



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO**

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

**“Diseño y Construcción de un Prototipo de Generación
Eléctrica Basado en un Micro-Turbina Pelton”**

Tesis

Para obtener el título de:

Ingeniero Electricista

Presenta:

Miguel Ángel Vargas Cruz

Asesor:

Dr. Gilberto González Avalos

Morelia, Michoacán. Enero del 2011.



Resumen

En este trabajo se propone el diseño y construcción de un sistema de generación de energía eléctrica utilizando como fuente de energía mecánica una micro-turbina Pelton, la micro-turbina es diseñada y construida al igual que la estructura metálica que permite el montaje del equipo necesario para realizar pruebas del comportamiento de la micro-turbina. Se acopla una máquina de corriente directa, CD, a la turbina configurada como generador para generar energía eléctrica, se realizan mediciones de voltaje generado por el sistema, estos datos son comparados con los que se obtienen utilizando un motor de CD como primomotor en lugar de la micro-turbina. Se reportan los resultados obtenidos de las pruebas.

Contenido

Resumen.	i
Lista de Figuras.	v
Lista de Tablas.	vii
Capítulo 1. Introducción	1
1.1 Propuesta del prototipo	1
1.2 Objetivo	2
1.3 Justificación	2
1.4 Metodología	3
1.5 Contenido de la tesis	3
Capítulo 2. Antecedentes de generación de energía eléctrica basada en turbinas hidráulicas	4
2.1 Ciclo hidrológico	4
2.2 Turbinas hidráulicas	5
2.2.1 Elementos constitutivos de una turbina hidráulica	6
2.3 Clasificación de las turbomáquinas	8
2.3.1 Clasificación según el grado de reacción	8
2.3.2 Clasificación de las turbinas hidráulicas según la dirección del flujo en el rodete	11
2.4 Centrales eléctricas: centrales hidroeléctricas	12
2.4.1 Clasificación de las centrales hidroeléctricas	12
2.4.1.1 Según el tipo de embalse	13
2.4.1.2 Según la potencia	14
2.4.1.3 Según la altura del salto	14
2.4.1.4 Salto de pequeña altura	14
2.4.1.5 Según la economía de la explotación.....	14
2.4.1.6 Según el lugar de instalación	15

2.5	Generación de energía eléctrica	15
2.5.1	Generador eléctrico	15
2.5.2	Generadores de corriente alterna	16
2.5.2.1	Generador síncrono	16
2.5.3	Generadores de corriente directa	19

Capítulo 3. Diseño y construcción de una turbina Pelton a escala 21

3.1	Dimensiones de una turbina Pelton	21
3.1.1	Diámetro del inyector	22
3.1.2	Diámetro del rodete	23
3.2.3	Dimensiones de los álabes	25
3.2	Forma de los álabes	26
3.3	Número de álabes	27
3.4	Velocidad del chorro a la salida del inyector	28
3.5	Orientación de los álabes de la turbina	29
3.6	Diseño de una micro turbina Pelton	29
3.7	Construcción de los álabes	31
3.7.1	Modelo en yeso	31
3.7.2	Molde de silicón	34
3.7.3	Vaciado de la resina	35
3.8	Armado de la turbina	37

Capítulo 4. Construcción del sistema de generación 39

4.1	Montaje de la turbina Pelton y equipo adicional	39
4.2	Acoplamiento de motor de C.D y bomba centrífuga	41
4.3	Sistema de transmisión de par	42
4.4	Confinamiento de la turbina	43
4.5	Sistema de bombeo	44
4.6	Parámetros del sistema de bombeo	45
4.6.1	Caudal de la bomba centrífuga	45
4.6.2	Potencia entregada por el sistema de bombeo	47

4.7	Prueba del sistema de generación	50
4.7.1	Generación de energía eléctrica	53
4.7.2	Mediciones de voltaje utilizando la turbina Pelton	56
Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones		59
5.1	Conclusiones	59
5.2	Recomendaciones	60
Referencias.		61

Lista de Figuras

2.1	Ciclo hidrológico	5
2.2	(a) Caja espiral de una turbina Kaplan	
	(b) Caja espiral de una turbina Francis	6
2.3	(a) Álabes configurados para mínimo caudal	
	(b) Álabes configurados para máximo caudal	7
2.4	Rodete Francis, rodete Pelton y rodete Kaplan	8
2.5	Turbina Pelton	9
2.6	Esquema general del montaje de turbina Francis	10
2.7	Superficie de corriente	11
2.8	Amperímetro	12
2.9	Vista esquemática de un generador síncrono de una fase dos polos	17
2.10	Voltaje inducido en el devanado del estator	18
2.11	Generador síncrono tetrapolar	18
2.12	Máquina elemental de corriente directa con conmutador	19
2.13	Voltaje entre las escobillas en la máquina elemental de CD que se esquematiza en la Figura 2.12	20
3.1	Tobera y diámetros del chorro	23
3.2	Diámetro característico de la turbina Pelton	24
3.3	Relaciones empíricas para el tamaño de las cucharas	25
3.4	Superficie interior de las cucharas: cortes y curvas de nivel	26
3.5	Trazado de las curvas de nivel de una cuchara	27
3.6	Orientación de los álabes de la turbina	29
3.7	Cotas de diseño para los álabes	31
3.8	Modelos para la parte interior del álabe de la turbina Pelton	32
3.9	Primer molde obtenido con las piezas de madera	32
3.10	Álabe realizado en yeso	33
3.11	Superficie interior	33
3.12	Obtención de una parte del molde de silicón usando el modelo en yeso	34
3.13	Partes terminadas del molde de silicón	35

3.14	Secciones del molde de silicón	35
3.15	Molde listo para el vaciado de la resina	36
3.16	Molde y pieza terminada en resina	36
3.17	Cuchara con corte en la base para el correcto acoplamiento	37
3.18	Álabes montados en discos de acrílico	37
3.19	Vista del montaje de los álabes	38
3.20	Rodete con eje para flecha de tres cuartos de pulgada	38
4.1	Armazón metálico para soporte del equipo	39
4.2	Rieles para equipo de medición y generación	40
4.3	Electrodinamómetro montado en los rieles	40
4.4	Acoplamiento del motor de CD y la bomba centrífuga	41
4.5	Montaje de la turbina	42
4.6	Extremo de la flecha que soporta el rodete	42
4.7	Confinamiento de la turbina	43
4.8	Rodete sujetado a la flecha	43
4.9	Sistema de bombeo	44
4.10	Polea dentada y rieles	50
4.11	Vista general de rieles y polea	50
4.12	Rodete Pelton, cucharas sin corte en sus aristas	51
4.13	Corte anterior y posterior de la cuchara	51
4.14	Rodete con cortes	52
4.15	Turbina confinada	52
4.16	Chorro incidiendo en uno de los álabes de la turbina	53
4.17	Conexión de la máquina de CD como generador	54
4.18	Conexiones físicas	54
4.19	Acoplamiento de las máquinas de CD	55
4.20	Voltajes y tendencia polinómica	56
4.21	Turbina y generador de CD acoplados	56
4.22	Turbina en operación	57
4.23	Voltajes utilizando la turbina como primomotor	58

Lista de Tablas

3.1	Número de cucharas de las turbinas Pelton en función de n_s	28
4.1	Voltaje aplicado a la bomba y tiempos de llenado del recipiente de 40 litros	46
4.2	Revoluciones de la bomba centrífuga y tiempos de llenado	46
4.3	Caudales	47
4.4	Altura simulada por la bomba en metros	48
4.5	Potencia hidráulica entregada a la turbina	49
4.6	rpm y voltajes	55
4.7	Revoluciones y voltaje obtenido en el generador	57

Capítulo 1

Introducción

Actualmente la energía hidráulica es la primera de las energías renovables al momento de producir energía eléctrica en el mundo, la energía hidroeléctrica es la tercera fuente de energía primaria tras los combustibles fósiles (carbón, gas natural y petróleo) y la energía nuclear. Los principales productores de energía hidroeléctrica en el mundo son, en este orden, Canadá, Brasil, EEUU y China.

En algunos países es tan importante la producción de energía hidroeléctrica que dependen casi en su totalidad de ella, algunos ejemplos son países como Noruega (99%), Zaire (97%) y Brasil (96%). En la actualidad las centrales eléctricas de mayor tamaño del mundo se encuentran en Itaipu (Brasil) y Gran Coulee (EEUU), otras grandes presas se encuentran en Syansk (Rusia), Krasnoyarsk (Rusia), Bratsk (Rusia), Sukhovo (Rusia) y Churchill (Canadá). Se está construyendo en China la Presa de las Tres Gargantas para la producción de energía eléctrica, que será la más grande del mundo cuando entre en funcionamiento.

1.1 Propuesta del prototipo

El prototipo a construir es un sistema de generación basado en la energía hidráulica cuyo aprovechamiento estará a cargo de una turbina Pelton que será acoplada a un generador eléctrico para la producción de energía eléctrica.

La construcción de la turbina será un diseño a escala, se tomarán en cuenta los aspectos teóricos más relevantes como son la geometría de los álabes, número de álabes, diámetro del rodete y algunas otras características para obtener un comportamiento lo más cercano posible a un dispositivo de tamaño real.

1.2 Objetivo

El objetivo de este trabajo de tesis es construir un prototipo de generación de energía eléctrica basado en la energía hidráulica usando una turbina Pelton y un generador eléctrico acoplado a la misma.

El propósito de este prototipo una vez construido y valorado su funcionamiento es proporcionar una herramienta de estudio así como de pruebas.

Así mismo, este prototipo permite la comprobación de los parámetros teóricos de una turbina Pelton.

1.3 Justificación

De acuerdo a las estadísticas presentadas por la OLADE (Organización Latinoamericana de Energía) organización de la cual México forma parte, nuestro potencial hidroeléctrico es de 53,000.00 MW, el sistema de de información energética de la SENER (Secretaria de Energía) muestra en su base de datos que actualmente México cuenta con una capacidad efectiva instalada de 50,727.680 MW, de la cual 11,291.00 MW son producidos en centrales hidroeléctricas.

De acuerdo a estos números, si en México explotáramos al 100 % los recursos hidráulicos disponibles se podría abastecer en su totalidad la demanda eléctrica nacional.

El 30 de Enero la SENER publicó un boletín de prensa donde se hace saber que en los próximos cinco años se invertirán 1,100.00 millones de pesos para electrificar comunidades remotas de nuestro país.

La construcción de un prototipo a escala es importante pues se pueden desarrollar en él diversas pruebas que no realizables al no contar con un equipo en tamaño real. Las pruebas realizadas y la comprobación de funcionamiento correcto del prototipo pueden también justificar la fabricación en tamaño real del sistema. Un modelo como éste es una herramienta eficaz para corroborar aspectos teóricos aprendidos en el aula.

1.4 Metodología

La metodología aplicada en este trabajo de tesis es la siguiente:

- Diseñar y construir la turbina en base a las características del recurso hidráulico.
- Construir el sistema de generación, es decir acoplar la turbina con el generador.
- Diseñar y construir el sistema de control automático para la generación.
- Analizar la respuesta del sistema.

1.5 Contenido de la tesis

La organización de la presente tesis es la siguiente:

En el capítulo 1 se presenta una breve introducción sobre esta tesis y su contenido.

En el capítulo 2 se dan los antecedentes necesarios para abordar la problemática relacionada con las centrales hidroeléctricas, así como también se habla de los primeros prototipos de turbinas Pelton utilizadas en la generación de la energía eléctrica.

En el capítulo 3 se abordan los temas relacionados con el aspecto constructivo de una turbina Pelton.

El capítulo 4 presenta el modo en el cual se acoplará la turbina al generador para dar forma al sistema de generación.

El capítulo 5 presenta conclusiones y recomendaciones a cerca de este trabajo.

Capítulo 2

Antecedentes de generación de energía eléctrica basada en turbinas hidráulicas

El suministro de energía eléctrica en regiones aisladas con difícil acceso presenta un gran costo cuando se habla de líneas convencionales de transmisión. Una alternativa que se presenta ante este hecho es el aprovechamiento de recursos hidráulicos cerca de estas regiones, para generar energía eléctrica en base a estos recursos generalmente se utiliza una turbina hidráulica acoplada a un generador eléctrico, siendo estos lugares zonas de baja densidad de utilización de energía eléctrica, los generadores así como las turbinas utilizados son de baja potencia, menores a 10 kW, de ahí el nombre de microturbinas.

2.1 Ciclo hidrológico

La idea del ciclo hidrológico, que hoy nos parece intuitiva, durante siglos no fue comprendida por filósofos y científicos, creyendo que el ciclo se realizaba al revés: el agua penetraba en la corteza desde el fondo de los océanos, se almacenaba en la profundidad, probablemente en grandes cavernas, y ascendía después por el calor de la tierra hasta las montañas, surgiendo en las zonas de nacimiento de los ríos. No creían posible que el caudal de un gran río fuera producido exclusivamente por las lluvias y les maravillaba la existencia de manantiales en lugares topográficamente elevados y con caudales relativamente constantes.

Se denomina ciclo hidrológico al movimiento general del agua, ascendente por evaporación y descendente primero por las precipitaciones y después en forma de escorrentía superficial y subterránea.

De la definición anterior podemos decir que no es tan simple como “El agua se evapora en el océano y precipita sobre los continentes”. Vemos en la Figura 2.1 que en ambos medios se produce evaporación y precipitación, aunque es cierto que la evaporación predomina en el océano y las precipitaciones en los continentes. Los escurrimientos subterráneos son mucho más lentos que los superficiales. La lentitud (a veces inmovilidad) de los

escurrimientos subterráneos confiere al ciclo algunas características fundamentales, como que los ríos continúen con caudal mucho tiempo después de las últimas precipitaciones.

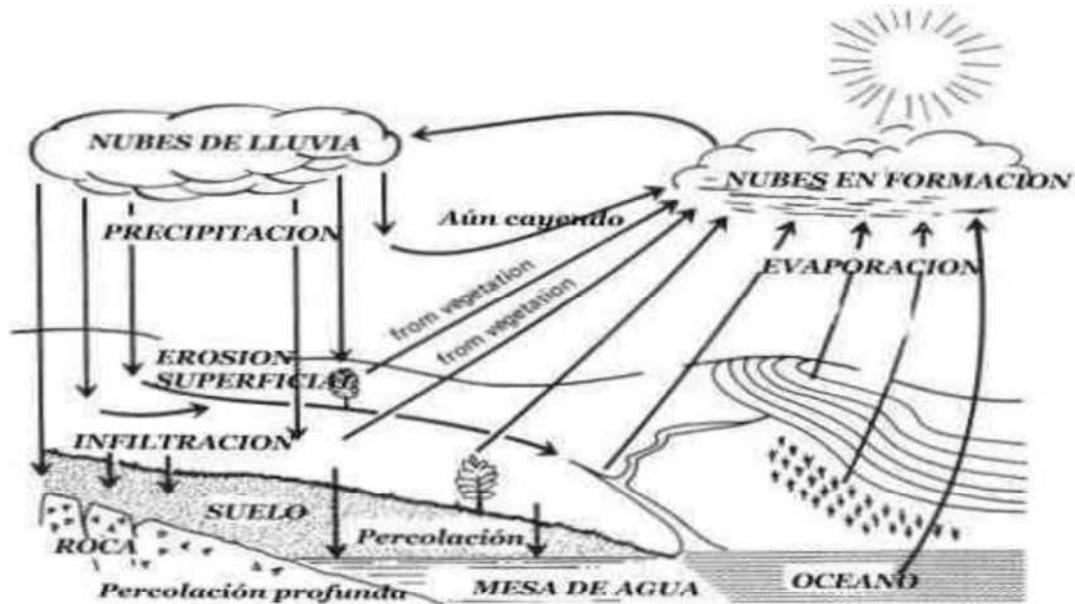


Figura 2.1 Ciclo hidrológico

2.2 Turbinas hidráulicas

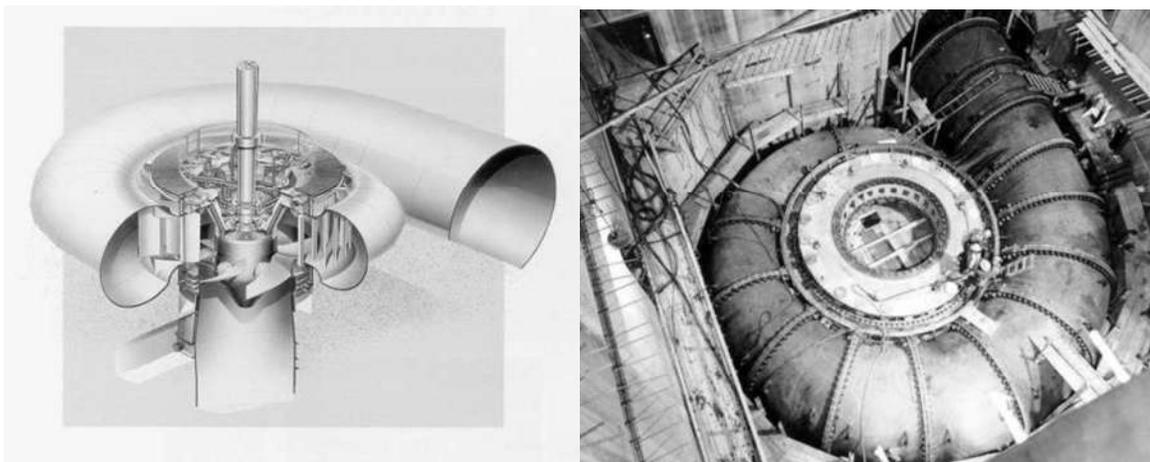
Las turbomáquinas son aquellas máquinas de fluido en las cuales el intercambio de energía es debido a la variación del momento cinético del fluido al pasar por los conductos de un órgano que se mueve con movimiento de rotación, dotado de alabes o paletas, que se denomina rotor. Una corriente continua de fluido a través del rotor con el que intercambian su energía caracteriza a estas máquinas. Con más precisión se puede decir que una turbomáquina es aquella máquina de fluido cuyo funcionamiento se basa en la ecuación de Euler o ecuación fundamental de las turbomáquinas. Según el sentido de la transmisión de la energía las turbomáquinas se clasifican en motoras y generadoras. En las turbomáquinas motoras el fluido cede energía al rodete, y en las turbinas generadoras el rodete cede energía al fluido. En las primeras la energía del fluido disminuye en su paso por la máquina; en las segundas aumenta. La turbina hidráulica es una turbomáquina motora ya que toma energía del fluido en movimiento para convertirla en energía mecánica que es utilizada para impulsar generadores eléctricos o algún otro dispositivo.

2.2.1 Elementos constitutivos de una turbina hidráulica

Los elementos constitutivos de una turbina son análogos a los de una bomba pero dispuestos en orden inverso.

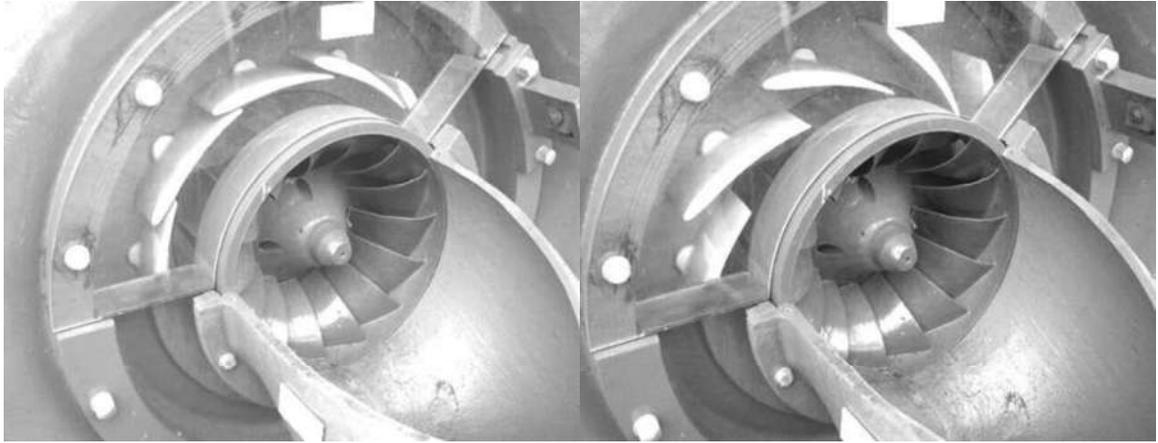
a) Canal de llegada o tubería forzada: En las instalaciones hidroeléctricas, las tuberías de presión o tuberías forzadas, tienen por objeto conducir el agua desde la cámara de presión a las turbinas cuando, por causa de la altura del salto, se precisa tal disposición para transformar la energía potencial de posición que tiene el agua en la cámara de presión, en energía potencial presión, que tiene junto a la turbina y al final de la conducción forzada.

b) Caja espiral: es un ducto alimentador de sección generalmente circular y diámetro decreciente, que circula al rotor, procurando el fluido necesario para la operación de la turbina, generalmente es lámina de acero aquí se transforma la presión del agua en velocidad. La Figura 2.2 muestra la caja espiral de una turbina Kaplan y una turbina Francis respectivamente.



(a) Caja espiral de una turbina Kaplan (b) Caja espiral de una turbina Francis

c) Distribuidor: Es el nombre con que se conocen los álabes directores de la turbomáquina, su función es regular el caudal que entra en la turbina, a la vez de direccionar al fluido para mejorar el rendimiento de la máquina. Este recibe el nombre de distribuidor Fink. Transforma la presión en velocidad y actúa como tobera. La Figura 2.3 muestra el corte de un turbina Francis donde se pueden observar los alabes directores del distribuidor Fink.



(a)

(b)

Figura 2.3. (a) Alabes configurados para mínimo caudal (b) Alabes configurados para máximo caudal

d) Rodete: Es la parte principal de la turbina donde se lleva a cabo la transformación de la energía hidráulica en energía mecánica. La Figura 2.4 muestra tres de los rodetes más utilizados en la fabricación de turbinas hidráulicas.

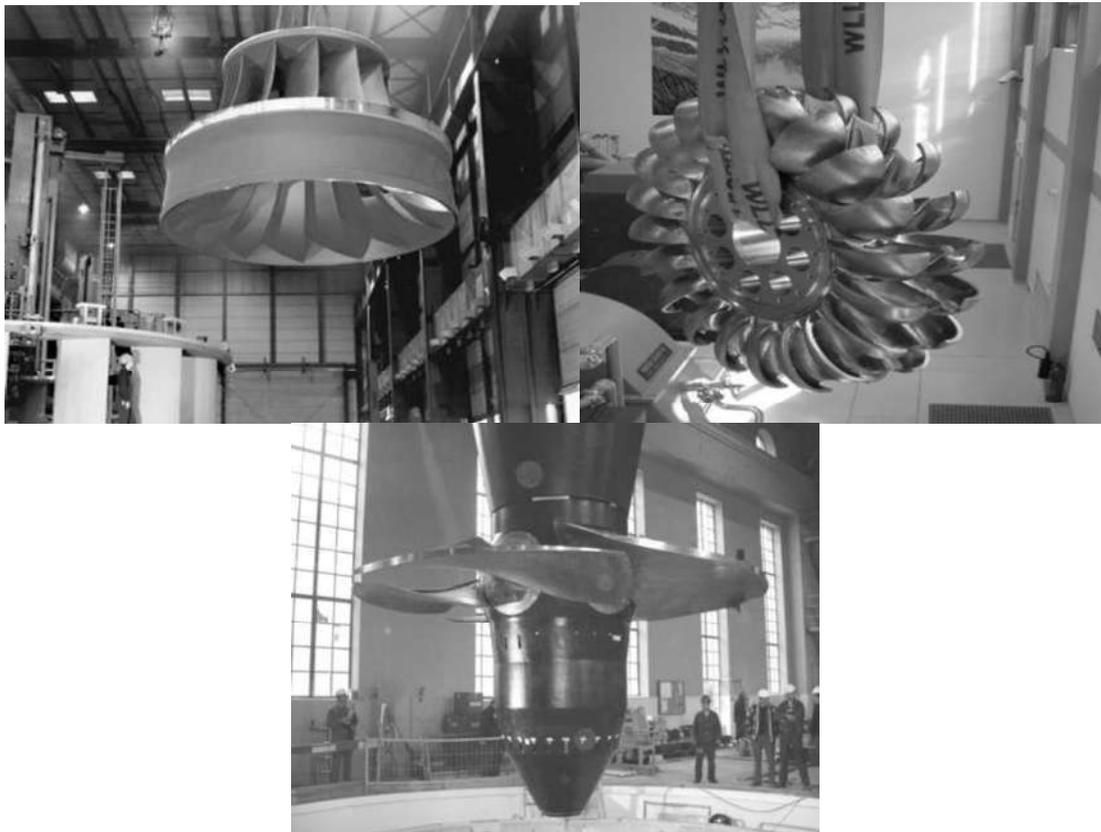


Figura 2.4 Rodete Francis, rodete Pelton y rodete Kaplan

e) Tubo de aspiración: es el órgano de desagüe y debe su nombre a que crea una aspiración o depresión a la salida del rodete, las turbinas de reacción carecen de esta parte, como es el caso de la turbina Pelton.

2.3 Clasificación de las turbomáquinas

Según la compresibilidad del fluido en el interior de la máquina las turbomáquinas se clasifican en turbomáquinas térmicas y turbomáquinas hidráulicas. Aunque todo fluido real es compresible, en los líquidos, la variación de la densidad, y por lo tanto el volumen específico, es tan pequeña que en general podría desprejarse. Ahora bien si el fluido experimenta una variación tal de la densidad en su paso a través de la máquina, que esta no puede tratarse como una constante de diseño y fórmulas, la máquina se denominará térmica [5].

De acuerdo a la descripción anterior se puede decir que una turbomáquina hidráulica es aquella máquina de fluido cuyo principio de funcionamiento es la ecuación de Euler y cuyo estudio y diseño se hace sin tener en cuenta la variación del volumen específico o densidad a través de la máquina.

El prototipo a fabricar en esta tesis utiliza una turbina hidráulica Pelton, por lo tanto el estudio se encaminará hacia las características de las turbomáquinas hidráulicas, específicamente de esta última y se dejarán de lado los temas relacionados con las turbomáquinas térmicas.

2.3.1 Clasificación según el grado de reacción

Las turbinas hidráulicas, según el grado de reacción, se clasifican en dos grupos: turbinas de acción y turbinas de reacción. El grado de reacción de una turbomáquina se refiere al modo como trabaja el rodete. Así, por ejemplo, en una bomba se debe distinguir la altura de presión que da la bomba y la altura de presión que da el rodete de la bomba, H_p . La primera normalmente es mayor que H_p porque la bomba tiene además de un rodete un sistema difusor que transforma la energía dinámica que da el rodete, H_p en energía de presión, que sumada a la energía de presión del rodete constituye la energía de presión que da toda la bomba. Análogamente sucede en una turbina. Por tanto el grado de reacción está dado por:

$$\sigma = \frac{H_p}{H_u} \quad (2.1)$$

Grado de reacción teórico

Es decir, el cociente de la altura que absorbe el rodete en forma de presión por la altura total que absorbe el rodete.

Siendo siempre H_u positivo:

- Si $H_p < 0$, el grado de reacción es negativo;
- Si $H_p = 0$, el grado de reacción es 0;
- Si $0 < H_p < H_u$ el grado de reacción está comprendido entre 0 y 1, que es el caso normal;
- Si $H_p > H_u$, el grado de reacción es mayor que 1.

Las máquinas en que el grado de reacción es igual a cero se llaman de acción. Las turbinas de acción constituyen la clase importante de las turbinas Pelton. Si el rodete absorbe la mitad de su energía en forma de presión y la otra mitad en energía dinámica, el grado de reacción es igual a $\frac{1}{2}$.

Si el grado de reacción es 0, la turbina se llama de acción. Si el grado de reacción es distinto de 0, la turbina se llama de reacción.

El grado de reacción de una turbina ε_T se define así;

$$\varepsilon_T = \text{altura de presión absorbida por el rodete} / \text{altura total absorbida por el rodete} \quad (2.2)$$

La Figura 2.5 representa una instalación con turbina de acción. La presión del agua no varía en los alabes. El rodete no está inundado y se encuentra a presión atmosférica.

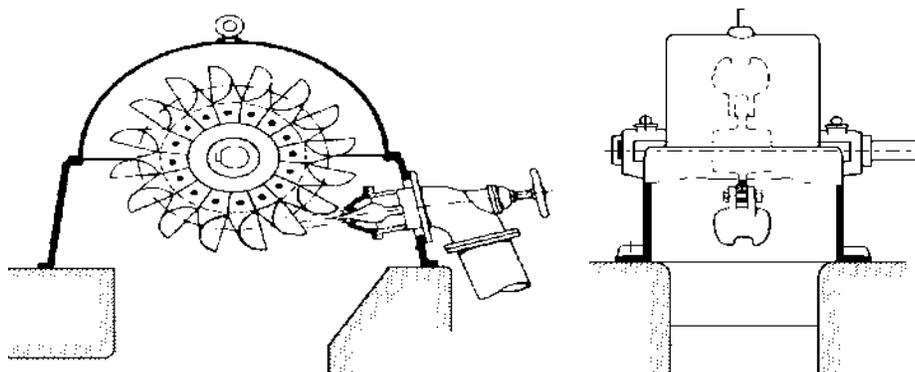


Figura 2.5 Turbina Pelton

En las turbinas de acción el fluido de trabajo no sufre un cambio de presión importante en su paso a través de rodete mientras que en las de reacción el fluido de trabajo si sufre un cambio de presión importante e su paso a través del rodete. Para clasificar a una turbina dentro de esta categoría se requiere calcular el grado de reacción de la misma. Las turbinas de acción aprovechan únicamente la velocidad del flujo de agua, mientras que las de reacción aprovechan además la pérdida de presión que se produce en su interior. En el distribuidor de una turbina de acción (llamado inyector en éstas) se transforma la energía de presión de fluido en energía cinética del chorro. La Figura 2.6 muestra una turbina de reacción Francis en la cual el distribuidor (distribuidor Fink) transforma sólo parte de la energía de presión del fluido en energía cinética. El agua entra en el rodete a una presión superior a la atmosférica y a la salida, gracias al tubo de aspiración, que no existe en las turbinas de acción, la presión es inferior a la presión atmosférica, alcanzando el agua la presión atmosférica a la salida de la turbina [1].

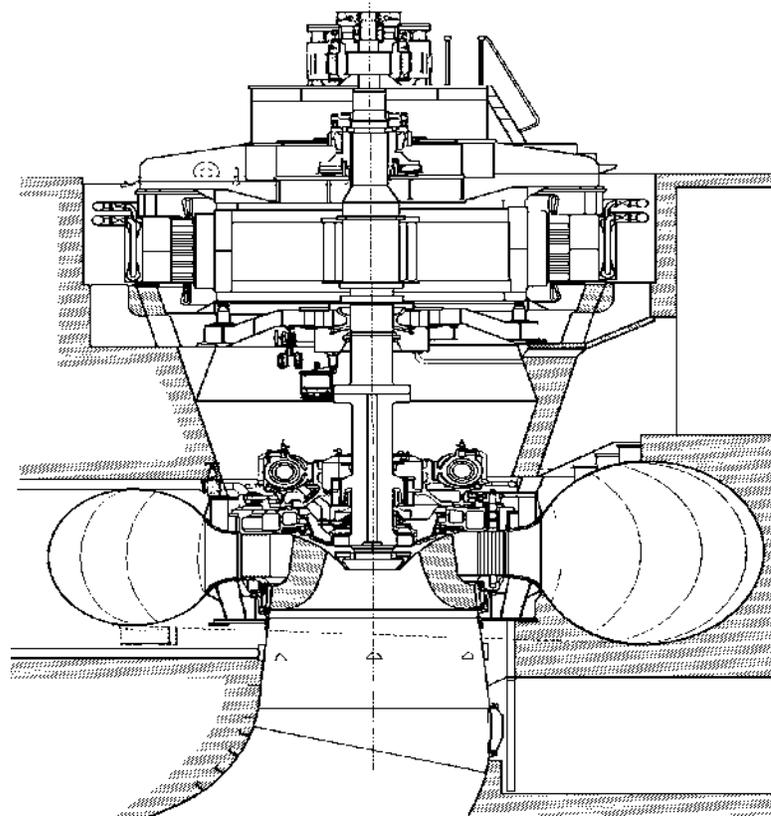


Figura 2.6 Esquema general del montaje de turbina Francis

2.3.2 Clasificación de las turbinas hidráulicas según la dirección del flujo en el rodete

El rodete, en el que tiene lugar el intercambio de energía mecánica y de fluido es el órgano principal de una turbina hidráulica. Consta de un cierto número de paletas o alabes, que dividen el espacio total ocupado por el mismo en conductos iguales, por donde circula en fluido de trabajo, que llena total (máquinas de admisión total) o parcialmente (máquinas de admisión parcial) el rodete experimentando una variación de su momento cinético.

Según la dirección del flujo en el rodete las turbomáquinas hidráulicas se clasifican en radiales, axiales y diagonales, las cuales se muestran en la Figura 2.7.

En las turbomáquinas radiales toda partícula de flujo recorre en el rodete una trayectoria situada en un plano transversal al eje de la turbomáquinas.

En las turbomáquinas axiales toda la partícula de fluido recorre en el rodete una trayectoria situada en un cilindro coaxial con el eje de la máquina.

En las turbomáquinas diagonales toda partícula de fluido recorre en el rodete una trayectoria situada en una superficie cónica o en una superficie cualquiera de revolución no desarrollable [1].

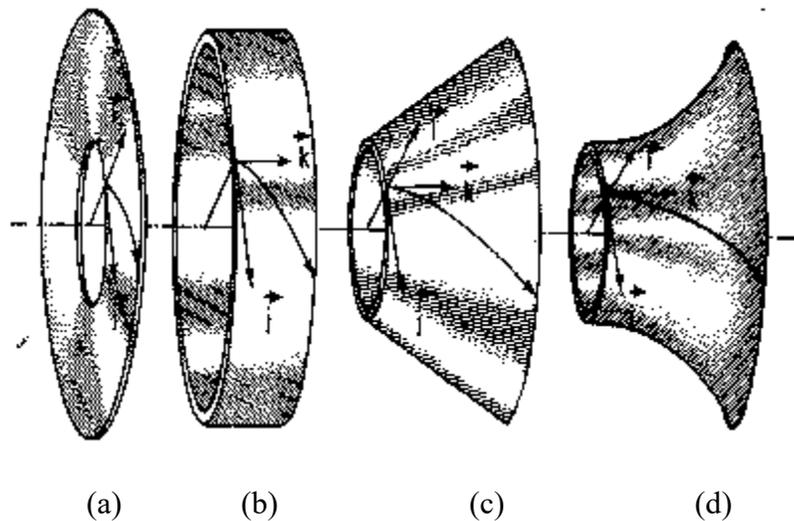


Figura 2.7. Superficie de corriente; a) de una turbina radial; b) de una turbina axial; c) de una turbina diagonal cónica; d) de una turbina diagonal.

2.4 Centrales eléctricas: centrales hidroeléctricas

Una central eléctrica es un conjunto de elementos destinados a la producción de energía eléctrica mediante el aprovechamiento de algún recurso energético. Por lo general las centrales eléctricas reciben el nombre genérico de la energía primaria utilizada: centrales térmicas, centrales nucleares, centrales hidráulicas o hidroeléctricas, centrales eólicas, centrales geotérmicas, etc.

La clasificación más general que se hace de estas es de acuerdo al servicio que dan en el consumo global de la red eléctrica. Siendo las centrales de base aquellas destinadas al suministro continuo de energía. Las centrales de punta se encargan de cubrir demandas de energía durante las horas pico, también se encuentran las centrales de reserva que tienen como objetivo reemplazar las centrales de base en caso de avería o reparación.

Las centrales de bombeo durante las horas de baja demanda utilizan el exceso de energía eléctrica generada para bombear agua a un embalse superior y aprovechar esta energía en las horas pico.

Dentro de las centrales eléctricas existentes podríamos hacer una división entre las principales centrales eléctricas y las que son de nuevas tecnologías o que utilizan fuentes de energía alternas.

Las centrales más importantes actualmente son las hidroeléctricas, las térmicas y las nucleares, mientras que por el lado de las energías alternas tenemos las centrales eólicas, las solares térmicas, las fotovoltaicas, centrales geotérmicas, maremotrices y de biomasa.

La conversión de energía en las centrales más importantes mencionadas anteriormente se realiza mediante el uso de turbinas que son utilizadas para impulsar generadores eléctricos.

2.4.1 Clasificación de las centrales hidroeléctricas

Cada central hidroeléctrica constituye un proyecto distinto de los demás ya que la central se ha de adaptar a las diferentes configuraciones del terreno y características que ofrece el salto en la naturaleza. Porque la naturaleza no ofrece simplemente una potencia hidráulica bruta.

2.4.1.1 Según el tipo de embalse

Las subclasificaciones de acuerdo al tipo de embalse para las centrales eléctricas son las siguientes:

a) Centrales de agua fluyente

No tienen embalse propiamente como tal. El agua o se utiliza en las turbinas o se derrama por el aliviadero de la central. Son las más frecuentes y entre ellas se encuentran las centrales de más potencia. Se caracterizan por gran caudal y poca altura. La central se instala en el curso mismo del río o en un canal desviado después de interceptar el mismo por un dique de contención. Se pueden clasificar en centrales con reserva, diaria o semanal o sin reserva. En las primeras se ensancha algo el curso del río para una cierta acumulación de agua.

b) Centrales con embalse

Constan de presa, canal de derivación, que aprovecha un meandro del cauce natural de río, tubería forzada y central.

El canal se construye con poca pendiente y gran sección transversal para disminuir las pérdidas y aprovechar al máximo la energía, que perdería en el lecho natural tortuoso del río. El embalse tiene por objeto regular las aportaciones del caudal de los ríos. Los embalses pueden ser destinados por su capacidad de acumulación a regulación mensual, anual o híper anual.

c) Centrales de acumulación por bombeo

El principio básico de una central de acumulación por bombeo es el siguiente: en los periodos de poca demanda de energía, por ejemplo, en las horas nocturnas, reutiliza la energía sobrante de la red, proveniente de otras centrales conectadas eléctricamente con la central de bombeo, para bombear agua del nivel de aguas abajo al nivel de aguas arriba.

d) Centrales maremotrices

La central maremotriz es una central que aprovecha la energía de las mareas. En esta se embalsa el agua cuando la marea esta alta y se turbinan cuando esta baja.

2.4.1.2 Según la potencia

Otra clasificación importante se hace de acuerdo a la potencia.

- Microcentrales: Potencia máxima, 99 Kw.
- Centrales de pequeña potencia: Potencia de 100 a 999 Kw.
- Centrales de potencia mediana: Potencia de 1000 a 9999 Kw.
- Centrales de gran potencia: Potencias superiores a 10000 Kw.

2.4.1.3 Según la altura del salto

La clasificación de las centrales según la altura del salto es la más importante porque es el salto neto más que otra característica el que determina tanto la obra civil como el tipo de turbina así como el alternador.

2.4.1.4 Salto de pequeña altura

Las centrales clasificadas de acuerdo al salto de pequeña altura son:

- Altura neta, $H \leq 14.99$ m
- Salto de mediana altura
 $15.00 \leq H \leq 49.99$ m
- Saltos de gran altura
 $H \geq 50$ m.

2.4.1.5 Según la economía de la explotación

La clasificación de las centrales por la economía de la explotación es:

- Centrales independientes: Alimentan una red individual no conectada a otras centrales.
- Centrales interconectadas: Alimentan una red común junto con otras centrales hidráulicas, térmicas, convencionales o nucleares.

2.4.1.6 Según el lugar de instalación

Finalmente, las centrales se pueden clasificar por el lugar de instalación siendo:

- Centrales de agua fluyente: la central intercepta el curso del río.
- Centrales de pie de presa: La central se construye al pie del embalse.
- Centrales subterráneas: se desarrollaron grandemente en Suecia, en la última guerra mundial para protección contra los ataques aéreos y en la actualidad en muchos casos constituyen la solución más económica.

2.5 Generación de energía eléctrica

La mayor parte de la energía que utilizamos en nuestra vida diaria es energía eléctrica pero generalmente no encontramos esta en la naturaleza como tal así que utilizamos medios distintos para su generación. La generación de energía eléctrica consiste primordialmente en la transformación de algún tipo de energía no eléctrica en esta mediante el uso de dispositivos que cumplan con este objetivo. El conjunto de dispositivos para la conversión de otras energías a energía eléctrica recibe el nombre de central eléctrica.

2.5.1 Generador eléctrico

Los generadores eléctricos son dínamos (dispositivos convertidores de energía) que transforman la energía mecánica en energía eléctrica. La construcción básica de el dínamo consta de dos componentes básicos que son el estator estacionario y el rotor giratorio [3].

El principio bajo el que operan los generadores eléctricos es la ley de inducción de Faraday la cual establece que la fem inducida en un circuito es igual al negativo de la velocidad con que cambia con el tiempo el flujo magnético a través del circuito.

La Figura 2.8 muestra una bobina de alambre como parte de un circuito que contiene un amperímetro. Normalmente cabría esperar que el amperímetro no mostrase corriente en el circuito porque parece que no existe una fuerza electromotriz. Sin embargo, si desplazamos un imán de barra hacia la bobina, con su polo norte encarado hacia la bobina, ocurre un fenómeno notable. Al moverse el imán, el indicador del amperímetro se mueve, demostrando con ello que pasa corriente por la bobina. Si mantenemos al imán estacionario

con respecto a la bobina, el amperímetro no marca. La corriente que aparece en este experimento se llama inducida y se dice que se origina por una fuerza electromotriz inducida. Faraday dedujo, a partir de experimentos como este la ley que da la magnitud y la dirección de la fem inducida [2].

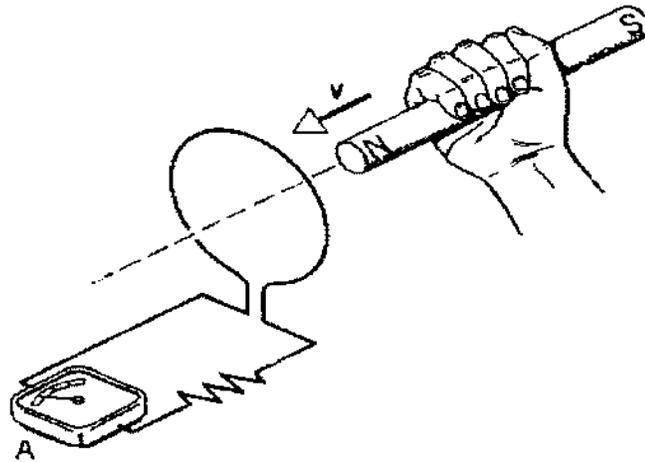


Figura 2.8 El amperímetro A marca cuando el imán se mueve respecto a la bobina.

2.5.2 Generadores de corriente alterna

Los generadores tradicionales de corriente alterna se clasifican en una de dos categorías: síncronos y de inducción. En los generadores síncronos, las corrientes de devanado del rotor se abastecen directamente de la estructura estacionaria a través del contacto de rotación. En los generadores de inducción, las corrientes del rotor se inducen en los devanados del mismo por una combinación de la variación temporal de las corrientes del estator y mediante el movimiento relativo del rotor al estator.

2.5.2.1 Generador síncrono

La Figura 2.9 muestra el esquema básico de un generador síncrono de polos salientes. El devanado de excitación de esta máquina produce un par único de polos magnéticos (similar al que presenta una barra imantada), como consecuencia, a esta generador se le denomina de dos polos. El devanado de excitación se activa mediante una corriente directa conducida hacia éste por medio de unas escobillas de carbón que hacen contacto con los anillos deslizantes de rotación montados en la flecha del rotor.

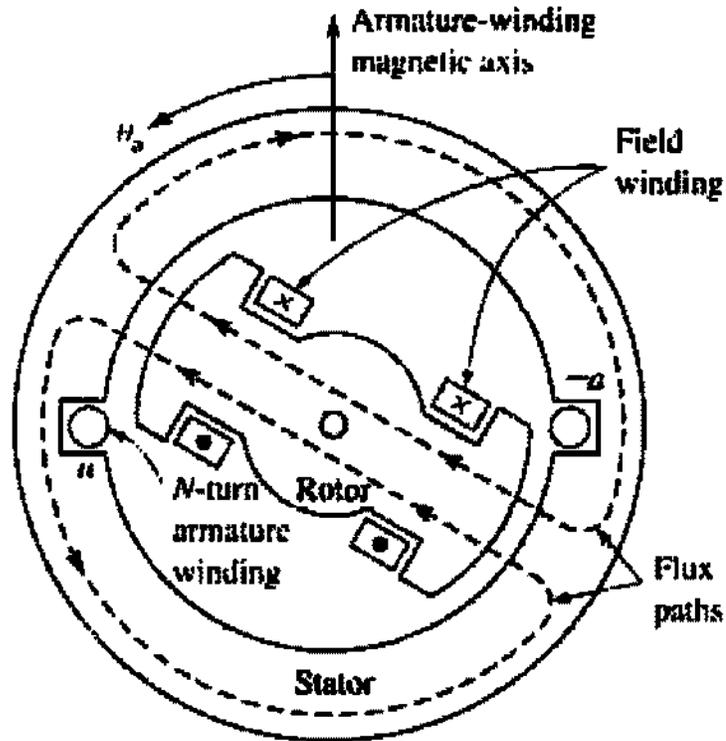


Figura 2.9 Vista esquemática de un generador síncrono de una fase dos polos.

El devanado de armadura o inducido, que para la Figura 2.9 consiste exclusivamente de una bobina única con N número de vueltas, se indica en la sección transversal por medio de los dos costados de la bobina a y $-a$ colocada en ranuras opuestas diametralmente sobre la periferia interna del estator en la Figura 2.9.

Los conductores que constituyen los costados de la bobina son paralelos a la flecha de la máquina y se conectan en serie. El rotor gira a una velocidad constante por medio de una fuente de potencia mecánica que se conecta a esta flecha. El voltaje inducido en la bobina a pasa a través de un ciclo completo para cada revolución del rotor bipolar. La frecuencia de este voltaje en ciclos por segundo (Hz) es la misma que la velocidad del rotor en revoluciones por segundo: la frecuencia eléctrica del voltaje generado se sincroniza con la velocidad mecánica, lo cual es la razón de la designación de generador síncrono. De esta forma, un generador síncrono bipolar deberá girar a 3600 revoluciones por minuto para producir un voltaje con frecuencia de 60 Hz [4].

La Figura 2.10 muestra una onda senoidal que corresponde al voltaje inducido en la bobina a del generador síncrono bipolar de la Figura 2.9.

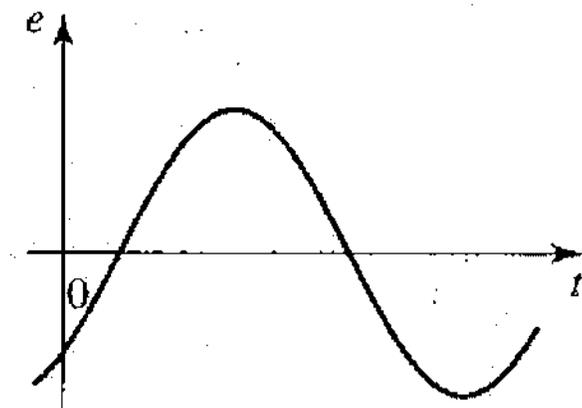


Figura 2.10 Voltaje inducido en el devanado del estator

La mayoría de los generadores síncronos presentan más de dos polos como se muestra en la Figura 2.11 que esquematiza un generador síncrono tetrapolar donde las bobinas de excitación se disponen de manera que los polos alternen su polaridad. El devanado del inducido ahora se compone de dos bobinas $a_1, -a_1$ y $a_2, -a_2$ que se unen en serie mediante conexiones que no se muestran en el esquema. El voltaje que se genera se conduce a través de dos ciclos completos por revolución del rotor y por lo tanto la frecuencia del voltaje generado será el doble que en el caso de un generador bipolar. El voltaje del inducido en un generador multipolar se conduce a través de un ciclo completo cada vez que un par de polos gira.

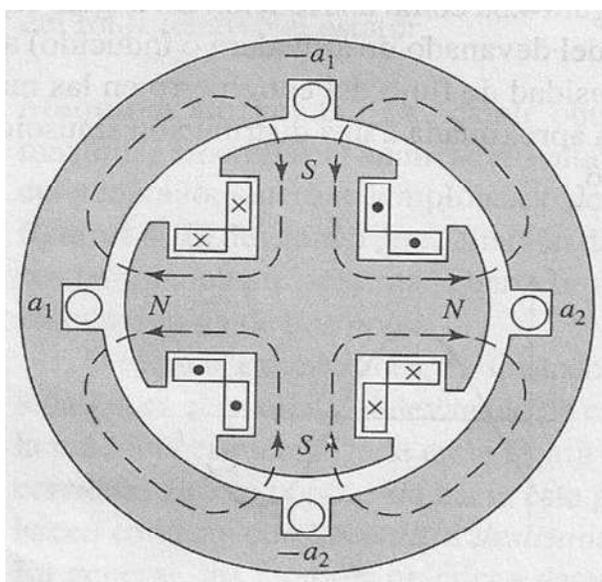


Figura 2.11 Generador síncrono tetrapolar

2.5.3 Generadores de corriente directa

Un generador de corriente directa tiene como objetivo la generación de un voltaje de corriente directa, CD. El inducido o devanado de armadura en un generador de CD se encuentra en el rotor a diferencia de un generador de CA en el cual las bobinas del inducido se encuentran en el estator. A pesar de que el objetivo final de esta máquina es la obtención de un voltaje de CD, se producen voltajes de corriente alterna, CA, en las bobinas del devanado de armadura o inducido cuando estas giran a través de la distribución de flujo de corriente directa del devanado de excitación estacionaria. Por lo tanto, el voltaje alternante del devanado de armadura o inducido deberá rectificarse, la rectificación se realiza de manera mecánica mediante el uso de un conmutador, que es un cilindro de material aislado en el que se monta, también de manera aislada la flecha del rotor, este cuenta con segmentos de cobre que van conectados a las bobinas del inducido y a su vez tienen contacto con las escobillas. En la Figura 2.12 se presenta el esquema de un generador muy elemental de corriente directa. El devanado de armadura o inducido, que consiste de una bobina única con N número de vueltas, se indica por medio de los dos costados de la bobina a y $-a$ colocados en puntos diametralmente opuestos en el rotor con los conductores paralelos a la flecha [4].

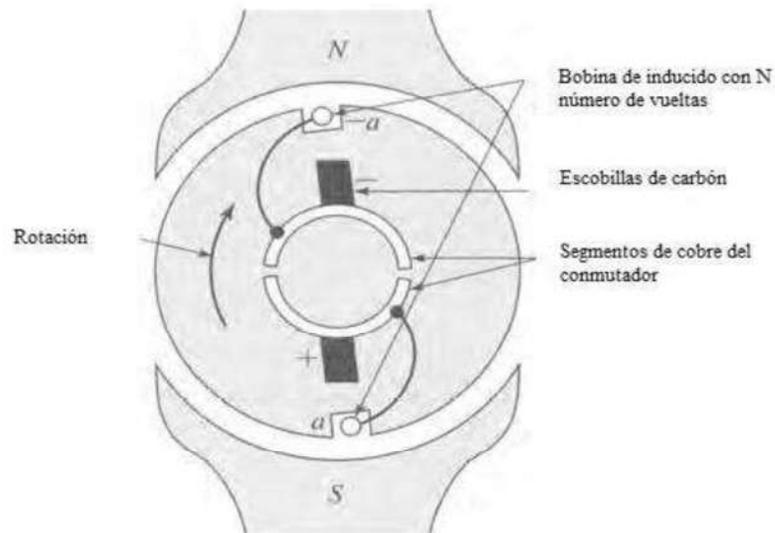


Figura 2.12 Máquina elemental de corriente directa con conmutador.

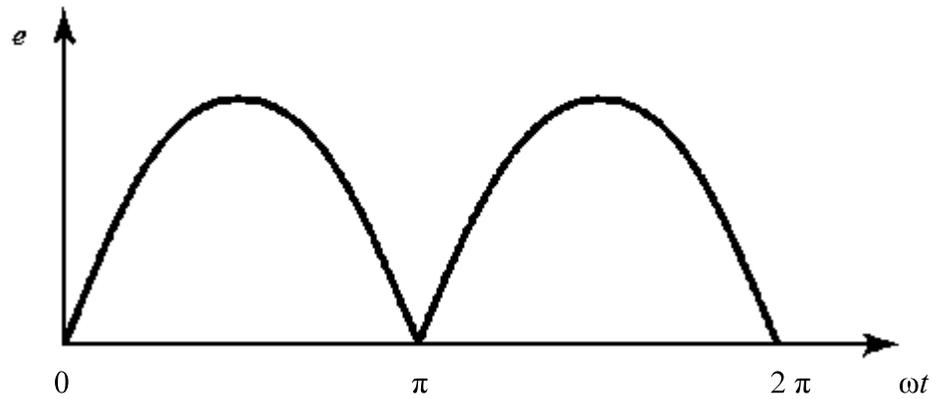


Figura 2.13 Voltaje entre las escobillas en la máquina elemental de corriente directa que se esquematiza en la Figura 2.12.

El conmutador simple de dos segmentos mostrado en la Figura 2.12 suministra una rectificación de onda completa del voltaje de la bobina. La rectificación del conmutador producirá un voltaje de corriente directa a través de las escobillas como se ilustra en la Figura 2.13 donde e representa el voltaje inducido en la bobina.

Capítulo 3

Diseño y construcción de una turbina Pelton a escala

Este capítulo presenta la forma en la cual se llevó a cabo el diseño y la construcción de la turbina utilizada en el proyecto, el diseño se realizó en base a criterios que son utilizados para construir turbinas Pelton en tamaños mayores. Los fabricantes de turbinas Pelton difieren en ocasiones en los criterios que rigen la construcción de la turbina, sobre todo en lo que concierne a la forma de los álabes o “cucharas” del rodete, más sin embargo, por lo general estos criterios están acotados dentro de ciertos parámetros, es decir, las proporciones de los álabes aunque son diferentes encajan dentro de cierto rango y son muy similares, las proporciones para el diseño aquí presentado procuran entrar también dentro de ese rango, esta parte se detallará con más cuidado en la sección 3.1.2.

Una turbina Pelton puede ser construida con varios chorros, pero desde el punto de vista de construcción y control el diseño se vuelve más complejo que aquella que trabaja con un solo chorro. El diseño presentado en esta tesis toma en cuenta un sólo inyector para determinar las dimensiones del rodete de la turbina.

3.1 Dimensiones de una turbina Pelton

Las dimensiones de una turbina Pelton están directamente relacionadas con la velocidad del chorro del inyector que a su vez depende de la altura del salto disponible y de la velocidad a la que se quiere que gire la turbina. Para bajas velocidades de giro el rodete de la turbina tiene un diámetro considerable respecto a los álabes y un gran número de estos, las velocidades más altas son alcanzadas por aquellas turbinas que poseen un diámetro menor y un número más bajo de álabes en el rodete. Desde el punto de vista constructivo es posible llegar a tener rodetes de diámetros de hasta 5 metros y aun más, también pueden ser pequeños para alcanzar velocidades de giro mayores.

Las dimensiones más importantes de una turbina Pelton son:

- Diámetro del inyector.
- El diámetro del rodete.
- Tamaño de los álabes.

3.1.1 Diámetro del inyector

El diámetro del chorro del inyector está 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 salida de la tobera que aloja la guja 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:

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

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

$$d = (1.15 - 1.25) d_0 \quad (3.2)$$

En la Figura 3.1 se muestra un inyector en el cual están acotadas las medidas de los diámetros de la salida de la tobera y el diámetro del chorro una vez contraído por la acción de la aguja.

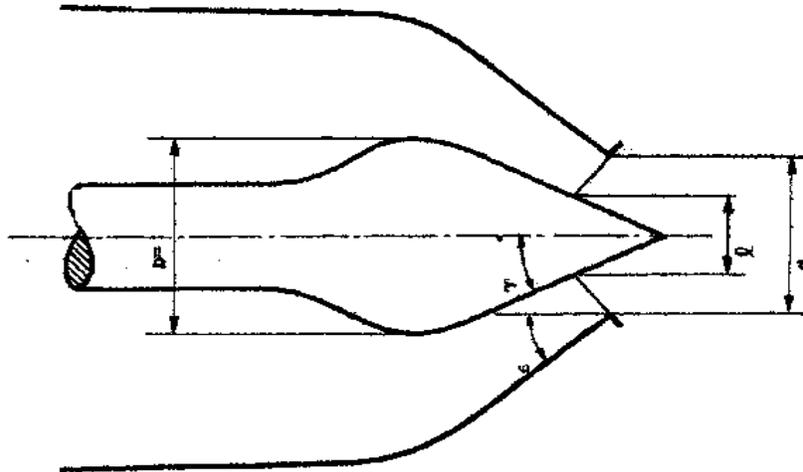


Figura 3.1 Tobera y diámetros del chorro.

El caudal asociado con la tobera depende del diámetro del chorro y de la velocidad del mismo, la fórmula que nos permite obtener el caudal es la siguiente:

$$Q = \frac{\pi d_0^2}{4} (\sqrt{2gH}) \quad (3.3)$$

donde,

Q es el caudal a la salida de la tobera.

$\sqrt{2gH}$ es la velocidad del agua debida a la fuerza de gravedad.

d_0 es el diámetro del chorro en la vena contracta debido a la acción de la aguja.

El diámetro del inyector es una variable muy importante en el diseño de la turbina ya que las dimensiones del rodete así como de los álabes están relacionadas con el diámetro del chorro del inyector.

3.1.2 Diámetro del rodete

La determinación del tamaño del rodete depende principalmente de la velocidad del chorro la cual a su vez depende de la altura del salto disponible, otra consideración es la velocidad a la cual se quiere que gire el rodete, los rodetes de baja velocidad se caracterizan por un gran diámetro mientras que los pequeños giran a una velocidad mayor. El diámetro D de la turbina se calcula de la siguiente manera:

$$D = \frac{u}{\pi n} \quad (3.4)$$

en donde,

D es el diámetro característico de la turbina Pelton que es la distancia desde el centro del eje de la turbina a la tangente del centro del chorro del inyector.

u es la velocidad periférica.

n es el número de revoluciones al cual se quiere que gire la turbina.

Pareciera que de acuerdo a la ecuación (3.4) pudiéramos hacer que nuestro rodete girará a la velocidad que nosotros quisiéramos pero no es así, para que la turbina trabaje de una manera adecuada debe de cumplir cierta relación que es la siguiente:

$$\delta = \frac{d_0}{D} \quad (3.5)$$

en donde,

δ es la relación de diámetros

d_0 es el diámetro del chorro que sale del inyector

D es el diámetro característico Pelton.

Para que la turbina tenga un buen rendimiento es recomendable que la relación anterior se acerque a 1/10. La relación de las variables de una turbina Pelton se ilustra en la Figura 3.2.

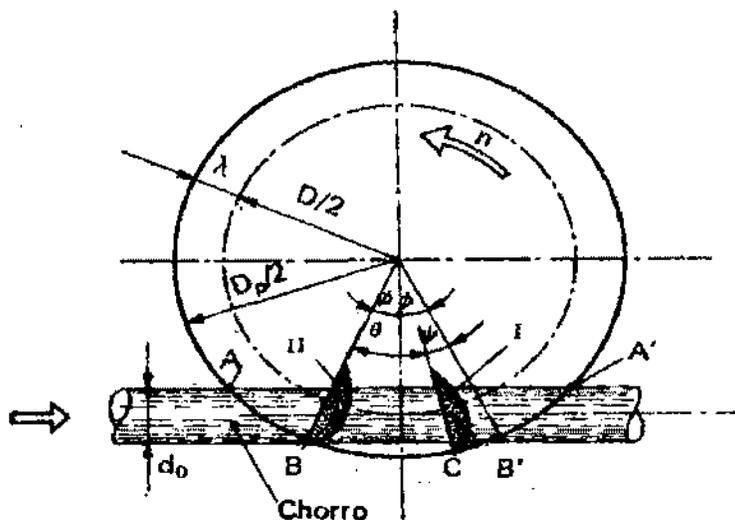


Figura 3.2 Diámetro característico de la turbina Pelton.

3.1.3 Dimensiones de los alabes

El tamaño de los álabes depende directamente del diámetro del chorro que sale del inyector y las dimensiones de estos están determinadas por relaciones empíricas que los constructores de turbinas han obtenido durante el paso del tiempo mediante experimentación. En la Figura 3.3 se muestran las medidas de una cuchara Pelton de acuerdo a los criterios más utilizados. La Figura 3.3 muestra también los ángulos de entrada y salida del agua más utilizados en los álabes de las turbinas Pelton.

Las dimensiones son las siguientes:

$$L = (2.30 \text{ a } 2.80) d_0$$

$$B = (2.80 \text{ a } 3.20) d_0$$

$$S = (1.10 \text{ a } 1.20) d_0$$

$$T = (0.60 \text{ a } 0.90) d_0$$

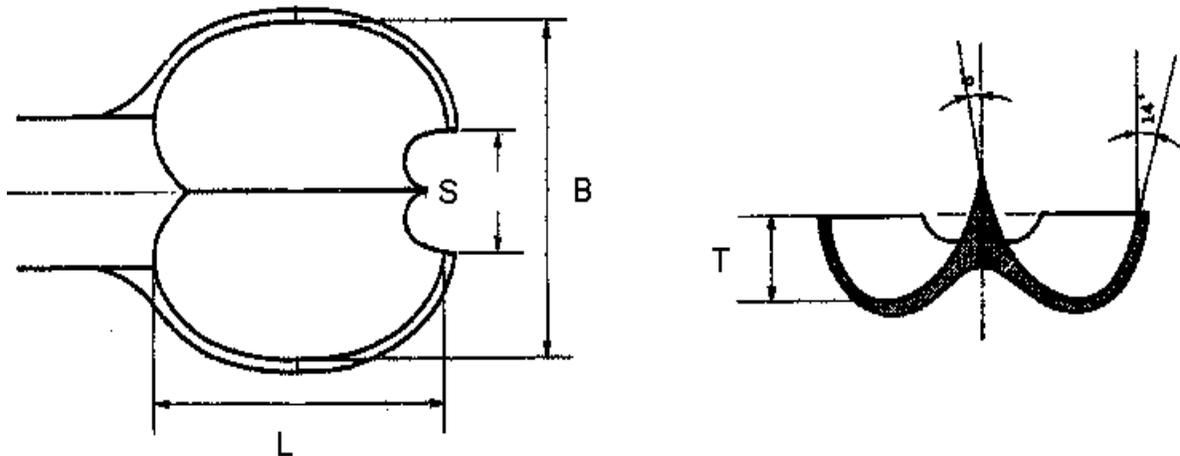


Figura 3.3 Relaciones empíricas para el tamaño de las cucharas.

3.2 Forma de los álabes

La forma de las cucharas se determina de la siguiente manera:

A la entrada de cada partícula en la cuchara se conforma ésta de manera que se evite el choque. La Figura 3.4 muestra cortes axiales de la cuchara donde se muestran líneas que indican la forma de la cuchara en distintas secciones de la misma, estas líneas están conformadas de tal manera que al momento en que el chorro hace contacto con las cucharas este no choque sino que tenga un movimiento suave dentro de la cuchara de tal manera que se aproveche la energía del chorro.

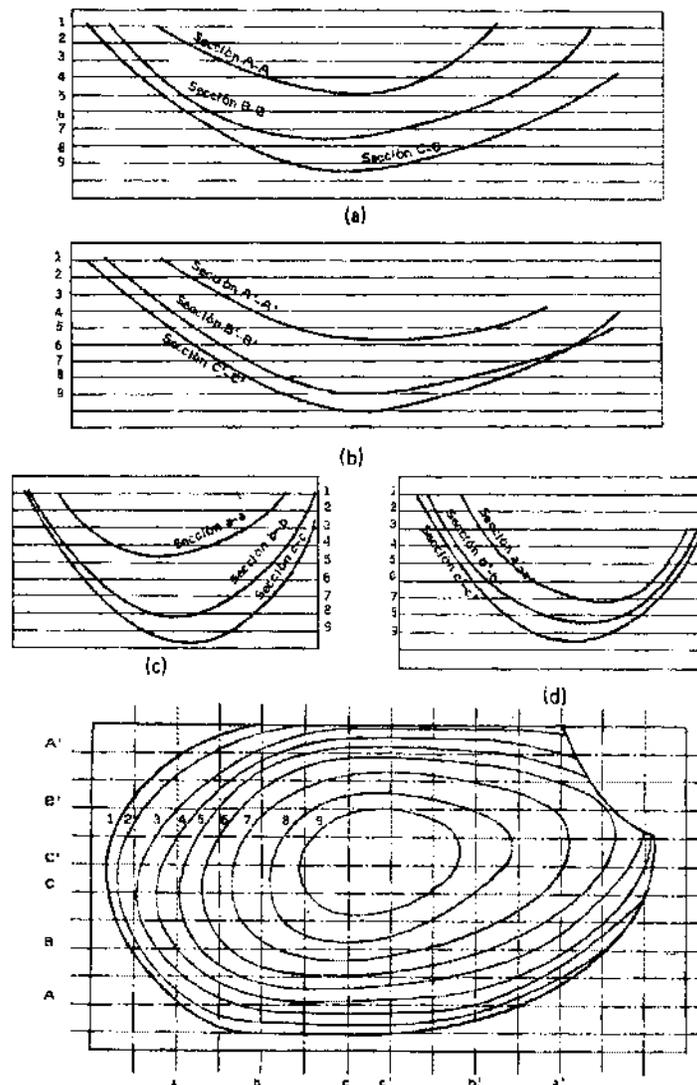


Figura 3.4 Superficie interior de las cucharas: cortes y curvas de nivel.

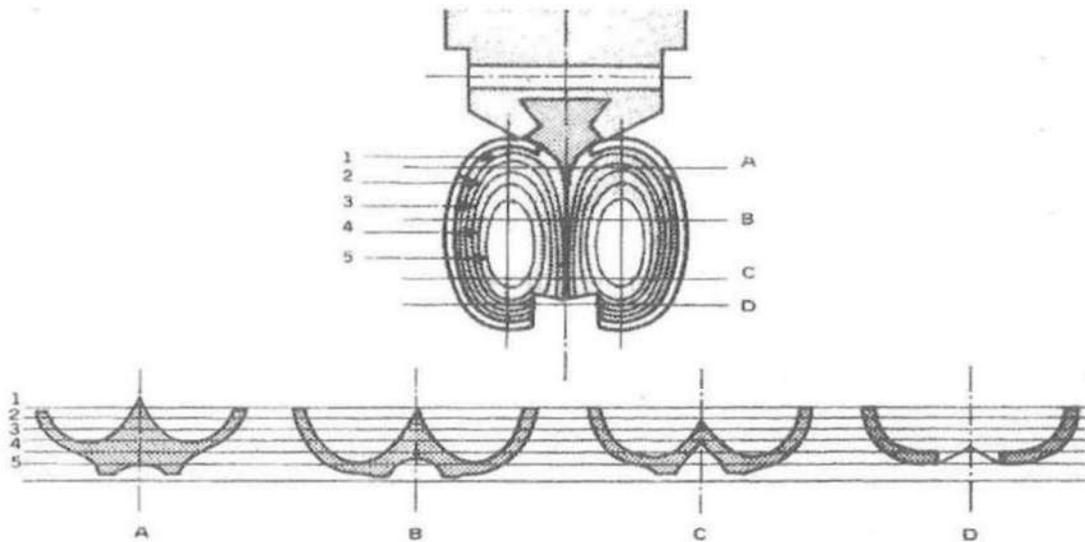


Figura 3.5 Trazado de las curvas de nivel de una cuchara.

La Figura 3.5 muestra las curvas de nivel que sirven para construir una cuchara, la parte inferior de la figura muestra la manera en la que está constituida la cuchara de acuerdo a la parte superior de la figura.

3.3 Número de álabes

La obtención del número de álabes puede ser directamente mediante el uso de tablas obteniendo primeramente el número específico de revoluciones específicas del rodete cantidad que esta dada por la siguiente fórmula:

$$n_s = \frac{nCV^{\frac{1}{2}}}{H^{\frac{5}{4}}} \quad (3.6)$$

donde,

n_s es el número específico de revoluciones de la turbina.

n es el número de revoluciones a las cuales girara la turbina.

CV es la potencia en caballos de vapor.

H es la altura del salto disponible.

Cuando se ha determinado el valor de n_s se puede obtener el número de álabes de la tabla 3.1, la cual muestra relaciones entre el número de revoluciones específicas y el número de cucharas que pueden ser utilizadas dentro de diferentes rangos.

Tabla 3.1 Número de cucharas de las turbinas Pelton en función de n_s .

Número específico de revoluciones n_s	Número de cucharas z	Número específico de revoluciones n	Número de cucharas z
4	40	14	26
6	37	18	22
8	34	22	20
10	30	26	17
12	28	32	15

3.4 Velocidad del chorro a la salida del inyector

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

$$c_1 = \sqrt{2gH} \quad (3.7)$$

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 en el inyector y aquí es donde entra el coeficiente de velocidad k_{c1} y este oscila entre .97 y .99 así que la velocidad del chorro queda de la siguiente manera:

$$c_1 = k_{c1} \sqrt{2gH} \quad (3.8)$$

3.5 Orientación de los alabes de la turbina

Esta orientación se logra en el laboratorio con tanteos en el ensayo de un modelo reducido. Para ello se utiliza en el modelo de laboratorio el montaje individual por bulón, se hace girar la cuchara alrededor del eje del bulón mediante ensayos sucesivos hasta conseguir que el chorro ataque a la cuchara en condiciones óptimas. De esta manera se logra en el laboratorio la orientación óptima de las cucharas. La Figura 3.6 muestra la trayectoria de las partículas del chorro a través del álabe, el álabe se coloca de tal manera que su arista sea tangente al círculo D^1 y que las trayectorias relativas tomen la forma mostrada en la figura.

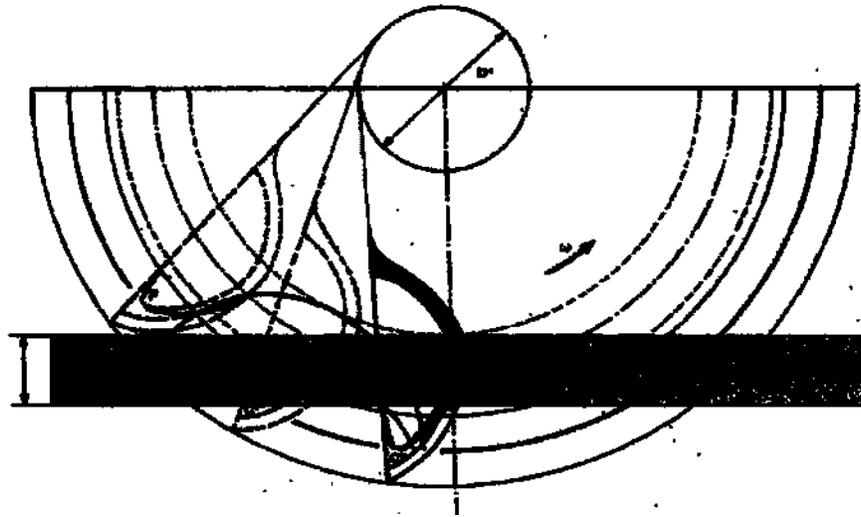


Figura 3.6 Orientación de los álabes de la turbina.

3.6 Diseño de una micro turbina Pelton

Para el diseño de la turbina a escala se tomó como referencia un proyecto del libro “Turbomáquinas hidráulicas” de Claudio Mataix, en él se proyecta un rodete Pelton para un salto neto de 270 m y un caudal de $1.880 \text{ m}^3/\text{s}$ y un diámetro del chorro d_0 de 180 mm.

Para el diseño de la turbina a escala se consideró una altura de 27 m y un diámetro de chorro d_0 de 18 mm y de ahí se procedió para realizar los cálculos correspondientes al rodete, cálculos que se muestran a continuación:

Caudal:

$$Q = \frac{\pi(0.018)^2}{4}(\sqrt{2gH}) = .0058m^3 / s$$

Potencia:

$$P = QgH = (.0058)(9.81)(27) = 1.53kW$$

La potencia calculada anteriormente es la potencia hidráulica neta, es decir, no se toma en consideración ningún tipo de pérdidas como pueden ser las mecánicas a causa del roce del agua con el material de los álabes o pérdidas en los rodamientos. Este valor se dejará por el momento como tal con el propósito de compararlo con la potencia que entregue la turbina en operación, misma que puede ser medida con la velocidad y par entregado en la flecha. Esto se abordará más adelante al momento de realizar pruebas.

Para el cálculo del diámetro de la turbina se utiliza la fórmula (3.4) sólo que ahora se le agrega el factor k_u .45 que es el coeficiente de velocidad periférica el cual representa una disminución en la velocidad que debería ser transmitida al rodete.

Diámetro del rodete:

$$D = \frac{u}{\pi n} = \frac{60k_u \sqrt{2gH}}{\pi n} = \frac{60(k_u)\sqrt{2(9.81)(27)}}{(\pi)(1200)} = .161m$$

El número de álabes se puede determinar de la tabla 3.1 al obtener las revoluciones específicas n_s determinadas por la ecuación 3.6.

Número de alabes:

$$n_s = \frac{nCV^{\frac{1}{2}}}{H^{\frac{5}{4}}} = \frac{(1200)(2.078)^{\frac{1}{2}}}{(27)^{\frac{5}{4}}} = 28.10$$

De la tabla 3.1 se puede concluir que el número adecuado sería de 17 álabes para el rodete.

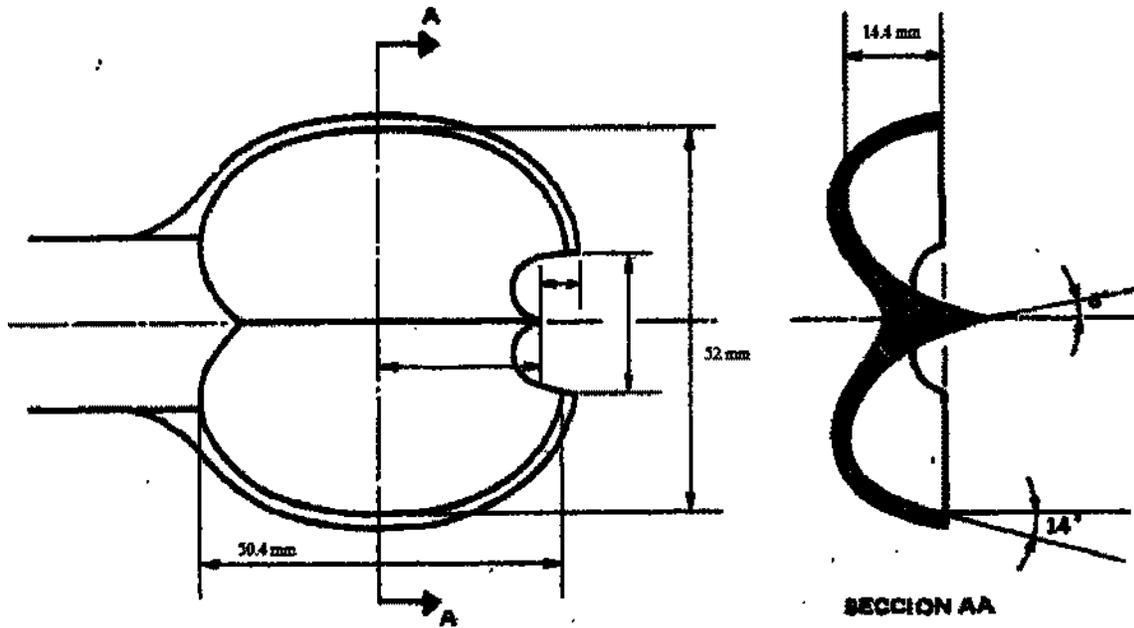


Figura 3.7 Cotas de diseño para los álabes

Las dimensiones de los álabes serán asignadas de acuerdo a las relaciones empíricas mostradas en la Figura 3.3 así la Figura 3.7 muestra las cotas para el diseño del álabe de la turbina que se han hecho los cálculos.

3.7 Construcción de los álabes

3.7.1 Modelo en yeso

Una vez obtenidas las dimensiones de los álabes de acuerdo a los cálculos realizados se procedió con la construcción. Se optó por elaborar el modelo de un álabe en yeso, para esto se fabricaron dos pequeñas piezas de madera que sirvieron para dar la forma a la parte interior del álabe, la Figura 3.8 muestra las piezas mencionadas, estas fueron realizadas de tal manera que se acercarán lo más posible a la forma que especifican las curvas de nivel y cortes mostrados en la Figura 3.4. Las medidas de ancho y largo de las piezas, así como su profundidad se tomaron de los cálculos realizados en la parte de diseño en la sección 3.6.

Ya realizadas estas dos piezas se procedió con el vaciado en yeso utilizando estos modelos de la parte interior del álabe, se colocaron las piezas en un recipiente para vaciar

en él el yeso, la Figura 3.9 muestra el primer molde obtenido del vaciado en yeso, el cual no tuvo un buen resultado debido a la mala mezcla del yeso y la falta de este en la parte exterior del vaciado, se puede ver en la figura como es que el molde aparece perforado y con la arista media del álabe destrozada.



Figura 3.8 Modelos para la parte interior del álabe de la turbina Pelton.

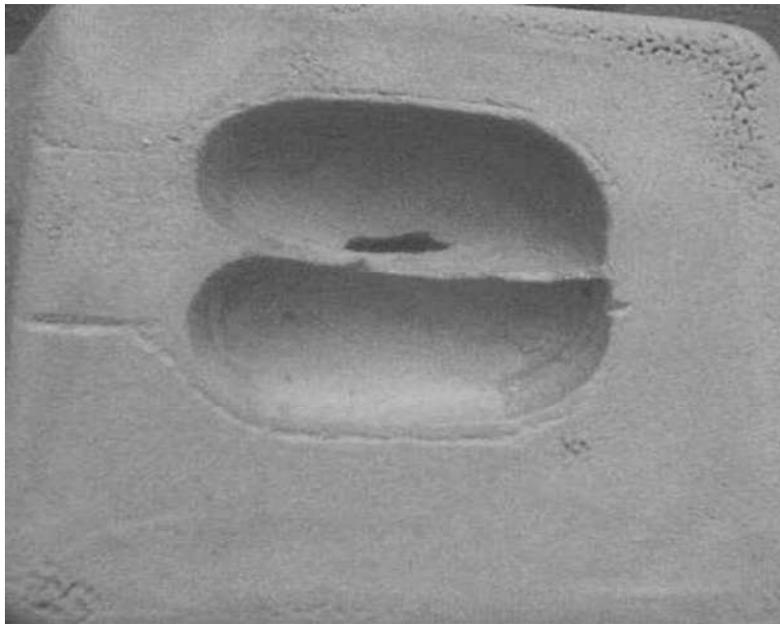


Figura 3.9 Primer molde obtenido con las piezas de madera.

El molde se hizo nuevamente obteniendo esta ocasión un mejor resultado, agregando en esta ocasión un poco de pegamento a la mezcla obtuvo una mejor consistencia y el vaciado seco apropiadamente, en la Figura 3.10 se puede ver el resultado del nuevo vaciado, a éste ya se le ha dado la forma de la cuchara y se muestra cómo es que encajan los modelos de madera. En la Figura 3.11 se ilustra la superficie interior del álabe diseñado y construido.

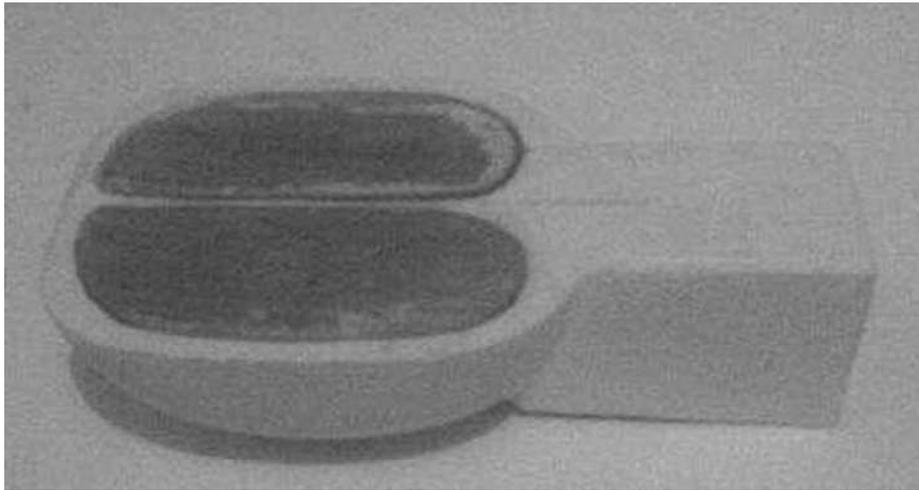


Figura 3.10 Alabe realizado en yeso.



Figura 3.11 Superficie interior.

La superficie interior obtenida mediante el vaciado de yeso fue satisfactoria ya que muestra un interior con una forma suave que es lo que se requiere para que el chorro se desplace de una manera favorable dentro de la cuchara, en esta etapa la cuchara aún no muestra el corte característico o escotadura tan distintiva en las turbinas Pelton, este corte se realizará en una pieza que tenga una dureza mayor. Utilizando este modelo de álabe se hará un molde para obtener otra pieza idéntica pero esta vez en resina, la cual tiene una mayor dureza permitiendo afinar detalles en la arista y bordes de la cuchara y por supuesto realizar la escotadura.

3.7.2 Molde de silicón

Utilizando el modelo de yeso del álabe es posible realizar un molde de silicón con el cual se pueden vaciar las paletas de la turbina. La Figura 3.12 muestra una de las partes del molde fabricado, en ella se encuentra montado el modelo de yeso que le da forma. Para la fabricación de la segunda parte del molde sólo se tiene que verter nuevamente silicón sobre esta pieza, el silicón muestra unas perforaciones que servirán de guía para que la segunda pieza del molde y esta encajen apropiadamente. En la Figura 3.13 podemos ver la parte restante del molde que tiene la forma de la parte interior del álabe. Como se pudo observar la geometría del álabe permite realizar el molde con relativa facilidad.

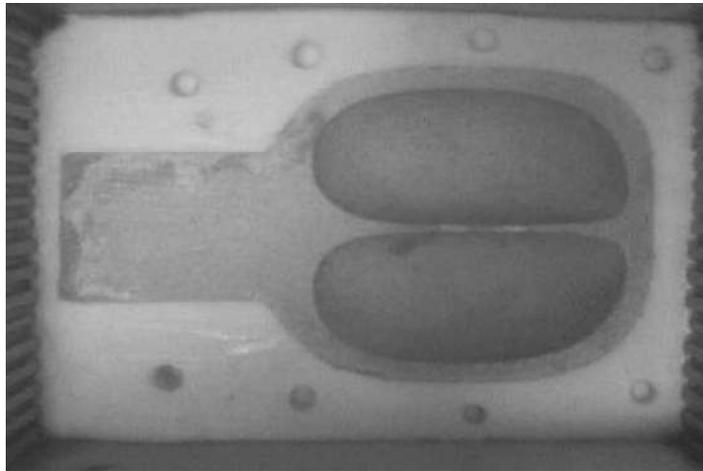


Figura 3.12. Obtención de una parte del molde de silicón usando el modelo en yeso.

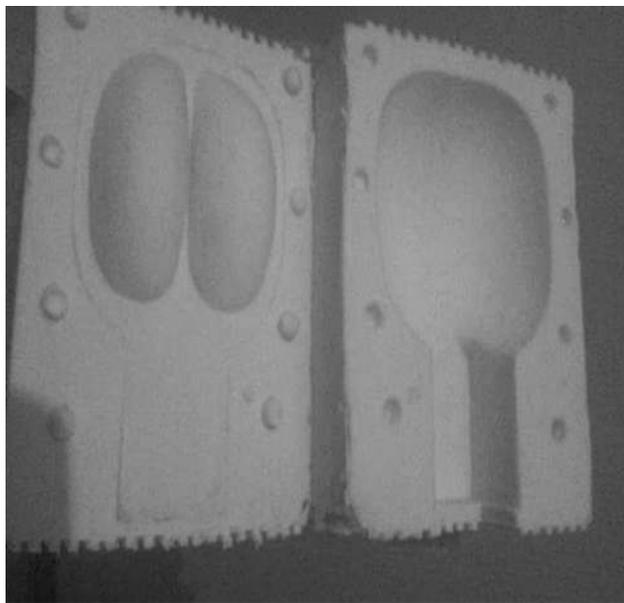


Figura 3.13. Partes terminadas del molde de silicón.

3.7.3 Vaciado de la resina

Antes de verter la resina en el molde es necesario saber la cantidad de ésta a ser utilizada para cada vaciado, para medir el monto de resina necesaria se utiliza el modelo de yeso. Se introduce en un vaso con agua el modelo para determinar el volumen que este desplaza y así se obtiene la cantidad de resina necesaria. En la Figura 3.14 se encuentran las dos partes del molde de silicón que son unidas en la Figura 3.15 donde se muestra el orificio por donde será vaciada la resina.

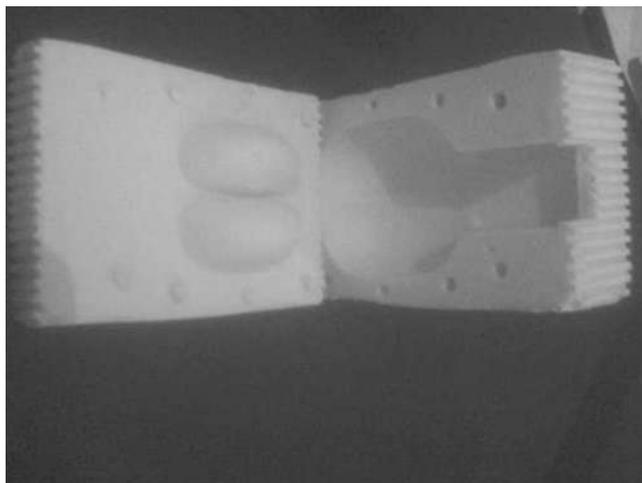


Figura 3.14. Secciones del molde de silicón.

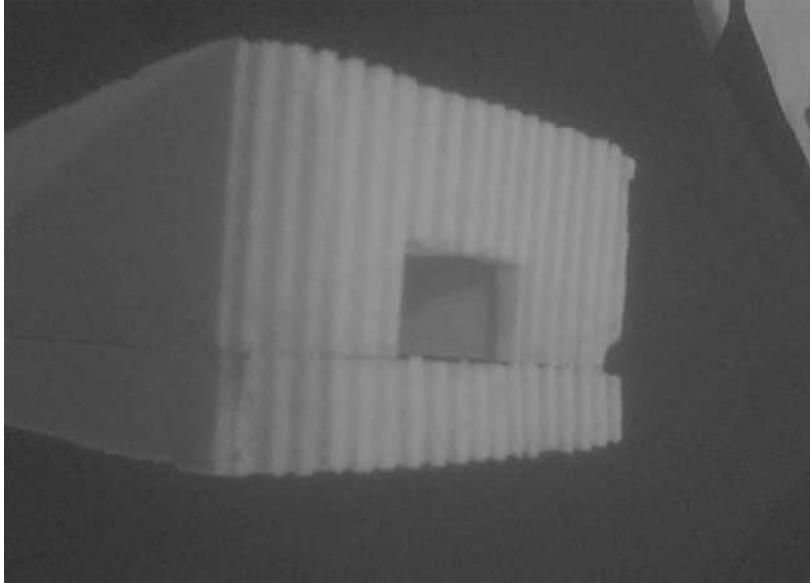


Figura 3.15. Molde listo para el vaciado de la resina.

El proceso de vaciado es rápido más no así el secado de la pieza que tarda aproximadamente seis horas o un poco más para que endurezca la pieza. Después de dejar secar la pieza se puede desmontar del molde como se ve en la Figura 3.16.

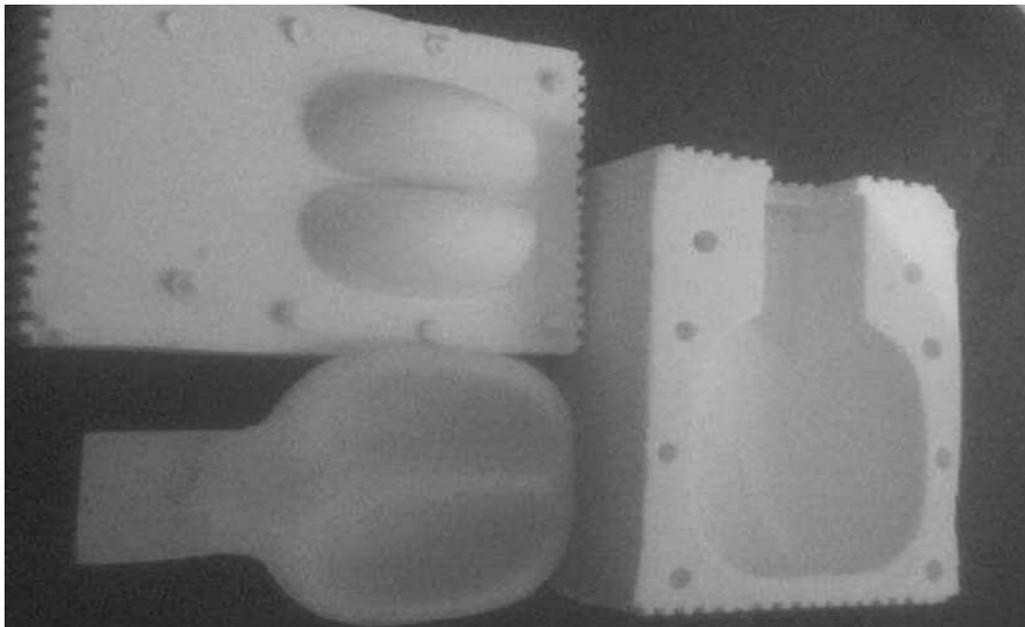


Figura 3.16. Molde y pieza terminada en resina.

3.8 Armado de la turbina

El armado de la turbina está basado en los cálculos realizados en la sección 3.6 donde se tienen las medidas tanto del diámetro del rodete así como la posición en la que deberán estar orientados los álabes de la turbina.

Los álabes de resina fabricados con el molde de silicón poseen una base rectangular que no está preparada para el montaje en el rodete, esta será cortada de acuerdo a la forma que requiera la orientación del álabe como muestra la Figura 3.17.

Habiendo realizado los cortes necesarios a los álabes la construcción de la turbina procede mediante la utilización de dos discos de acrílico que tendrán la tarea de darle forma al rodete sosteniendo los álabes que irán atornillados en los discos (Figura 3.18).

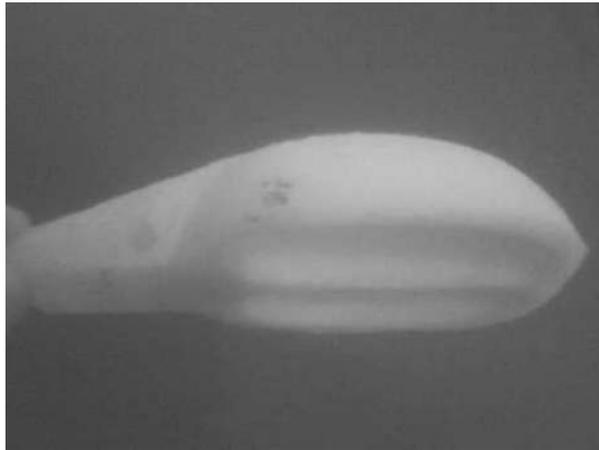


Figura 3.17. Cuchara con corte en la base para el correcto acoplamiento.

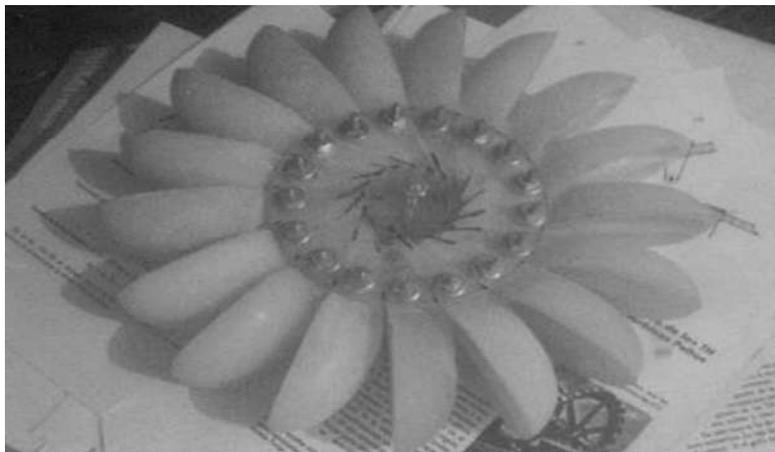


Figura 3.18. Alabes montados en discos de acrílico.



Figura 3.19. Vista del montaje de los álabes.

En la Figura 3.19 se notan claramente los discos de acrílico que sostienen los álabes mediante el uso de tornillos. El siguiente paso a considerar fue la fabricación del eje de la turbina, la Figura 3.19 muestra el rodete con un tornillo en el centro, el orificio por donde pasa el tornillo será sustituido por un eje de “NAILAMID” que permitirá el uso de una flecha de tres cuartos de pulgada como muestra la Figura 3.20.

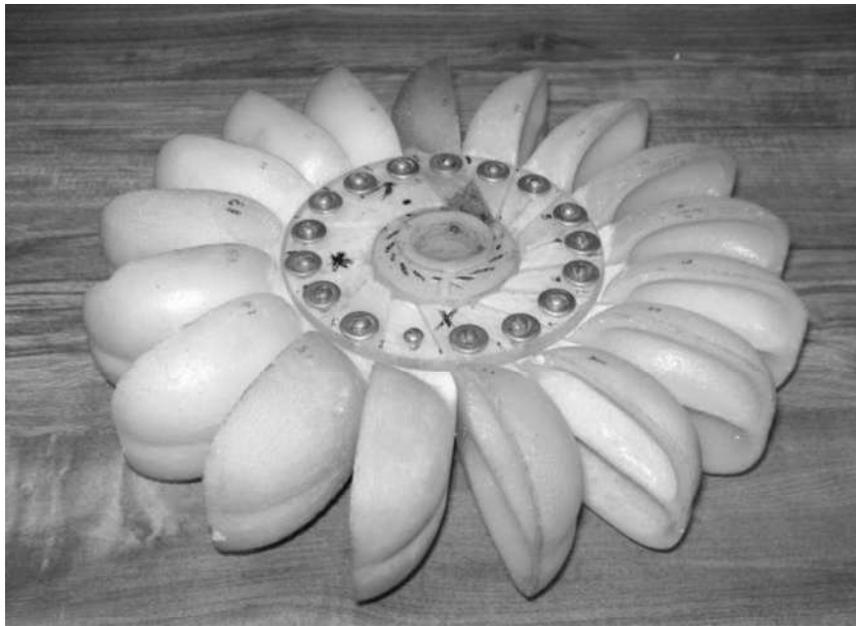


Figura 3.20. Rodete con eje para flecha de tres cuartos de pulgada.

Capítulo 4

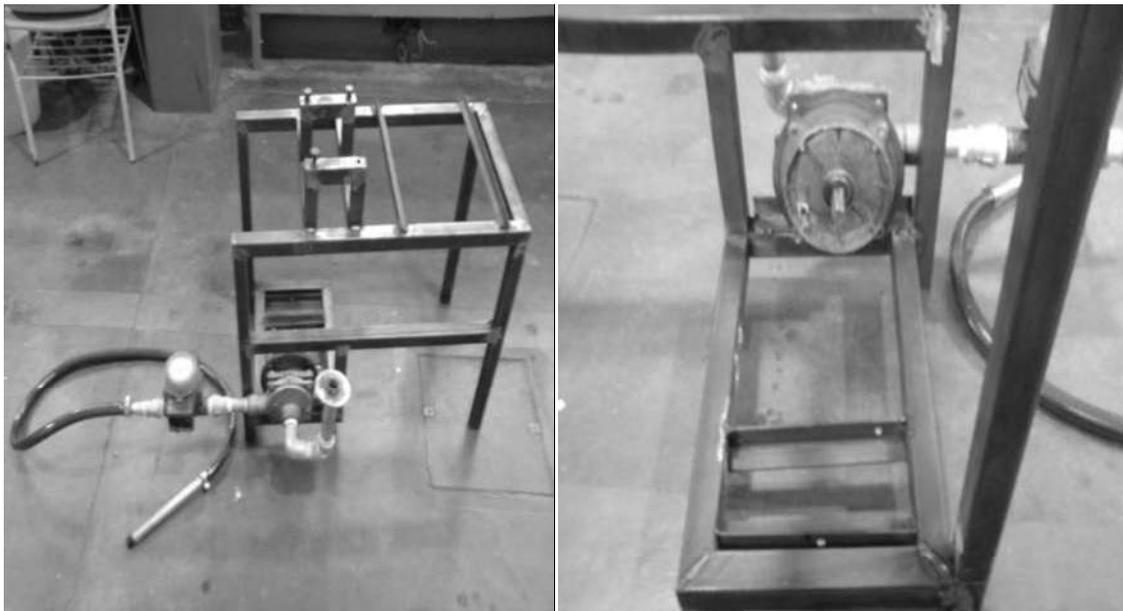
Construcción del sistema de generación

Un sistema de generación de energía eléctrica está formado por dos partes principales que son el generador eléctrico del cual ya se habló en el capítulo dos y el primo motor que da impulso al generador para que éste realice su labor.

Para realizar las pruebas de funcionamiento de la turbina se construyó un armazón metálico de tal manera que se le puedan acoplar diferentes equipos eléctricos para realizar mediciones de carácter mecánico así como eléctrico. Este montaje también incluye un pequeño sistema de bombeo para alimentar la turbina.

4.1 Montaje de la turbina Pelton y equipo adicional

Para el montaje de la turbina Pelton se construyó una base metálica que soporta todos los elementos necesarios para realizar las pruebas de funcionamiento. La base fue construida de tal manera que fuera posible el acoplamiento de las máquinas utilizadas en el laboratorio de ingeniería eléctrica.



(a)

(b)

Figura 4.1 Armazón metálico para soporte del equipo.

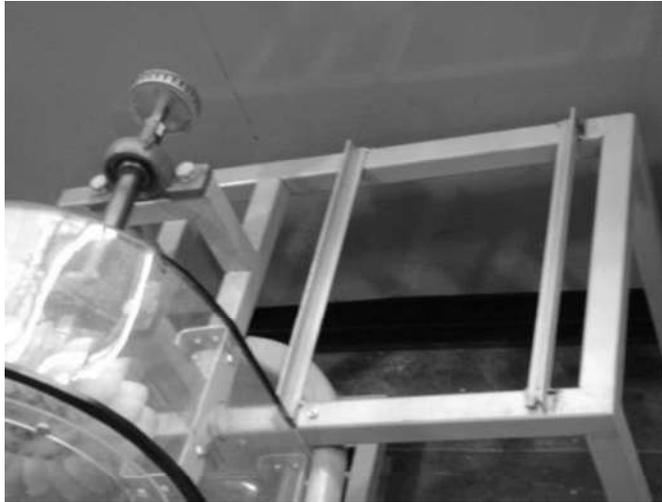


Figura 4.2 Rieles para equipo de medición y generación.

La figura 4.1 a muestra al armazón metálico donde será montada la turbina y el equipo adicional para realizar pruebas, en la Figura 4.1 (b) se puede observar el montaje de la bomba centrífuga que será utilizada para alimentar el rodete de la turbina, dicha bomba será a su vez acoplada a un motor de C.D para poder controlar la velocidad del mismo.

Para montar lo equipos disponibles en el laboratorio de ingeniería eléctrica se colocaron rieles que aseguran las máquinas para que no tengan movimiento y se pueda colocar la banda y transmitir el par de la flecha de la turbina a la máquina en cuestión, la Figura 4.2 nos muestra los rieles mencionados mientras que en la Figura 4.3 está colocado un electrodinamómetro montado sobre los rieles.

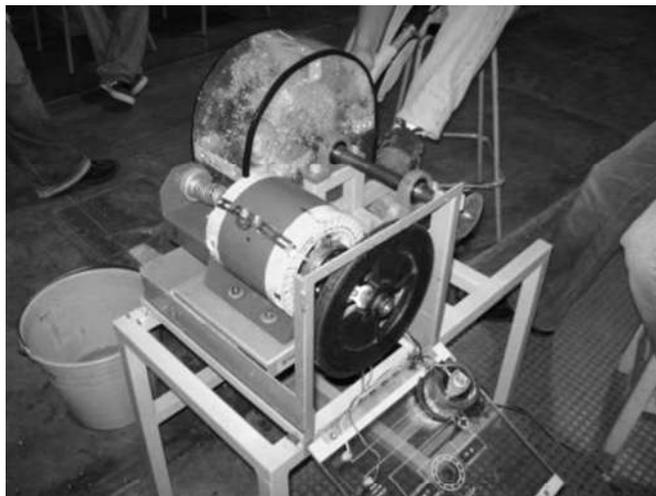


Figura 4.3 Electrodinamómetro montado en los rieles.

4.2 Acoplamiento de motor de C.D y bomba centrífuga

El acoplamiento de la bomba centrífuga y el motor de C.D fue originalmente realizado mediante un buje de acero. Después de realizar pruebas para comprobar el buen funcionamiento de la bomba se observó que el equipo vibraba en exceso ya que la alineación de la flecha del motor y la bomba es muy delicada y no se pudo realizar de la manera correcta mediante el uso de un acoplamiento rígido de tal manera que se optó por reemplazar el mismo por otro que absorbiera las vibraciones debidas al des-alineamiento de las flechas. Finalmente, se acoplaron los dispositivos utilizando manguera de alta presión para sistemas hidráulicos, de esta manera se eliminaron las vibraciones y se obtuvo un mejor funcionamiento de la bomba y el motor. La Figura 4.4 muestra el detalle del acoplamiento, el buje primeramente usado como acoplamiento entre el motor y la bomba fue cortado por la mitad y utilizado para solventar la diferencia de diámetros entre la flecha de la bomba y el motor pudiendo así ser utilizada la manguera de alta presión como conexión entre flechas.

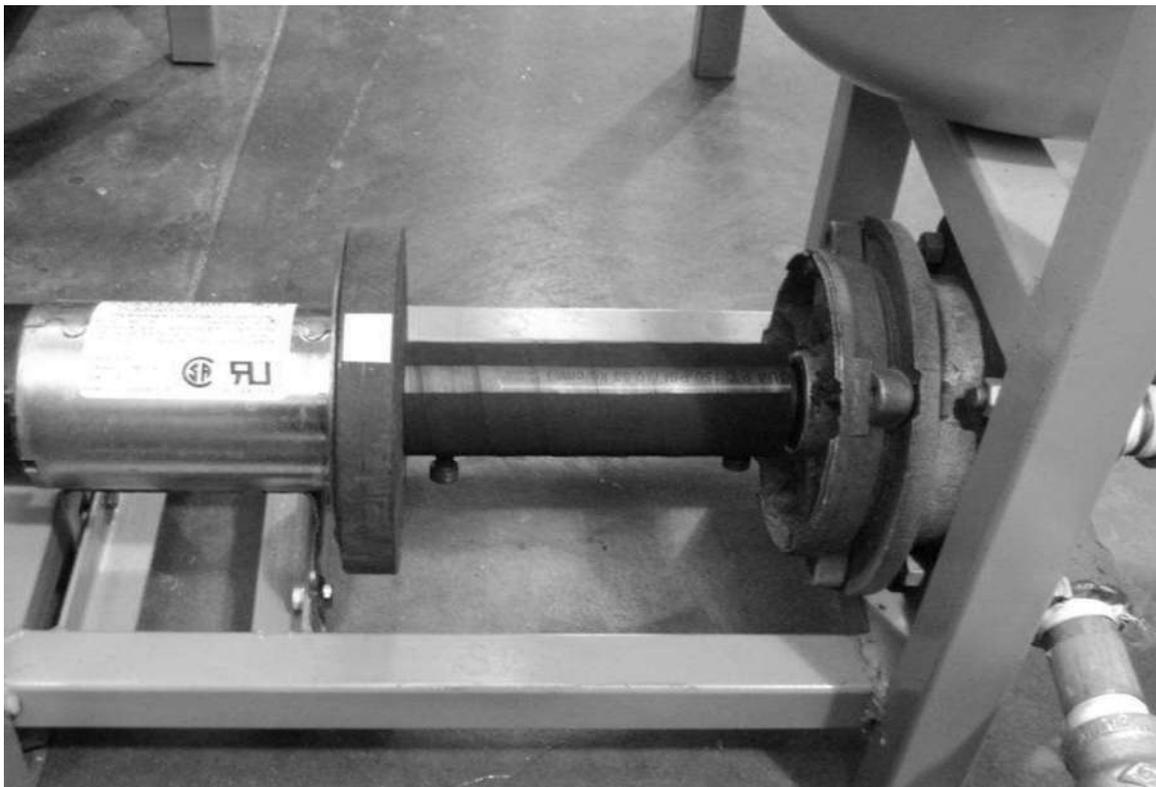


Figura 4.4. Acoplamiento del motor de C.D y la bomba centrífuga.

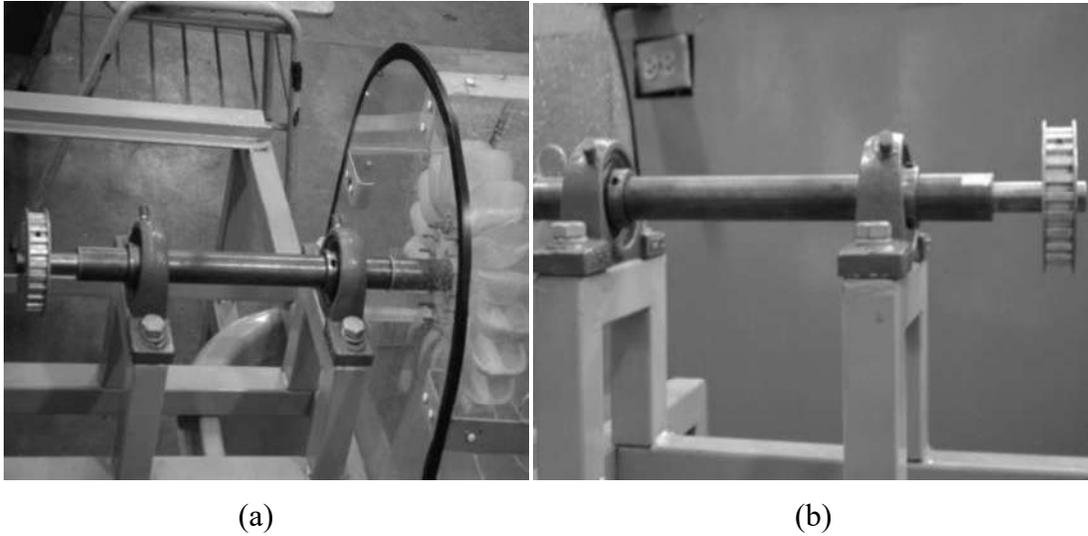


Figura 4.5. Montaje de la turbina.

4.3 Sistema de transmisión de par

La Figura 4.5 muestra como el montaje de la turbina se hizo utilizando chumaceras de una pulgada de diámetro que reciben la flecha que en ambos extremos está maquinada para poder ser insertada en el centro de la turbina y la polea cuyos orificios tienen una medida de tres cuartos de pulgada. En la Figura 4.6 se puede ver uno de los extremos de la flecha, en este caso es el extremo que soporta el rodete, se puede observar claramente el orificio donde entra el tornillo que fijará la turbina así como la cuña que evita que el rodete de deslice sin transferir el par a la flecha.



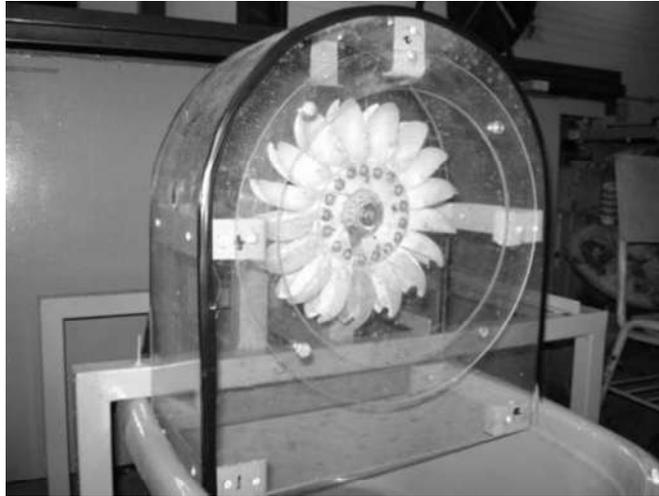


Figura 4.7 Confinamiento de la turbina.

4.4 Confinamiento de la turbina

La turbina se encuentra alojada dentro de una caja elaborada en material acrílico de tal manera que al ser este transparente se pueda observar el funcionamiento al realizar la alimentación hidráulica, esto permitirá observar detalles de mal funcionamiento que pudieran ser corregidos posteriormente.

En la parte frontal de la caja que aloja el rodete se cortó un círculo que permite retirar la turbina de manera sencilla, este espacio es cubierto con una tapa también de acrílico como se muestra en la Figura 4.7 misma que se encuentra atornillada a la caja para confinar el agua a este espacio.

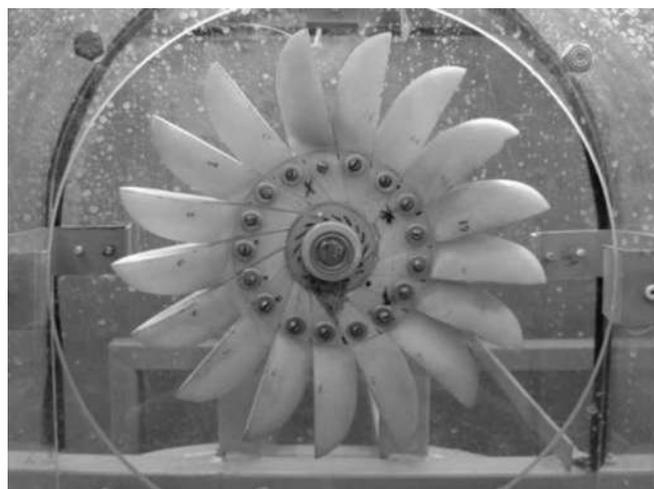


Figura 4.8 Rodete sujetado a la flecha.

4.5 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 4.9 se puede ver la manera en que está conformado el equipo de bombeo y cómo se conecta con 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.

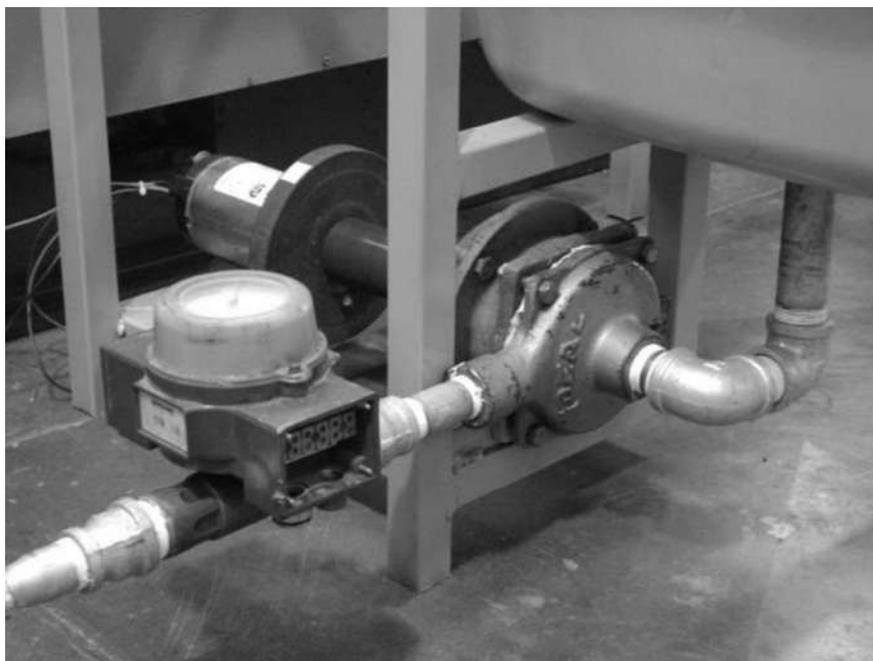


Figura 4.9 Sistema de bombeo.

4.6 Parámetros del sistema de bombeo

El sistema de bombeo cuenta con caudalímetro para realizar las mediciones del caudal más 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 y la potencia hidráulica que la bomba entrega a la turbina, estos datos serán muy importantes para la determinación de la eficiencia de la turbina cuando se realicen las pruebas de generación.

4.6.1 Caudal de la bomba centrífuga

El caudal es la cantidad de fluido o volumen del mismo que avanza por unidad de tiempo [5], la siguiente fórmula lo expresa más adecuadamente.

$$Q = A v \quad (4.1)$$

Donde,

Q es el caudal entregado por la bomba.

A es el área del chorro del inyector.

v es la velocidad lineal del fluido.

Para determinar el caudal que la bomba entrega a la turbina en función del voltaje entregado al motor de CD que la impulsa se realizaron varias mediciones. Las mediciones consistieron en llenar un recipiente de 40 litros con diferentes voltajes aplicados al primomotor de la bomba cronometrando el tiempo que éste tarda en ser llenado. De las distintas mediciones realizadas se obtuvo como resultado la tabla 4.1. 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 litros. Con estos datos es posible ahora obtener el caudal proporcionado a la turbina dependiendo del voltaje aplicado al primomotor.

Tabla 4.1 Voltaje aplicado a la bomba y tiempos de llenado del recipiente de 40 litros.

Voltaje (v)	Tiempo (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

Otro parámetro que se tomó en cuenta al igual que el voltaje para hacer una comparación más del caudal aportado por la bomba fueron las revoluciones a las que giraba esta así se tendrán dos puntos de referencia y obtener una aproximación más cercana del caudal entregado a la turbina. La tabla 4.2 muestra las revoluciones de la bomba y tiempos de llenado del recipiente utilizado en la medición.

Tabla 4.2 Revoluciones de la bomba centrífuga y tiempos de llenado.

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

Una vez determinado el tiempo que el recipiente tarda 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.

Tabla 4.3 Caudales

Voltaje	r.p.m	L/s	m3/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	0.000824736
56	2747	1	0.001
57	2770	1.044361111	0.001044361
64	3140	1.25	0.00125
70	3300	1.428333333	0.001428333

4.6.2 Potencia entregada por el sistema de bombeo.

La potencia hidráulica se calcula mediante la fórmula siguiente.

$$Ph = \rho Q gH \quad (4.2)$$

Donde

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

ρ es la densidad del agua que es igual a 1000 [kg/m³]

Q es el caudal [m³/s]

g es la gravedad = 9.81 [m/s²]

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

$$v = \sqrt{2gh} \quad (4.3)$$

Despejando de la ecuación anterior h obtenemos

$$h = \frac{v^2}{2g} \quad (4.4)$$

Así, se genera la tabla 4.4 donde se muestran los distintos valores de altura simulada por el equipo de bombeo dependiendo de las revoluciones de la bomba.

Tabla 4.4 Altura simulada por la bomba en metros.

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

Ya que se ha obtenido la altura se puede regresar a la fórmula (4.2) que nos da la potencia hidráulica, sustituyendo en esta los datos obtenidos de la tabla anterior se obtiene una nueva lista de la potencia hidráulica entregada a la turbina dependiendo de la velocidad de giro de la bomba centrífuga.

Tabla 4.5 Potencia hidráulica entregada a la turbina.

r.p.m	Potencia W
1240	0.09040591
1721	0.95474498
2147	3.77070984
2570	7.87786403
2747	14.0431149
2770	15.996152
3140	27.4279588
3300	40.9215583

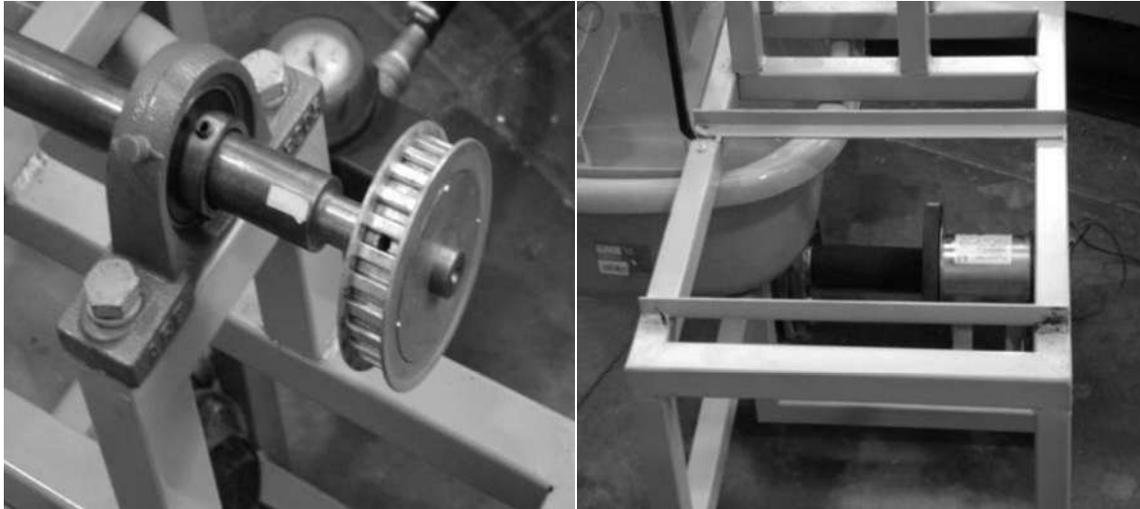


Figura 4.10 Polea dentada y rieles.

4.7 Prueba del sistema de generación

Las pruebas de generación se realizarán utilizando una máquina de corriente directa del laboratorio de ingeniería eléctrica, el acoplamiento será mediante el uso de 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 CD a un costado de la flecha de la turbina. La Figura 4.10 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 las que se usa en las distintas máquinas del laboratorio, todos estos detalles permitirán un montaje sencillo y rápido del equipo para realizar las pruebas.

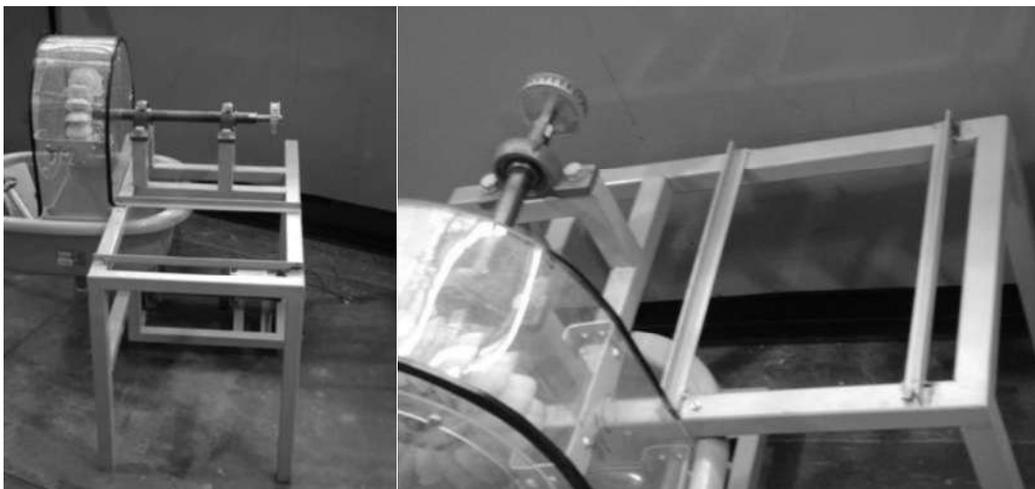


Figura 4.11 Vista general de rieles y polea

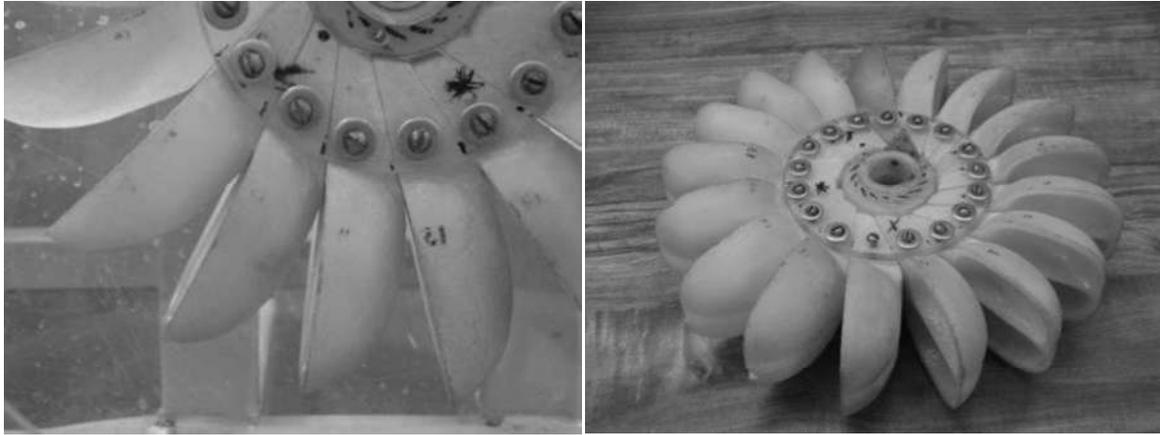


Figura 4.12 Rodete Pelton, cucharas sin corte en sus aristas.

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 las cucharas, estas aún no contaban con el corte característico de las cucharas en la arista, todas tenían la forma que se muestra en la Figura 4.12. Teniendo esta forma los álabes se observó que el chorro impactaba de una manera inadecuada la cuchara a la que se dirigía y no entraba suavemente a la siguiente perdiéndose la fuerza del chorro en esta parte de la cuchara sin el corte. Habiendo observado lo anterior se procedió a modificar los álabes, en la Figura 4.13 se puede observar ahora el corte que se hizo en cada uno de las cucharas.

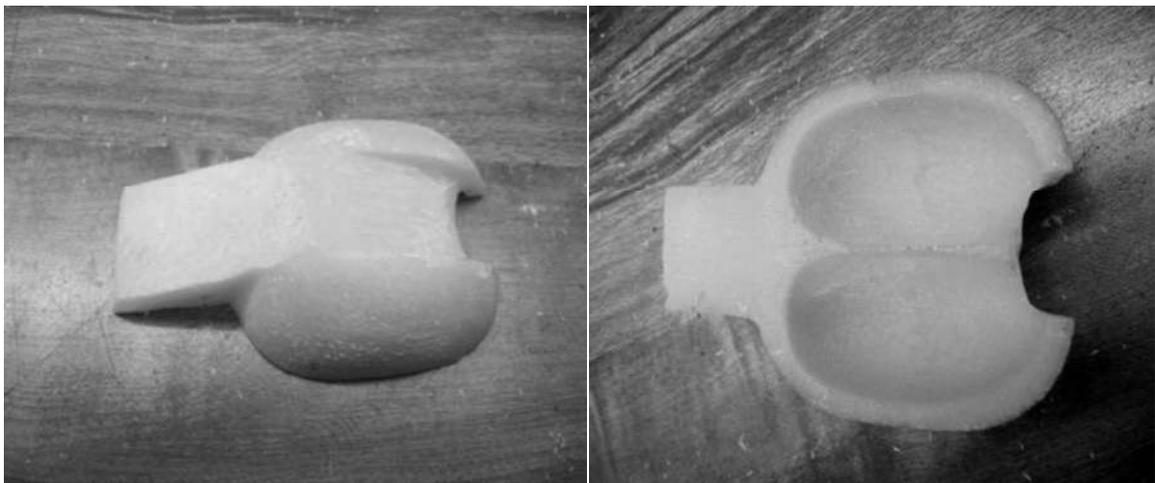


Figura 4.13 Corte anterior y posterior de la cuchara.

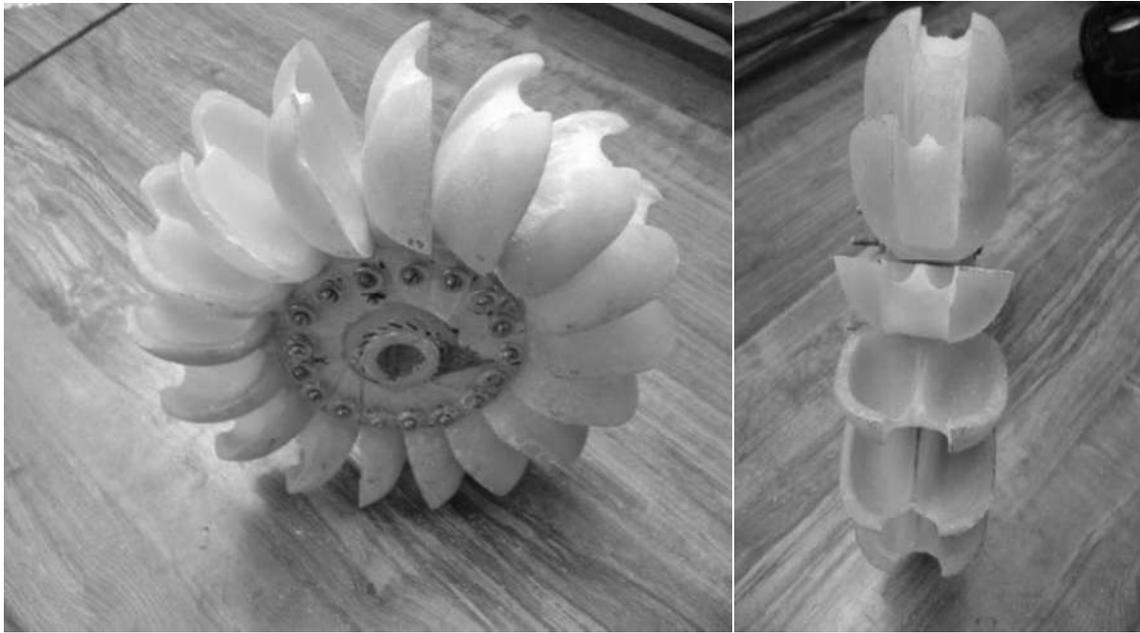


Fig. 4.14 Rodete con cortes.

Una vez terminados los cortes se procedió al armado del rodete que ahora se ve como en la Figura 4.14 se vuelve a montar el rodete en el confinamiento de acrílico para realizar pruebas nuevamente con la bomba y observar que efecto tuvo el corte de los álabes en comportamiento del chorro al impactar la turbina. En la Figura 4.15 se puede observar la turbina ya montada.

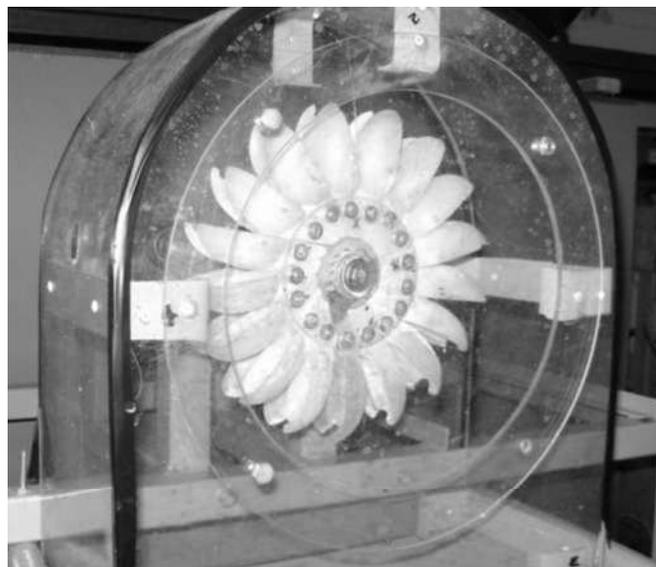


Figura 4.15 Turbina confinada.

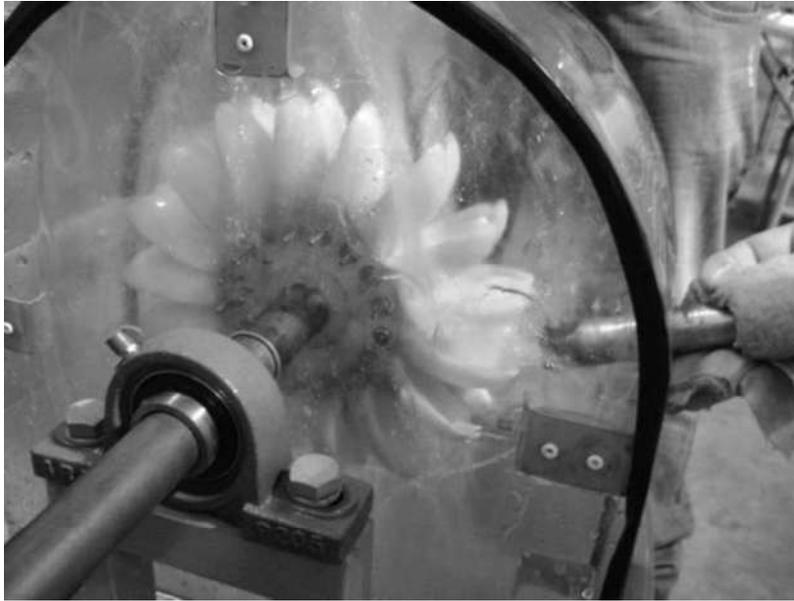


Figura 4.16 Chorro incidiendo en uno de los álabes de la turbina.

Al realizar nuevamente las pruebas con la bomba se observó que el chorro ahora incidía de una manera más adecuada a la observada cuando la turbina no contaba con los cortes realizados en las cucharas, la Figura 4.16 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 cómo es que el corte anterior mostrado en la Figura 4.13 permite que el chorro entre de una manera suave en la cuchara siguiente a la que impacta en el momento.

4.7.1 Generación de energía eléctrica

Para la generación de energía eléctrica se está utilizando el esquema de la máquina de CD como generador en conexión compuesta larga como se muestra en la Figura 4.17. Esta configuración permite que la máquina se autoexcite utilizando el remanente magnético existente en la máquina no siendo necesario excitarla mediante una fuente externa.

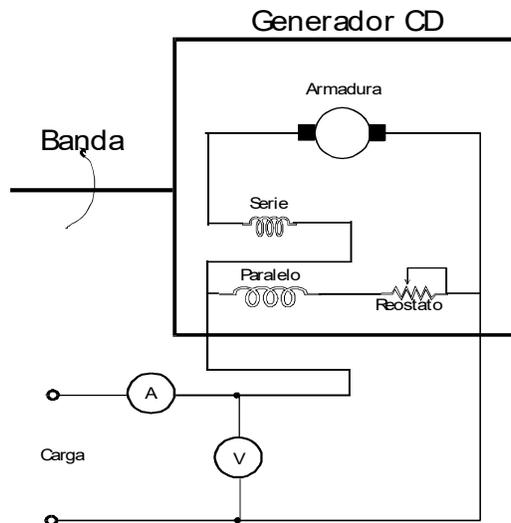


Figura 4.17 Conexión de la máquina de CD como generador.

En la Figura 4.18 se muestra físicamente la máquina y sus conexiones, esta es la configuración que estará siendo utilizada para las pruebas, se optó por realizar mediciones del voltaje generado en terminales de la armadura acoplando otra máquina de CD como primomotor así se obtendrá una tabla de distintos voltajes obtenidos en función de las rpm entregadas por el primomotor, estas mediciones podrán ser comparadas con los voltajes que se obtendrán al acoplar la turbina al generador de CD.

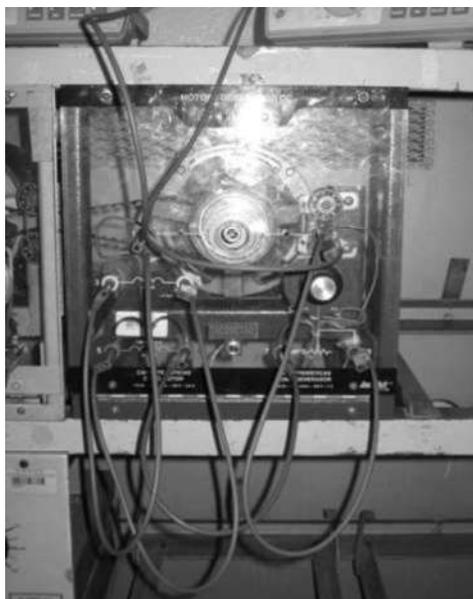


Figura 4.18. Conexiones físicas

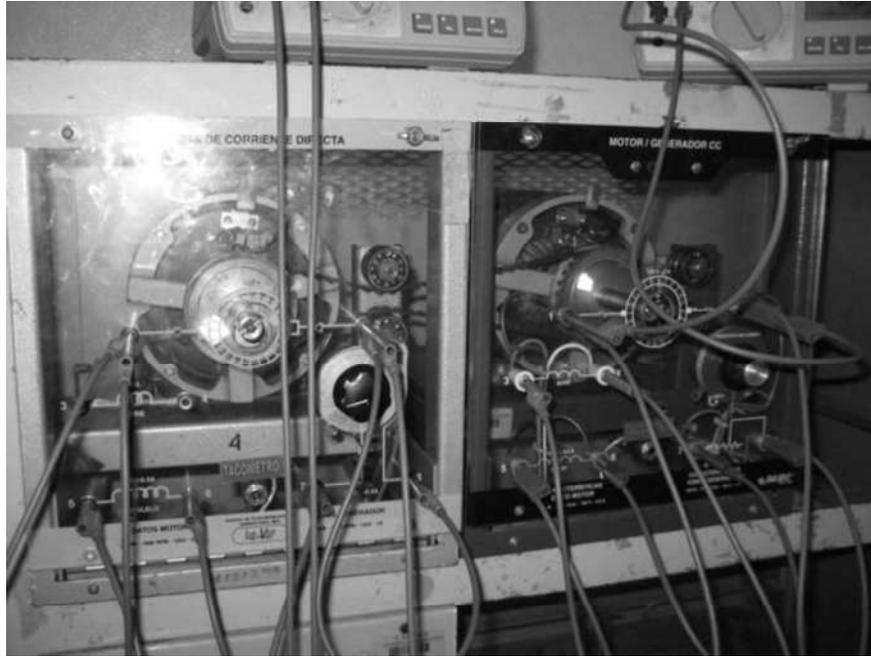


Figura 4.19 Acoplamiento de las maquinas de CD.

De las mediciones hechas se obtuvo la tabla 4.6 para distintos valores de rpm utilizando la máquina de CD como motor en conexión paralela variando la velocidad de acuerdo al voltaje suministrado a esta. La Figura 4.20 muestra la gráfica de los valores de voltaje así como la tendencia que tiene utilizando una ecuación polinómica.

Tabla 4.6 rpm y voltajes.

rpm	voltage	rpm	voltaje
419	3.3	1010	36.9
508	4.4	1050	52.8
556	5.03	1060	55
680	7.4	1070	59
830	10.6	1088	64.6
904	15.8	1106	67
856	14.28	1133	75.2
912	15.9	1162	78
956	18	1203	85
960	30	1266	93.7
993	32	1307	99.4
999	33.3	1368	106.9
		1426	114

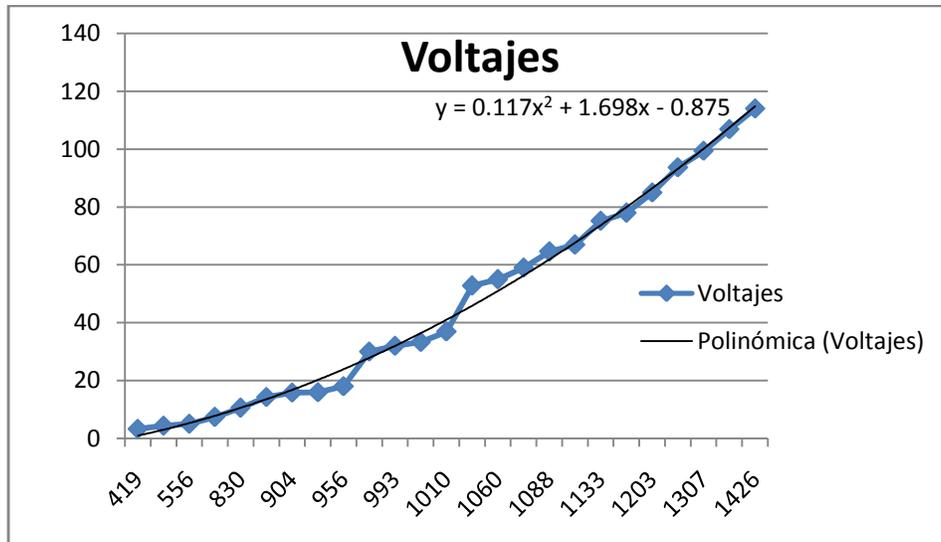


Figura 4.20. Voltajes y tendencia polinómica.

4.7.2 Mediciones de voltaje generado utilizando la turbina Pelton.

La Figura 4.21 ilustra el acoplamiento de la turbina y el generador utilizando la banda, se ve también la conexión del generador autoexcitado. En la Figura 4.22 se ve la turbina en operación mientras se tomaban los datos. La medición de voltajes se obtuvo de la armadura del generador obteniendo los datos organizados en la tabla 4.7.

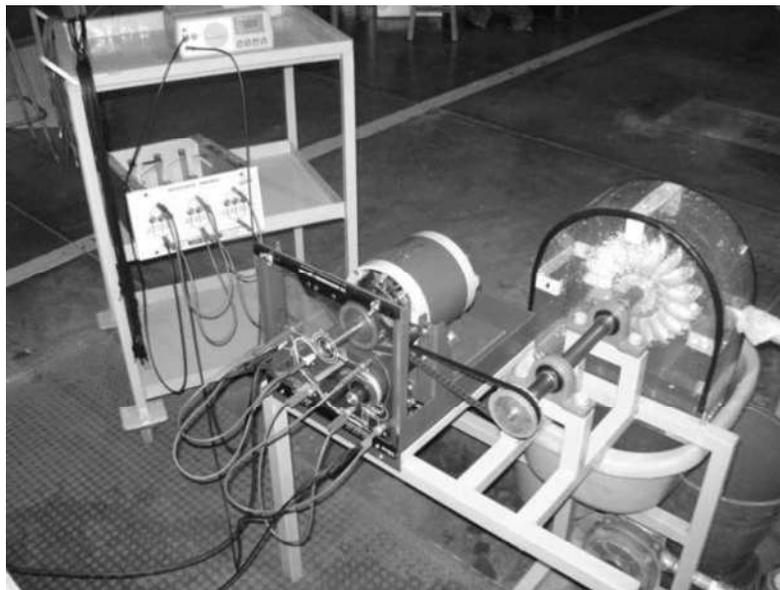


Figura 4.21. Turbina y generador de CD acoplados.

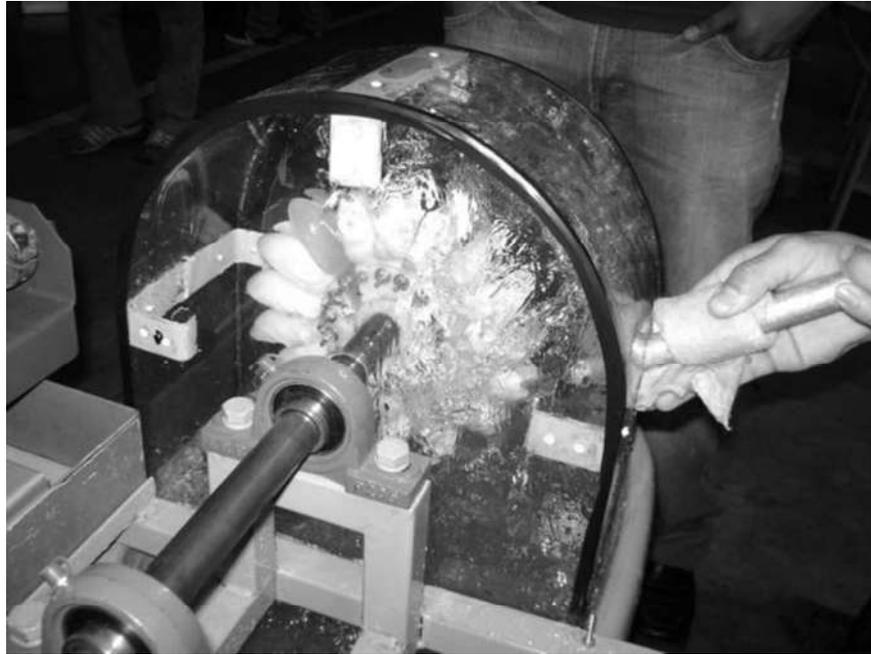


Figura 4.22. Turbina en operación.

Los voltajes obtenidos muestran la misma tendencia que los voltajes medidos utilizando como primomotor una máquina de CD, las mediciones sólo pudieron realizarse hasta las 848 rpm, este límite fue impuesto por la capacidad de corriente de la fuente que alimenta la bomba no pudiendo llevar a su límite la bomba centrífuga y aumentar el caudal del inyector para producir un voltaje mayor. De igual manera que para la tabla 4.6 se graficó y agregó una línea de tendencia para poder observar con más detalle el comportamiento del voltaje generado, esto es mostrado en la Figura 4.23.

Tabla 4.7 Revoluciones y voltaje obtenido en el generador.

rpm	voltage
447	3.2
590	4.76
666	6.23
800	8.3
848	10

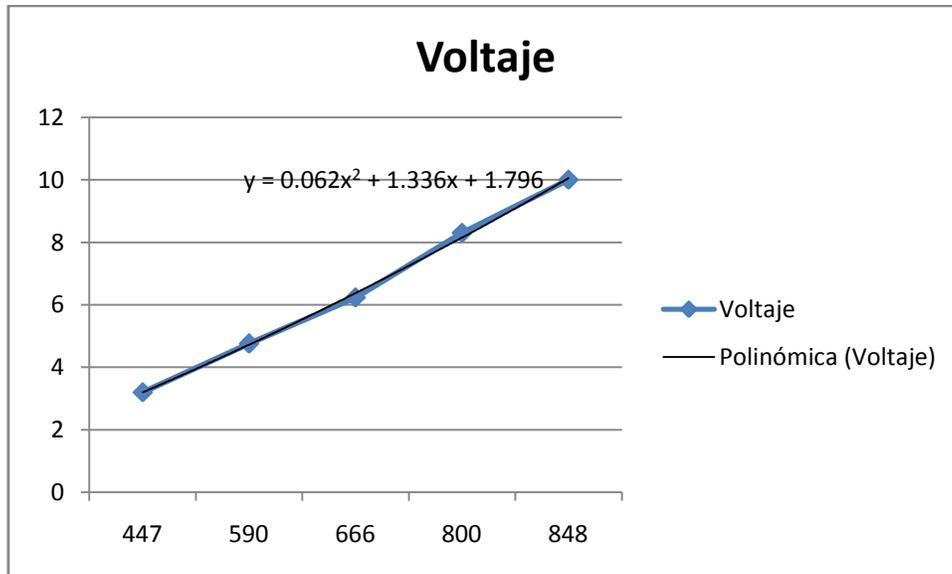


Figura 4.23. Voltajes utilizando la turbina como primomotor.

Los voltajes medidos muestran una tendencia similar a las mediciones obtenidas utilizando el motor de CD como fuente de energía mecánica para impulsar el generador de CD, esto se puede observar comparando los datos de las Tablas 4.6 y 4.7. Esto nos muestra que la turbina se está comportando de una manera adecuada, si no igual al primomotor de CD, muy cercana ya que se obtienen voltajes similares para velocidades de giro equivalentes.

Capítulo 5

Conclusiones y recomendaciones

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

5.1 Conclusiones

En este trabajo de tesis se logró implementar el diseño y construcción de un pequeño sistema de generación de energía eléctrica basado en una micro turbina Pelton la cual fue diseñada y construida de acuerdo a los cálculos usados para construir turbinas Pelton utilizadas en la generación de energía eléctrica a mediana y gran escala.

Se construyó un sistema de bombeo para proporcionar un caudal a la turbina, de esta manera se realizaron pruebas para verificar que el diseño del rodete así como de los álabes permitieran el desplazamiento adecuado del fluido al incidir en las cucharas, en las primeras pruebas se observó que el chorro no incidía como se esperaba desplazándose inadecuadamente en los álabes, habiendo observado esto se procedió a la modificación de las cucharas obteniendo como resultado un desplazamiento más suave del chorro y por lo tanto una mejor eficiencia de la turbina.

En las pruebas de generación se obtuvieron resultados satisfactorios que muestran que se puede producir un voltaje cercano al que sería obtenido utilizando otra fuente de energía mecánica para impulsar el generador de CD, el comportamiento que se obtuvo al generar voltaje muestra también que, aunque se tuvieron límites en el equipo de bombeo, dicho voltaje puede ser mayor alimentando la turbina con un equipo de bombeo de mayor capacidad.

El equipo fabricado, como es el armazón que sostiene el sistema de bombeo, las chumaceras, flecha, confinamiento de la turbina y rieles para montar el generador de CD tuvo un buen desempeño en su tarea, permitiendo realizar las pruebas fácilmente.

5.2 Recomendaciones

Para la obtención de un voltaje mayor generado por la máquina de CD, el motor del sistema de bombeo pudiera ser reemplazado por un motor de CA alimentado mediante el uso de un inversor pudiendo de esta manera controlar la frecuencia y por ende la velocidad de giro de la bomba. Debido a las características del motor de CA y su fuente se puede obtener un mejor funcionamiento de la bomba entregando un mayor caudal a la micro turbina Pelton.

El incremento en el caudal implica un esfuerzo mayor al que se encontraría sometida la turbina y por ello surge la posibilidad de que los álabes sufran un deterioro mayor para las pruebas, para encarar esta posibilidad se recomendaría construir un rodete Pelton en algún metal como pudiera ser aluminio o bronce, estos metales son trabajados comúnmente para realizar fundiciones. El hecho de tener la turbina ya fabricada en resina facilitaría el proceso de fundición ya que se tomaría alguno de los álabes como modelo para obtener un molde y realizar la fundición en metal.

Referencias

- [1] Claudio Mataix, Turbomáquinas Hidráulicas, Madrid España: ICAI, 1978.
- [2] Robert Resnick y David Halliday, Física vol. 2, México: CECSA, 2005.
- [3] Robert L. Boylestad, Introducción al análisis de circuitos, México: Prentice Hall México, 204.
- [4] Arthur E. Fitzgerald, Máquinas Eléctricas, México: McGraw-Hill, 2004.
- [5] Claudio Mataix, Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas, México: Alfaomega Grupo Editor, 2006.