir la potencia del chorro que incidirá sobre los álabes.

En las pruebas de generación se obtuvieron resultados satisfactorios que muestran que se logro el objetivo que era aumentar la generación de energía eléctrica, esto modificando el

inyector, cambiando el motor de C.D por un de C.A y así logrando tener voltajes cercanos a los 60 V de C.A

También cabe mencionar que con la ayuda del sistema de bombeo se logró aumentar el caudal que alimentaría al inyector y así poder realizar las pruebas fácilmente.

## **5.1 Trabajos futuros**

Para la obtención de un voltaje mayor generado por la máquina de C.A, la manguera que surte al inyector pudiera aumentársele el diámetro esto para que circule más caudal por este y tener mayor concentración de agua.

Construir una base donde colocar el inyector y que esta tenga ángulos definidos para poder realizar mayores pruebas en diferentes posiciones.

El hecho de tener el inyector en prototipo permitirá que se presenten modificaciones futuras para poder aumentar, regular y generar mayor incidencia del chorro sobre los alabes de la micro turbina Pelton.

# Referencias

Miguel A. Vargas Cruz. (2011). “*Diseño y Construcción de un Prototipo de Generación Eléctrica Basado en una Micro-Turbina Pelton.*” Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Teddy. “Turbinas Pelton.” Marzo del 2010. <http://www.scribd.com/doc/28651102/turbinas-pelton> consultada 10 de Octubre del 2011.

Sin Autor. “*La traducción inversa de textos técnicos sobre centrales hidroeléctricas y contaminación medioambiental: Puesta en página web para autoaprendizaje.*” Octubre del 2004. [http://usuarios.multimania.es/jrcuenca/Spanish/Turbinas/turbinas\\_hidraulicas.htm](http://usuarios.multimania.es/jrcuenca/Spanish/Turbinas/turbinas_hidraulicas.htm) consultada 10 de Octubre del 2011.

Roberto Córdova. “*Breve Historia de las Turbinas Hidráulicas.*” Sin fecha de elaboración. <http://www.uca.edu.sv/deptos/ccnn/dlc/pdf/turbinas.pdf> consultada 10 de Octubre del 2011.

LadyInGrey. “*Principio de Bernouilli.*” Junio del 2007. [http://es.wikibooks.org/wiki/F%C3%ADsica/Hidrodin%C3%A1mica/Principio\\_de\\_Bernouilli](http://es.wikibooks.org/wiki/F%C3%ADsica/Hidrodin%C3%A1mica/Principio_de_Bernouilli) consultada el 10 de Octubre del 2011.