



### **TÍTULO DEL TRABAJO DE GRADO**

IMPLEMENTAR UN BANCO DE PRUEBAS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA A TRAVÉS  
DE UNA TURBINA DE PELTON PARA LAS UNIDADES TECNOLÓGICAS DE  
SANTANDER REGIONAL BARRANCABERMEJA.

### **AUTORES**

JOSE ALVARO CUADRADO MAYORAL  
JUAN GABRIEL FERREIRA VILLABONA  
CLIMACO GARCIA NAVARRO  
JOSE GREGORIO JIMENEZ NUÑEZ

**UNIDADES TECNOLÓGICAS DE SANTANDER**  
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERIAS  
OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO ELECTROMECHANICO  
BARRANCABERMEJA

FECHA DE PRESENTACIÓN: 03-05-2016



**TÍTULO DEL TRABAJO DE GRADO**

Implementar un banco de pruebas de generación eléctrica a través de una turbina de Pelton para las Unidades Tecnológicas de Santander Regional BARRANCABERMEJA.

**AUTORES**

JOSE ALVARO CUADRADO MAYORAL  
JUAN GABRIEL FERREIRA VILLABONA  
CLIMACO GARCIA NAVARRO  
JOSE GREGORIO JIMENEZ NUÑEZ

**Trabajo de Grado para optar al título de**  
Tecnólogo en operación y mantenimiento electromecánico

**DIRECTOR**

Ingeniero. Luis Omar Sarmiento

**GRUPO DE INVESTIGACIÓN – DIANOOIA.**

**UNIDADES TECNOLÓGICAS DE SANTANDER**  
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERIAS  
OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO ELECTROMECHANICO  
BARRANCABERMEJA  
FECHA DE PRESENTACIÓN: 03-05-2016

Nota de Aceptación

Trabajo de grado titulado: IMPLEMENTAR UN BANCO DE PRUEBAS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA A TRAVÉS DE UNA TURBINA DE PELTON PARA LAS UNIDADES TECNOLÓGICAS DE SANTANDER REGIONAL BARRANCABERMEJA.

Presentado por: JOSE ALVARO CUADRADO MAYORAL, JUAN GABRIEL FERREIRA VILLABONA, CLIMACO GARCIA NAVARRO, JOSE GREGORIO JIMENEZ NUÑEZ

---

Firma del jurado

---

Firma del Jurado

## **DEDICATORIA**

Dedico este proyecto a Dios en primer lugar, por guiar mis pasos hacia un mejor futuro cada día; a mis padres por ser los pilares de mi vida en todas las circunstancias vividas; a mi familia por brindarme el apoyo necesario para realizar las metas que me he propuesto.

**JOSE ALVARO CUADRADO MAYORAL**

A la misericordia de Dios que me ha dado la sabiduría y fortaleza para terminar este proyecto de investigación; a mis padres por su amor incondicional y apoyarme en cada decisión positiva que tomo para mi vida; agradezco también a quienes a lo largo de este camino han puesto un grano de esfuerzo para que este proyecto se materializara.

**JUAN GABRIEL FERREIRA VILLAVONA**

Agradezco principalmente a Dios por todo lo bueno que ha sido conmigo; a mis padres, que con todo su amor y esfuerzo hacen posible este logro en mi vida; a familiares y amigos quienes de una u otra manera aportaron elementos importantes en el desarrollo de etapa de mi formación profesional.

**CLIMACO GARCIA NAVARRO**

A Dios dedico este gran logro, a mis padres por su apoyo, consejos, comprensión, amor y ayuda en todo momento; gracias a ellos por formar en mí un hombre de carácter, responsable y dedicado, con valores y con la convicción de hacer las cosas de la mejor manera en pro del bienestar propio y de los demás.

**JOSE GREGORIO JIMENEZ NUÑEZ**

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecemos primordialmente a Dios por bendecirnos para llegar a hacer posible este sueño tan anhelado.

A la las Unidades Tecnológicas de Santander y a nuestros profesores, por brindarnos los conocimientos y los espacios necesarios para formarnos de la mejor manera como profesionales.

A nuestro asesor de grado el INGENIERO LUIS OMAR SARMIENTO por su esfuerzo, preocupación y dedicación constante, pues con sus conocimientos y experiencia, logró guiarnos para darle a este proyecto buen término.

## TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN EJECUTIVO .....	14
INTRODUCCIÓN .....	16
1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN .....	17
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	17
1.2. JUSTIFICACIÓN .....	19
1.3. OBJETIVOS .....	20
1.3.1. objetivo general .....	20
1.3.2. objetivos específicos .....	20
1.4. ESTADO DEL ARTE / ANTECEDENTES .....	21
2. MARCOS REFERENCIALES .....	30
2.1. MARCO TEÓRICO .....	30
2.2. MARCO CONCEPTUAL .....	36
2.2.1. Turbinas hidráulicas .....	36
2.2.2. Clasificación .....	36
2.2.3. Utilización de las turbinas hidráulicas .....	38
2.2.4. Funcionamientos de una bomba centrífuga como turbina centripetra .....	39
2.2.5. Aplicación de una turbina para medidor de flujo .....	40
2.2.6. Turbina Pelton .....	41
2.2.7. Las turbinas pelton son: .....	41
2.2.8. Componentes .....	41
2.2.8.1 Distribuidor .....	42
2.2.8.2 Sistema de regulación .....	43
2.2.8.3 Cámara de distribución .....	43
2.2.8.4 Inyector .....	43
2.2.8.5 Rodete .....	47
2.2.8.6 Eje .....	48
2.2.8.7 Sistema de frenado .....	48
2.2.8.8 Carcasa .....	48
2.2.8.9 Cámara de descarga .....	48

2.2.8.10	Blindaje y destructor de energía.....	49
2.2.8.11	Funcionamiento de una turbina Pelton.....	49
2.2.8.12	Descripción de fluido.....	53
2.2.8.13	Propiedades de los fluidos.....	53
2.2.8.14	Tipos de flujos.....	55
2.2.9.	Medidores de caudal.....	56
2.2.9.1	Clasificación de las tecnologías de medición.....	57
2.2.9.2	Ecuación de continuidad.....	58
2.3.	MARCO HISTÓRICO.....	60
2.4.	MARCO LEGAL.....	64
2.4.1.	Sistemas de energías alternativas en Colombia bajo la ley 1715. ....	64
2.4.1.1	Ley 1715 del 13 de mayo de 2014, integración de energías renovables no convencionales al sistema energético nacional. ....	64
2.5.	MARCO AMBIENTAL.....	66
2.5.1.	Normas técnicas ambientales en Puertos- Acuerdo ministerial 155-2007	66
2.5.1.1	Norma para la prevención y control de la contaminación ambiental del recurso agua en centrales termoeléctricas.....	66
2.5.1.2	Normas para el manejo de las descargas de aguas residuales provenientes de la generación de energía. ....	67
3.	DESARROLLO DEL TRABAJO DE GRADO.....	69
3.1.1.	Bloque 1. Electrobomba.....	69
3.1.2.	Bloque 2. Instrumentos de medición de presión.....	72
3.1.3.	Bloque 3. Construcción Turbina.....	74
3.1.4.	Adecuación y características del generador.....	78
3.1.4.1	Cálculos del sistema.....	80
3.1.5.	Paso 5. Dispositivos de carga.....	84
3.1.6.	Paso 6. Instrumentos de medición amperímetro y voltímetro análogo.....	86
4.	RESULTADOS.....	90
5.	CONCLUSIONES.....	97
6.	RECOMENDACIONES.....	98
7.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	100
8.	ANEXOS.....	102

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
<b>Figura 1.</b> Inyector y chorro de una turbina Pelton	43
<b>Figura 2.</b> Perfiles de velocidades de una turbina Pelton cerca y lejos del inyector	44
<b>Figura 3.</b> Triángulo de entrada.	48
<b>Figura 4.</b> Triángulos de salida.	49
<b>Figura 5.</b> Entradas y salidas	49
<b>Figura 6.</b> Ecuación de continuidad	58
<b>Figura 7.</b> Diagrama de bloques turbina de Pelton	68
<b>Figura 8.</b> Electrobomba	69
<b>Figura 9.</b> Mesa de la turbina Pelton	70
<b>Figura 10.</b> Manómetro	71
<b>Figura 11.</b> Alabes ensamblados dentro de la caja de almacenamiento del agua	73
<b>Figura 12.</b> Rodete	75
<b>Figura 13.</b> Rodete lento	76
<b>Figura 14.</b> Rodete rápido.	76
<b>Figura 15.</b> Generador.	77
<b>Figura 16.</b> Elementos eléctricos	82

<b>Figura 17.</b> Prueba de encendido leds	83
<b>Figura 18.</b> Voltímetro y amperímetro análogos	84
<b>Figura 19.</b> Amperímetro analógico	85
<b>Figura 20.</b> Voltímetro analógico.	86
<b>Figura 21.</b> Vista lateral izquierda	93
<b>Figura 22.</b> Vista frontal turbina terminada	93
<b>Figura 23.</b> Turbina Pelton	94
<b>Figura 24.</b> Conexiones del cableado eléctrico	94

**LISTA DE TABLAS**

	pág.
<b>Tabla 1.</b> Clases de turbinas.	38
<b>Tabla 2.</b> Datos nominales de la electrobomba.	69
<b>Tabla 3.</b> Datos nominales manómetro	72
<b>Tabla 4.</b> Descripción manómetro	72
<b>Tabla 5.</b> Datos del Rodete	74
<b>Tabla 6.</b> Datos del generador	78
<b>Tabla 7.</b> Características amperímetro análogo	86
<b>Tabla 8.</b> Características amperímetro análogo	87
<b>Tabla 9.</b> Datos obtenidos	88
<b>Tabla 10.</b> Datos arrojados en las resistencias de las bombillas	89
<b>Tabla 11.</b> Datos arrojados en la apertura, generador, bombillos	90
<b>Tabla 12.</b> Datos arrojados en la apertura, generador, ventiladores	91

## RESUMEN EJECUTIVO

En el presente informe se presenta para describir la construcción de un banco de generación de energía eléctrica a través de una turbina de Pelton para las unidades tecnológicas de Santander, en ella se desarrolla la recopilación de la información referente a los sistemas de generación de energía con turbina Pelton que permitan realizar el correcto diseño, el banco contiene una moto-bomba, la cual permite succionar y descargar el líquido para simular la caída del agua de una fuente natural como podría serlo una cascada, también se cuenta con un generador eléctrico que transforma esa energía mecánica en energía eléctrica, equipos de medida que controlan y permiten observar la cantidad de energía generada. En el documento se observan las pruebas necesarias que permiten obtener los datos de las variables que se estudiarán como los diferentes flujos, caudales, volumen, presión entre otros, se desarrolla también un manual práctico que permite llevar el paso a paso de la construcción de la turbina, como también la explicación y descripción de cada accesorio. La metodología se basa en recopilar la documentación estrictamente necesaria y eficaz para un buen funcionamiento, teniendo en cuenta el tipo de procedimientos, procesos de diseño y etapas de trabajo. El presente banco de prueba permitirá realizar diferentes tipos de prácticas de laboratorios referentes a todo aquello en donde intervienen los procesos de generación de energía, contara con un diseño innovador ajustado a las necesidades del estudiante y a los requisitos de la universidad, su estructura estará conformada por un motor de 0.75 hp, un generador de 100 v.d.c, sistema de poleas clásicas y sistemas de potencia entre otros, los cuales permitirán de una manera didáctica observar sus diferentes funciones y características.

**PALABRAS CLAVE.** Turbina Pelton, generador, motor, caudal, carga, polea.

## EXECUTIVE SUMMARY

This report is presented to describe the construction of a bank of power generation through a turbine Pelton for technological units of Santander, in her collection of information relating to systems power generation it develops Pelton turbine that allow for the correct design, the bank contains a motor-pump, which can suck and discharge the liquid to simulate falling water from a natural source as it could be a waterfall, also has an electric generator that transforms this mechanical energy into electrical energy, measurement equipment and allow us to observe that control the amount of energy generated. In the document the necessary tests to obtain data of the variables studied how different flows, flow, volume, pressure etc. are observed, also it develops a practical manual that allows to take the step by step construction of the turbine, as well as the explanation and description of each accessory. The methodology is based on gathering documentation strictly necessary and effective for smooth operation, taking into account the type of procedures, processes and design work stages. This test bench to perform different types of laboratory practices concerning all that in which the processes of energy generation involved, will feature a tight innovative design to the student's needs and the requirements of the university, its structure will consist of 0.75 hp engine, a generator 100 VDC, classical system pulleys and power systems among others, which allow a didactic observe their different functions and features.

**KEYWORDS.** Pelton turbine, generator, motor, flow, load pulley.

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad las unidades tecnológicas de Santander sede Barrancabermeja depende su consumo eléctrico de fuentes externas a la universidad, como lo es la energía generada por las hidroeléctrica. Los bancos con los que se cuentan en la sede en su mayoría realizan pruebas, ensayos y requieren del consumo eléctrico para realizar sus debidos procesos, pero no se tiene un banco que permita generar energía eléctrica limpia a través de un proceso como lo es la hidroelectricidad, que por medio de la acción del agua aplicada a una determinada altura y velocidad de caída permite generar movimiento a una turbina que se encuentra ubicada en la parte inferior, la turbina con la acción del agua genera energía mecánica, la cual permite por medio de una banda o correa crear movimiento de giro en una polea conectada a un generador quien es el encargado de convertir esa energía mecánica en energía eléctrica y entregarla a los diferentes componentes eléctricos que son accionados con el presente suministro de energía eléctrica, entre los cuales están bombillos leds, ventiladores, bombillos de uso doméstico entre otros.

Para el correcto desarrollo del proyecto se emplea una investigación descriptiva, con un enfoque deductivo, permitiendo a los investigadores, tomar como punto de partida un fenómeno en general como lo es la acción del agua, para llegar a una aplicación particular la cual es la generación de energía eléctrica por medio de una turbina de Pelton.

## 1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

### 1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Actualmente la fuente de energía eléctrica que abastece al país en su mayoría es generada por las hidroeléctricas, cada hidroeléctrica requiere la creación de un embalse que permita una gran acumulación de agua, sacrificando el medio ambiente, realizando inundaciones y arrasando con toda fuente de vida a su paso. Las sequias y la sobre explotación de los recursos naturales, evidencian la necesidad de innovar en la creación de nuevas fuentes de energía renovables, que sean amigables con el medio ambiente. Las Unidades Tecnológicas de Santander actualmente carecen de un laboratorio de generación de energía eléctrica que permita al estudiante, observar un modelo de generación de energía limpia que no requiere del uso de hidrocarburos ni del abuso hacia el medio ambiente para generar energía eléctrica, también permite realizar pruebas de mecánica de fluidos, control de variables, análisis eléctrico entre otros. La falta de bancos en la universidad que permita a los estudiantes de la tecnología y la ingeniería de mantenimiento electromecánico obtener energía renovable y realizar pruebas que permitan poner en práctica los conocimientos vistos en clase en las asignaturas de mecánica de fluidos, mediciones eléctricas, maquinas eléctricas, termodinámica, representan una disminución de información práctica para los estudiantes, debido a que solo se quedan con el conocimiento teórico y no ponen a prueba las enseñanzas que imparte el docente, no generan preguntas y las inquietudes y dudas aumentan sin ser resueltas.

Por tal motivo surge la siguiente pregunta problema, ¿En qué condiciones Implementar un banco de pruebas de generación eléctrica a través de una turbina

de Pelton para las Unidades Tecnológicas de Santander Regional  
Barrancabermeja?

## 1.2. JUSTIFICACIÓN

El proyecto presente permite la implementación de un banco de pruebas de generación eléctrica a través de una turbina de Pelton para las Unidades Tecnológicas de Santander Regional Barrancabermeja, que funciona por medio de la acción del agua en una altura determinada, al caer el agua choca contra las cucharas de una turbina creando movimiento en estas y transfiriendo la energía mecánica a un generador el cual produce la energía eléctrica. La turbina de Pelton se origina con el fin de innovar e implementar, una microcentral hidráulica para el estudio y análisis de las turbinas, donde los estudiantes puedan reforzar los conocimientos adquiridos en las asignaturas.

La implementación del banco permite realizar pruebas de laboratorio en tiempo real, las cuales consisten en el estudio de las variables y tipos de flujos que se observan en la mecánica de fluidos como lo son el caudal, volumen, presión, flujo laminar, turbulento, el estudio de las variables eléctricas como el voltaje, la intensidad, la potencia. La entrega del banco ayuda a fomentar la creación de un laboratorio de generación de energías limpias, que sea amigable con el medio ambiente, y ayude con el suministro eléctrico de la universidad.

Las partes beneficiadas en la entrega del proyecto es primeramente las Unidades Tecnológicas de Santander sede Barrancabermeja quien cuenta con un banco que permite generar energía eléctrica y el estudio de múltiples variables, los estudiantes de la universidad también se benefician en la práctica de los conocimientos recibidos en clase, esto les ayudara a tomar conciencia de que se debe fomentar el uso de energías limpias, como también aporta a su conocimiento individual.

### **1.3. OBJETIVOS**

#### **1.3.1. Objetivo general**

Implementar un banco de pruebas de generación eléctrica a través de una turbina de Pelton para las Unidades Tecnológicas de Santander Regional Barrancabermeja

#### **1.3.2. Objetivos específicos**

- Recopilar información referente a sistemas de generación de energía con turbina Pelton que permita el diseño del banco con sus respectivos elementos de medida.
- Construir el banco de pruebas de generación eléctrica que incluya una moto-bomba, un generador eléctrico y un equipo de medida.
- Realizar el manual de operación y de prácticas para los laboratorios de las Unidades Tecnológicas de Santander.
- Efectuar pruebas de verificación y funcionamiento mediante la medición de energía inyectada al sistema respecto a la energía generada.

#### 1.4. ESTADO DEL ARTE / ANTECEDENTES

Las investigaciones que a continuación se describen permiten orientar la investigación que se desea desarrollar en cuanto a la construcción, funcionamiento y pruebas que se pueden obtener mediante la turbina de Pelton, el cual es un prototipo hidroeléctrico que utiliza la acción del agua para que por medio de componentes mecánicos generar energía eléctrica. Las formulas, ecuaciones, diseño, prácticas y componentes de la turbina de Pelton han sido facilitados por los antecedentes que a continuación se mencionan.

Marcelo Betancourt Jurado<sup>1</sup> comienza en el año 2007 el estudio en el área de hidráulica, para conocer los principios, funcionamientos y aplicaciones del área presente, gracias a este estudio desarrolla la iniciativa de diseñar un banco hidráulico de generación mediante la turbina de Pelton, el estudio es llevado a cabo en universidad tecnológica de Pereira, la institución apoya y aprueba la propuesta del estudiante permitiéndole iniciar con el desarrollo del proyecto. La tesis se genera como requisito de grado para optar por el título de ingeniero mecánico de la facultad de ingeniería mecánica, el diseño de un módulo interactivo de generación hidráulica de energía eléctrica, consistió en el diseño de un banco hidráulico de generación mediante la turbina de Pelton para calcular el aprovechamiento y las pérdidas de energía. La empresa de energía de Pereira en convenio con la Universidad Tecnológica de Pereira plantea el diseño de los módulos interactivos de generación, distribución y comercialización de la energía eléctrica para la construcción de un parque temático en la ciudad de Pereira.

---

<sup>1</sup> BETANCOURT JURADO Marcelo. Diseño de un módulo interactivo de generación hidráulico de energía eléctrica. Ingeniería mecánica. Universidad tecnológica de Pereira. Pereira: 2007. P.12

Marcelo Betancourt Jurado<sup>2</sup> afirma que el diseño planteado del módulo hará parte del parque temático. El sistema de funcionamiento del módulo es un circuito cerrado, que opera con una bomba centrífuga autocebante, la cual toma el agua por el tubo de aspiración o succión, y dependiendo de las revoluciones y potencia del motor acoplado a la bomba, aumenta la presión del fluido y proporcional a este se acopla una tobera al final de la tubería de descarga elevado la energía cinética del chorro para impactar en la cuchara de la turbina haciéndola girar.

Marcelo Betancourt Jurado<sup>3</sup> ratifica que la turbina dispone de una carcasa para evitar salpicadura del agua y aprovecharla para la conducción del agua por efecto de la gravedad al mismo depósito de toma de agua de la bomba, siendo un proceso cíclico y repetitivo. Las conclusiones a las cuales llego el estudiante fueron: se debe tener un factor adicional con el eje, que es medio al que está expuesto. Como debe estar en contacto directo con el agua, se selecciona un material que soporte además de las cargas estáticas y dinámicas un tiempo más prolongado de ataque por corrosión. El diseño del módulo cuenta con los elementos necesarios para la generación de energía eléctrica a partir de la energía hidráulica. El análisis detallado de cada uno de los elementos que hacen parte del módulo, nos lleva a elaborar una lista de materiales necesarios con especificaciones y costos favorables para su respectiva construcción.

Gracias al correcto desarrollo del proyecto se determina que “el eje es un elemento esencial en las máquinas y para este caso hay que tener en cuenta un factor adicional, que es el medio al que está expuesto, como debe estar en contacto directo con el agua, se selecciona un material que soporte además de las

---

<sup>2</sup> Ibíd., p.13.

<sup>3</sup> Ibíd., p.14.

cargas estáticas y dinámicas un tiempo más prolongado de ataque por corrosión.”<sup>4</sup>.

Marcelo Betancourt Jurado<sup>5</sup>, indica que otro componente muy importante son los rodamientos seleccionados, quienes son los que además de soportar al eje con sus cargas, también permiten el movimiento de rotación del eje sin mayores pérdidas; este elemento viene en conjunto con el soporte y está debidamente protegido por unos anillos compactos a ambos lados, evitando alguna salpicadura de agua o mugre, que perjudique la vida del rodamiento. Un punto de partida para la seleccionar la bomba centrífuga es el caudal óptimo requerido para operar la turbina, como también es necesario calcular la curva del sistema de pérdidas por la conducción del agua por la tubería en función de la demanda de caudal, y así, intersecar esta curva con la de la bomba a seleccionar determinándose el punto de operación, si este punto está cercano al punto de mejor eficiencia de la bomba se dice que es la más indicada.

Lorena Andrea Ferrada Sepúlveda<sup>6</sup> señala que la información obtenida, ha permitido orientar y facilitar el diseño del proyecto debido a que ella realiza el diseño del rodete de una turbina hidráulica tipo Pelton para microgeneración, con el fin de obtener un mayor rendimiento y calidad que con la actual turbina Turgo.

Lorena Andrea Ferrada Sepúlveda<sup>7</sup> advierte que para realizar el diseño se procederá de la siguiente manera, se realizará un diseño preliminar utilizando la teoría hidráulica. Luego, se modelará el rodete diseñado en el programa Ansys

---

<sup>4</sup> Ibid., p.15.

<sup>5</sup> Ibid., p. 75.

<sup>6</sup> FERRADA S, LORENA. Diseño de rodete de turbina hidráulica tipo Pelton para microgeneración. Universidad de Chile. Departamento de ingeniería mecánica. Santiago de Chile. Diciembre 2012. P. 1.

<sup>7</sup> Ibid., p. 2.

variando los parámetros relevantes para obtener el rodete con mejor rendimiento. La investigación y el diseño se realizan en la ciudad de Santiago de Chile para la universidad de Chile en el año 2012, tras el diseño y modelación del rodete se obtienen los principales resultados que son el diámetro Pelton de 36 cm, diámetro de puntas de 45 cm y para la cuchara un ancho de 12 cm y el largo de 11 cm. El proyecto es dirigido hacia el cumplimiento de una meta en general, contribuir a la generación de nuevas fuentes de energía limpia y optar por el título de ingeniera civil mecánica.

Lorena Andrea Ferrada Sepúlveda<sup>8</sup> sugiere que el objetivo general de la investigación consiste en Diseñar y optimizar un rodete de Turbina Pelton para Microgeneración, en contexto del proyecto Microcentral Hidroeléctrica Inteligente para una altura neta de 40 m y caudal (Q) de 35 l/s, para dar cumplimiento y evitar demoras en el diseño se plantean las siguientes actividades, diseñar rodete de la turbina Pelton y determinar parámetros relevantes para aumentar su rendimiento, optimizar el diseño para obtener un mayor rendimiento, entregar el rodete diseñado en formato CAD. Cabe resaltar que, este trabajo de titulación se concentra sólo en el rotor o rodete de la turbina hidráulica, no incluyendo todos los demás componentes. Se realizará un diseño utilizando la teoría hidráulica, para luego realizar una optimización del modelo antes diseñado. Es importante recalcar que no se contempla en este trabajo de titulación el estudio de los materiales y manufactura.

Lorena Andrea Ferrada Sepúlveda<sup>9</sup> propone en primer lugar utilizar el programa DesignModeler de Ansys para dibujar el paso del flujo por la cuchara en el diseño se representa el agua y aire que interactuando con la cuchara, aquí se muestra los

---

8 Ídem.

9 ídem.

nombres de las partes, para luego facilitar la descripción de las condiciones de borde utilizadas. La geometría utilizada, por su alta complejidad se dibuja en el programa Autodesk Inventor y luego se procesa en CFX, ya que para la modelación se utilizó 4 geometrías distintas, pero todas tienen los mismo componentes. Las conclusiones que se describen permitieron realizar un estudio de las teorías hidráulicas más utilizadas y su uso en microgeneración, en ésta revisión se observa que las teorías hidráulicas se basan en la fluido dinámica del problema y por lo tanto son válidas para microgeneración.

Lorena Andrea Ferrada Sepúlveda<sup>10</sup> considera los cuatro casos y se varía el largo 10 y 11 cm y el ancho para 12, 14 y 16 cm. Para realizar el primer dimensionamiento del rodete se fija como parámetro el número de revoluciones del rodete a 750 rpm, éste valor es menor al que actualmente considera la turbina de tipo Turgo que es 1500 rpm. Esto va a tener como consecuencia que el generador eléctrico utilizado para el rodete tipo Pelton deba ser modificado, o sea, aumentar su número de polos.

Lorena Andrea Ferrada Sepúlveda<sup>11</sup> afirma Finalmente, se compara la fuerza del agua en la cuchara para el caso optimizado y el caso base y se obtiene que la fuerza es un 0,1% mayor que para el caso. Eso se traduce en un aumento del rendimiento en este mismo porcentaje por lo que el rendimiento final de la turbina se espera que sea de un 89,06%, valor considerablemente mayor al obtenido en el estudio de la turbina Turgo china de un 49%. Es importante recalcar que el rendimiento declarado es un valor teórico, por lo que para determinar el rendimiento real del rodete se debe modelar éste completo o fabricarlo y realizar pruebas en laboratorio. La turbina Pelton diseñada aumenta el rendimiento del

---

<sup>10</sup> Ibíd. p. 59.

<sup>11</sup> ídem.

proyecto Central Microhidráulica Inteligente y además le agrega valor al no depender de un rodete de mala calidad que carece de especificaciones técnicas, que además es importando desde otro país lo que trae desventajas en cuanto a mantenimiento y agrega costos.

La teoría recopilada e impartida por Francisco Maldonado Quispe, permite “diseñar una turbina de río para la generación de electricidad en el distrito de Mazán-Región Loreto, será del tipo tripala de eje inclinado con respecto al nivel del agua del río y fabricado en fibra de vidrio y resina con un diámetro nominal de 2 m y una velocidad de giro de 42.7 r.p.m. que van unidos a dos platos de sujeción en acero inoxidable para el montaje de los alabes.”<sup>12</sup>.

Francisco Maldonado Quispe<sup>13</sup> explica que el proyecto se realiza en la ciudad de Lima Perú, para la universidad Nacional Mayor de San Marcos de la facultad de ciencias físicas, la universidad brinda el espacio y el conocimiento al estudiante, para tomar las diferentes fuentes de información que posee la institución y facilitar de alguna manera el desarrollo de la tesis. Con el fin de optar por el título de ingeniero mecánico de fluidos y contribuir con diseño que por medio de la acción del río se genere electricidad y las áreas cercanas puedan acceder a este servicio a un costo considerable. Dada la posibilidad de que una vez probado el funcionamiento de la Turbina de Río, se pueda transferir dicha tecnología a otras regiones donde existan recursos hídricos utilizables mediante esta máquina, además de que este tipo de sistemas no necesita de grandes obras civiles ni mecánicas para funcionar, lo cual trae grandes beneficios en cuanto a la reducción de costos frente a otras formas convencionales para generar electricidad.

---

12 MONTERO A, CARLOS. Equipamiento electromecánico de una central mini-hidroeléctrica a través de una turbina Pelton. Escuela técnica superior de ingeniería. Marid. 2007. P. 1.

13 Ídem.

Francisco Maldonado Quispe<sup>14</sup> estableció, adaptar el diseño de la Turbina de Río para la generación de electricidad en pequeñas potencias (de 250 W) aprovechando la energía cinética del Río Napo, satisfacer las pequeñas demandas de energía en las pequeñas comunidades ribereñas. Se determina la energía del agua, la potencia suministrada, la velocidad de la corriente de agua, el área de barrido del rotor, coeficiente de potencia, potencia de salida.

Francisco Maldonado Quispe<sup>15</sup> concluye en el área de diseño hay una máquina más lenta y con baja velocidad de diseño, ello permite más horas de trabajo al año, este criterio afecta especialmente el diseño de la turbina el cual tendrá una vida útil más larga. Para la fabricación en serie, lo más conveniente es el uso de fibra de vidrio para los alabes (palas), ya que se puede trabajar con modelos y moldes que facilitan su producción en serie. El Generador eléctrico de imanes permanentes, la principal ventaja de este tipo de generadores es que trabaja en un amplio rango de velocidades de giro y por lo tanto se acoplan muy bien con las turbinas de río las cuales giran acorde a la velocidad del río existente en la zona. La simplicidad para la instalación, operación y mantenimiento.

Francisco Maldonado Quispe<sup>16</sup> recomienda el almacenamiento de la energía generada, utilizando baterías automotrices de 12V por ser las más comerciales y baratas. Se debe tener en cuenta todas las facilidades de instalación y la necesidad de la menor intervención posible de personal especializado en el montaje de la turbina, de tal forma que pueda ser instalado por agentes locales. El diseño de ingeniería fue desarrollado utilizando las ecuaciones aerodinámicas correspondientes, utilizando perfiles estandarizados para la sección de los alabes

---

14 Ídem.

15 Ibíd., p. 59.

16 Ídem.

(palas) y la necesaria compatibilidad entre los parámetros de la turbina con los del generador.

El desarrollo del trabajo de grado de los ponentes, Edwin Chica, Felipe Obando, sierra, Velásquez y Enríquez<sup>17</sup> determinan el diseño, simulación, fabricación y caracterización de una turbina tipo Pelton de 5 kW, para ello modelaron los componentes con ayuda de herramientas computacionales tipo CAD (Diseño asistido por computador), CAE (Ingeniería asistida por computador) y CFD (Análisis computacional fluido dinámico). Posteriormente, se empleó un software CAM (Manufactura asistida por computador) y procesos de fundición para la fabricación de los componentes del microgenerador.<sup>18</sup> Por último, y con el fin de validar el diseño, se realizó la caracterización del microgenerador mediante pruebas en el Laboratorio del Grupo de Investigación de Energía Alternativa de la Universidad de Antioquia.

Edwin Chica, Felipe Obando, sierra, Velásquez y Enríquez<sup>19</sup> definen que todo esto se realiza, en la ciudad de Medellín para la Universidad de Antioquia, donde los estudiantes aspiran al título de ingeniero mecánico, del departamento de ingeniería mecánica de la universidad. La microgeneración hidroeléctrica se emplea como solución energética en zonas que carecen del servicio de energía eléctrica, con el fin de dar solución a este problema, se desarrolla una metodología para diseñar y construir microgeneradores hidráulicos con turbina tipo Pelton. Con base en los planos realizados en la etapa de diseño se procedió al montaje de los diferentes componentes del microgenerador, Las pruebas de funcionamiento del

---

17 Ídem.

18 Edwin Chica, Felipe Obando, sierra, Velásquez y Enríquez. Diseño, simulación, fabricación y caracterización de una turbina tipo Pelton de 5 kW. Universidad de Antioquia. Facultad de ingeniería mecánica. Medellín. 2013. P. 2.

19 Ibíd. P. 8.

microgenerador hidráulico fueron realizadas en el laboratorio del Grupo de Energía Alternativa de la Universidad de Antioquia.

Edwin Chica, Felipe Obando, Sierra, Velásquez y Enríquez<sup>20</sup> afirman que este laboratorio cuenta con un banco de caracterización de microgeneradores en donde se cuantificaron los distintos parámetros que intervienen en el funcionamiento del sistema a diferentes condiciones de operación. Todo esto se logra por medio de distintos sensores y de un sistema SCADA basado en PLC. Con el desarrollo de la tesis de grado los estudiantes afirman y concluyen: Se propuso una metodología para diseñar, construir y caracterizar un microgenerador hidráulico, a partir de una base teórico-experimental. Se emplearon herramientas computacionales para apoyar la etapa de diseño y fabricación de los componentes, con lo cual se redujeron los costos de desarrollo y fue posible experimentar, mediante simulaciones el efecto que generaron algunos cambios en la geometría de los componentes del microgenerador.<sup>21</sup> Se presentaron diferentes procesos de fabricación para elaborar álabes de turbina Pelton. Los resultados obtenidos permitieron seleccionar el proceso de fundición con molde de caja fría como idóneo para fabricar este tipo de álabe. La metodología propuesta puede ser empleada para el diseño y construcción de microgeneradores hidráulicos, para diferentes capacidades de generación y que utilicen otros tipos de turbinas.

---

20 *Ibíd.* P. 8.

21 *Ídem.*

## 2. MARCOS REFERENCIALES

### 2.1. MARCO TEÓRICO

#### LEY DE LOS GASES IDEALES

Como dice Munson<sup>22</sup>, Los gases son bastantes compresibles en comparación con los líquidos, donde los cambios en la densidad del gas están relacionados directamente con los cambios en la presión y temperatura por medio de la ecuación.

$$p = \rho RT$$

Como dice Munson<sup>23</sup>, Donde  $p$ , es la presión absoluta,  $\rho$  es la densidad, y  $R$  es una constante del gas, la ecuación se denomina ecuación de los gases ideales o perfectos, o bien, ecuación de estado para un gas ideal.

#### SEGUNDA LEY DE NEWTON

“A medida que una partícula de un fluido se mueve de un sitio a otro experimenta, una aceleración o una desaceleración. En concordancia con la segunda ley de movimiento de Newton, la fuerza neta que actúa sobre la partícula de fluido en consideración debe ser igual a su masa multiplicada por la aceleración.

$$F = ma$$

---

22 MUNSON, YOUNG, OKIISHI. Fundamentos de mecánica de fluidos. México: limusa S.A. 2003. P. 31.

23 Ídem.

Para aplicar la segunda ley de Newton a un fluido (o a cualquier otro objeto) es necesario definir un sistema de coordenadas en el que se describa el movimiento.”<sup>24</sup>

## ECUACIÓN DE BERNOULLI

“La ecuación sencilla para flujo estable, no viscoso e incomprensible.

$$P + \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho yz = \text{Constante a lo largo de la línea de corriente}$$

Esta celebre ecuación de Bernoulli, que constituye una poderosa herramienta en mecánica de fluidos. Daniel Bernoulli (1700-1782) publicó en 1738 su hidrodinámica, donde apareció, por primera vez un equivalente de esta famosa ecuación.”<sup>25</sup>

## NUMERO DE REYNOLDS

“Las investigaciones de Osborne Reynolds han demostrado que el régimen de flujo en tuberías, es decir, si es laminar o turbulento, depende del diámetro de la tubería, de la densidad y la viscosidad del fluido y de la velocidad del flujo.”<sup>26</sup>.

“El valor numérico de una combinación adimensional de estas cuatro variables, conocido como el número de Reynolds, puede considerarse como la relación de

---

<sup>24</sup> Ibíd. P. 113.

<sup>25</sup> Ibíd. P. 198.

<sup>26</sup> GARCIA REZA, Clemente. Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías. Santafé de Bogotá: Mcgraw-Hill, 2003. P. 3.

las fuerzas dinámicas de la masa del fluido respecto a los esfuerzos de deformación ocasionados por la viscosidad.”<sup>27</sup>

“Factor de fricción para condiciones de flujo laminar ( $Re < 2000$ ) es función sólo del número de Reynolds; mientras que para el flujo turbulento ( $Re > 4000$ ) es también función del tipo de pared de la tubería.

Así se define el número de Reynolds:

$$Re = \frac{V * D}{\nu} = \frac{4 * Q}{\pi * \nu * D} ”^{28}$$

Dónde:

$v_s$  = Velocidad característica del fluido

$D$  = Diámetro de la tubería a través de la cual circula el fluido o longitud característica del sistema

$\nu$  = Viscosidad cinemática del fluido

$Q$  = caudal

$\pi = 3.14159$

## INTRODUCCION DE LAS MAQUINAS HIDRAULICAS

“Las maquinas hidráulicas o máquinas de fluido son aquellas que intercambian energía con el fluido que está conteniendo o que circula por su interior. Este fluido comunica la energía que absorbe la máquina, o bien el fluido es el que recibe la energía que la maquina le transmite.”<sup>29</sup>

“Las maquinas hidráulicas constituyen una de las aplicaciones fundamentales de la mecánica de fluidos y se encuentran presentes en todo tipo de instalaciones y

---

<sup>27</sup> Ídem.

<sup>28</sup> Ídem.

maquinaria industrial. Su estudio parte del conocimiento de las ecuaciones generales de conservación de la mecánica de fluidos.”<sup>30</sup>

El flujo a través de una máquina hidráulica puede ser laminar o turbulento, aunque suele ser a altos números de Reynolds, es decir, turbulento y además tridimensional y no estacionario: ello hace que en general no existan soluciones exactas de las ecuaciones de Navier Stokes. Por lo tanto, el análisis y diseño de las máquinas de fluido es bastante complicado, las ecuaciones y condiciones de contorno que rigen el movimiento del fluido en el interior de una máquina hidráulica son muy complejas y en la mayor parte de los casos no es posible su solución analítica o numérica, por lo que hay que recurrir a otras técnicas, con la experimentación bajo la guía de análisis dimensional y la semejanza dinámica o analizar modelos teóricos simplificados suficientemente aproximados del comportamiento del fluido en el interior de la máquina.<sup>31</sup>

“Otras teorías simplificadas de las máquinas de fluido son las teorías unidimensional y bidimensional. También el importante desarrollo alcanzado por los ordenadores en las últimas décadas ha proporcionado el impulso de métodos de análisis. En cualquier caso, el flujo en el interior de las máquinas hidráulicas es extraordinariamente complejo y sigue siendo materia de investigación en los campos analíticos, experimental y numéricos.”<sup>32</sup>.

## DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES Y PÉRDIDAS EN EL INTERIOR DE UNA TURBINA

“En el interior de una turbina se producen pérdidas por fricción debido a la acción de la viscosidad y pérdidas por desprendimiento de capa límite debida al mal ángulo de ataque de la corriente relativa sobre los alabes fuera del punto de diseño

Las pérdidas por fricción Ah, análogamente al caso de las bombas, son proporcional al cuadro del caudal y se producen al atravesar el fluido, los

---

29 DOMINGUEZ SANCHES, Urbano, Maquinas Hidráulicas. España: club universitario, 2012. P. 13.

30 Ídem.

31 Ídem.

32 Ibíd., P.14

diferentes elementos de la máquina, como la cámara especial, el distribuidor, y el rotor.”<sup>33</sup>.

Las pérdidas por desprendimiento, también igual que en las bombas, son proporcionales a  $(Q-Q_0)^2$  siendo  $Q_0$  el diseño, caudal que hace para una posición determinada del distribuidor la velocidad relativa  $W_1$  sea tangente a los alabes y por tanto las pérdidas por este motivo,  $A_{h_{desp}}$ , sean mínimas. A la salida de rotor, excepto en el punto de diseño, la velocidad absoluta no es axial: existe lo tanto una componente tangencial  $C_{u2}$  que es considerada como una pérdida de carga más, ya que implica una pérdida de energía cinética no aprovechada  $h_{tang} = C_{u2}^2/2g$ . Esta pérdida es proporcional a  $(Q-Q_0)$ .<sup>34</sup>

Existen además otras clases de perdidas como son as perdidas mecánicas  $P_r$ , las perdidas por rozamientos en disco y por fugas  $q$ . Las pérdidas por fugas son tales que  $Q=Q^r + q$ , siendo que  $Q^r$  el caudal que atraviesa el rotor,  $q$  en el que se pierde entre las holguras entre el rotor y el estator y  $Q$  el que desagua el embalse. La potencia de salto será de  $pgQH$  y la máxima altura que podría cederse al rotor en el caso ideal pide obtenerse por aplicación de la ecuación de Bernoulli entre la entrada y salida del mismo suponiendo que estos mismos puntos se encuentran en la misma cota:<sup>35</sup>

$$H = \frac{\left(p_1 + \frac{1}{2}pc_1^2\right) - \left(p_2 + \frac{1}{2}pc_2^2\right)}{pg}$$

Y, además, debe cumplirse:

$$H = H_t + \Delta h_t + \Delta h_{desp}$$

Sin embargo, normalmente lo que interesa es la potencia y los rendimientos de la maquina en su conjunto, por lo que se considera la altura  $H$  como la obtenida mediante la ecuación de Bernoulli entre la entrada (punto e) y la salida (punto 2) de la máquina, obteniéndose.”<sup>36</sup>

$$pgH = \left(pe + \frac{1}{2}pc_1^2\right) - \left(p_2 + \frac{1}{2}pc_1^2\right)$$

Que también puede expresarse como:

33 Ibid., P. 15.

34 Ídem.

35 Ídem.

36 Ibid., p.207

$$pgH = pgH_t + \Delta h_{fe} + \Delta h_{fd} + \Delta h_{fr} + \Delta h_{desp} = pgH_t + \Delta h_{maquina}$$

Dónde:  $\Delta h_{fe}, \Delta h_{fd}, \Delta h_{fr}, \Delta h_{desp}$

Son respectivamente las pérdidas de la carga en la cámara espiral, en el distribuidor en el rotor (es decir, en todos los elementos que consta la turbina) y las pérdidas son desprendimiento de la capa limite. También habrá que añadir en su caso las pérdidas por velocidad de salida del flujo.”<sup>37</sup>.

“Con esta nueva definición de H los rendimientos quedan:

$$n = \frac{pg(H - \Delta h_{maq})(Q - q) - P_m - p_t}{pgQH} = \frac{p_e}{p}$$

$$n_h = \frac{H - \Delta h_{maq}}{H} = \frac{p_t}{H}$$

$$n_v = \frac{pg(H - \Delta h_{maq})(Q - q) - P_m - p_t}{pg(H - \Delta h_{maq})(H - q)} = \frac{p_e}{p}$$

$$n = \frac{Q - q}{Q} n_{38}$$

“Las pérdidas por velocidad tangencial influyen en el resultado atreves del valor de H, es decir, al aumentar estas pérdidas de energía ideal máxima que se puede aprovechar en el interior de la maquina disminuye.”<sup>39</sup>.

---

37 Ídem.

38 Ídem.

39 Ídem.

## 2.2. MARCO CONCEPTUAL

### 2.2.1. Turbinas hidráulicas

“Se puede definir una turbina hidráulica como una máquina que transforma la energía hidráulica apartada por un fluido incomprensible en energía mecánica. En una turbina, el fluido al atravesar la máquina cede en el rotor-órgano principal y además el único móvil, parte de su energía, que será aprovechada en el solidario al mismo obteniéndose así una energía mecánica. Esta energía es transformada posteriormente en energía eléctrica mediante un alternador<sup>40</sup>.”

Además del rotor, una turbina de otros elementos situados aguas arriba y aguas abajo del mismo y que serán descritos más adelante. El agua es conducida hasta la turbina a través de la denominada tubería forzada. Normalmente, las turbinas hidráulicas van directamente acopladas al alternador, por lo que deben girar a una velocidad constante para que la frecuencia de la corriente no variara. Esta velocidad llamada de sincronización, depende de la fuerza de la corriente de red,  $f$ , y de números de polos del alternador.<sup>41</sup>

### 2.2.2. Clasificación

“Las turbinas pueden clasificarse de formas muy diversas atendiendo a las características y a su manera de funcionamiento. La clasificación más importante es la de atención a su funcionamiento, las divide en turbinas de acción, y en turbinas de reacción.”<sup>42</sup>.

---

40 Ídem.

41 Ibíd., p. 202.

42 Ibíd., p. 203.

- **Turbinas de acción:**

“Son aquellas en las que el agua sale del distribuidor, (órgano anterior al rotor) a la presión ambiente y llega al rotor a esa misma presión. En esta turbina toda la energía potencial, el salto se transmite al rotor en forma de energía cinética. La turbina más representativa de este tipo es la turbina Pelton, aunque también se pueden mencionar las turbinas Michelle. Banki y turgo, muchísimo menos utilizado.”<sup>43</sup>.

“En este tipo de turbinas, el fluido al pasar por la rueda entra en contacto con la atmosfera y toda la energía de presión se transforma en energía cinética, por lo que en el rotor únicamente hay intercambio de energía en forma de energía cinética. El fluido llega al rodete por un solo punto o a lo sumo por varios puntos, porque se dicen q estas turbinas son de admisión parcial. Los elementos fundamentales de la turbina del Pelton son el inyector y el rotor.”<sup>44</sup>

- **Turbina de reacción:**

Son aquellas en las que el agua sale del distribuidor con cierta presión manométrica positiva, que va perdiendo a su paso por el rotor, a la salida el cual la presión manométrica es nula o incluso negativa. Por tanto, en el rodete se intercambia tanto energía cinética como energía de presión, en este grupo las más frecuentes son las turbinas Francis, hélice, Kaplan, bulbo, deriaz, straflo. En este tipo de turbinas el fluido cede energía tanto en forma de energía cinética como en forma de energía de presión, el fluido llega por el rodete por toda la periferia del mismo, por lo que se dice que estas turbinas son de admisión total.<sup>45</sup>

“Los elementos fundamentales de estas turbinas, (aunque no siempre están presentes todos con excepción del rotor), son el distribuidor, el rotor y el tubo difusor. La misión del distribuidor es transformar parcialmente a energía de

---

43 Ídem.

44 Ídem.

45 Ídem.

presión del fluido en energía cinética, conducir el fluido hacia toda la periferia del rotor y regular el caudal.”<sup>46</sup>.

“El tubo difusor, es una conducción situada a la salida de rotor por la que el fluido sale a la atmosfera en el canal de desagüe y cuya misión principal es incrementar la energía que el rodete puede obtener del fluido.”<sup>47</sup>.

### 2.2.3. Utilización de las turbinas hidráulicas

Las turbinas de acción se emplean en situaciones de grandes saltos y caudales pequeños, es decir velocidades específicas bajas, por ello se instalan en centrales, en las cabeceras de los cauces, en zonas próximas a los nacimientos de los ríos donde las fuertes pendientes permiten obtener grandes desniveles entre puntos relativamente próximos, mientras que el caudal es pequeño, puesto que las cuecas que vierten sus aguas en las cabeceras son reducidas. Este tipo de centrales son normalmente de agua acumulada y suele obtenerse de un canal de derivación de bastante longitud para generar el salto neto necesario. Las turbinas de reacción se utilizan para un amplio rango de altura y caudales, con una relación caudal-altura mayor que en el caso de las turbinas de reacción.<sup>48</sup>

Los valores más bajos de dicha relación corresponden a las turbinas Francis y a medida que van aumentando van pasando más o menos por este orden, hélice, Kaplan, derivaz, bulbo. Las centrales hidroeléctricas con turbinas de reacción se sitúan en la zona media o al final de los cauces de los ríos y disponen de canales de derivación más cortos que de los centrales de las turbinas de acción o incluso pueden carecer de ello. Pueden ser de agua acumulada o de agua fluente en los casos que es económicamente inviable regular el río. A medida que un río discurre por su cauce va disminuyendo la pendiente y su cota, con lo que van disminuyendo las posibilidades de generar saltos, pero por el contrario se van incrementando su cuenca y por tanto su caudal.<sup>49</sup>

Valores aproximados de la velocidad específica indicados en la siguiente tabla:

---

46 Ídem.

47 Ibid., P. 202.

48 Ídem.

49 Ibid., p.203

**Tabla 1.** Clases de turbinas.

Ws	TURBINA
10-30	Pelton con un inyector
Hasta 75	Pelton con seis inyectores
50-450	Francis
450-900	Hélice, Kaplan, Deriaz
900-1150	Bulbo, Straflo

**Fuente:** CUADRADO J, FERREIRA J, GARCIA C, JIMENES J.

#### 2.2.4. Funcionamientos de una bomba centrífuga como turbina centripetra

Si mientras está funcionando una bomba centrífuga que alimenta a un depósito se desconecta de la red el motor que la mueve, el motor comenzará a disminuir su velocidad hasta pararse. Si la tubería de impulsión no dispone de válvulas de retención, el fluido atravesará la máquina en sentido contrario al inicial haciendo que el rotor gire en sentido inverso al de su funcionamiento como bomba. En el caso en que la bomba es provista de difusor y suponiendo fluido ideal, si se invirtiese el sentido de la corriente, la máquina estaría funcionando como una turbina y el difusor estaría haciendo el papel del distribuidor haciendo que la velocidad absoluta del fluido  $C_1$ , al entrar en el rotor lo haga con la dirección  $\alpha_1$ . Si la velocidad de giro del rotor es la misma en el valor absoluto que en el caso de funcionamiento como bomba y el caudal a través de la máquina funcionando como turbina es el mismo que a la salida de la misma cuando funciona como bomba y el triángulo de velocidades a la salida funcionando como turbina será el de entrada cuando funcionaba como bomba.<sup>50</sup>

“Si el caudal a través de la máquina en su funcionamiento como bomba es el diseño, el fluido entrará tangente al alabe, sin pérdidas por el desprendimiento, y en el funcionamiento como turbina la velocidad absoluta solo tendrá componente

---

<sup>50</sup> Ídem.

axial, siendo por tanto los triángulos de velocidades a la salida de la turbina y entrada de la bomba idénticos. La altura teórica dada por la ecuación de Euler será por tanto la misma.”<sup>51</sup>

### 2.2.5. Aplicación de una turbina para medidor de flujo

Consisten en un rotor que gira al paso del fluido con una velocidad directamente proporcional al caudal. La velocidad del fluido ejerce una fuerza de arrastre en el rotor; la diferencia de presiones debido al cambio de área entre el rotor y el cono posterior ejerce una fuerza igual y opuesta. De este modo el rotor está equilibrado hidrodinámicamente y gira anterior entre los cono anterior y posterior sin necesidad de utilizar rodamientos axiales evitando así rozamiento que necesariamente se producirá. Existen dos tipos de convertidores para la velocidad de la turbina. En el de reluctancia la velocidad viene determinada por el paso de las palas individuales de la turbina a través del campo magnético creado por un imán permanente montado en una bobina captadora exterior. El paso de cada pala varía la reluctancia del circuito magnético. Esta variación cambia flujo induciendo en la bobina captadora una corriente alterna que, por lo tanto es proporcional al giro de la turbina. En el inductivo el rotor lleva incorporado un imán permanente y el campo magnético giratorio que se origina induce una corriente alterna en una bobina captadora exterior.<sup>52</sup>

En ambos casos, la frecuencia que genera el rotor de turbina es proporcional al caudal siendo del orden de 250 a 1200 ciclos por segundo para el caudal máximo. Si un rotor de seis palas gira a 100 revoluciones por segundo, genera 600 impulsos por segundo. El número de impulso por unidad del caudal es constante. La turbina está limitada por la viscosidad del fluido, debido al cambio que se produce en la velocidad de perfil del líquido a través de la tubería cuando aumenta la viscosidad. En las paredes, el fluido se mueve más lentamente que en el centro, de modo que, las puntas de las palas no pueden girar a mayor velocidad. En general, para viscosidades superiores a 3-5 centistokes se reduce considerablemente el intervalo de medida del instrumento.<sup>53</sup>

La presión es muy elevada, del orden  $\approx 0,3\%$ . La máxima precisión se consigue con un régimen laminar instalando el instrumento de una tubería rectas de longitudes mínimas 15 diámetro aguas arriba y 6 diámetros aguas abajo. El campo de medida llega hasta la relación 15 a 1 entre el caudal máximo y el mínimo y la escala líneas. El instrumento es adecuado para la medida de los caudales de líquidos limpios o filtrados. Debe instalarse que de tal modo no se vacíe cuando cesa el caudal ya que el choque del agua a alta velocidad contra el medidor vacío lo dañaría seriamente. La sobre velocidad por exceso de caudal puede ser

---

51 Ibid., P. 206.

52 CREUS. Antonio. Instrumentación industrial, sexta edición, Barcelona, España, 199. P. 150.

53 Ibid., P. 207.

también perjudicial para el instrumento. La frecuencia generada por el medidor de turbina se transmite a un convertidor indicador o totalizador.<sup>54</sup>

### 2.2.6. Turbina Pelton

“La turbina Pelton, denominada también de impulsión o de chorro libre, es obra del ingeniero estadounidense Lester Allen Pelton y se comenzó a emplear en 1889. Los elementos fundamentales que consta una turbina Pelton son un distribuidor denominado inyector (formado por una tobera y regulado por una aguja) y el rotor.”<sup>55</sup>

“Su utilización es idónea en saltos de gran altura (alrededor de 200 m y Mayores), y caudales relativamente pequeños (hasta 10 m<sup>3</sup>/s), Lo más característico son sus álabes en forma de cazoleta.”<sup>56</sup>

### 2.2.7. Las turbinas Pelton son:

- “De presión, por ser ésta constante en el rodete.
- De chorro libre, está a la presión atmosférica.
- De impulsión.
- De admisión parcial, el líquido ataca sólo una parte del rodete.
- Tangenciales, el líquido ataca tangencialmente al rodete.
- De acción, el agua y el rodete tienen el mismo sentido.”<sup>57</sup>.

### 2.2.8. Componentes

---

54 DOMINGUEZ, op. Cit. P. 13.

55 Ibid., p. 209.

56 Ídem.

57 Ídem.

- Distribuidor

“Cámara de distribución, sistema de regulación, Inyector (tobera, aguja, deflector), rodete (rueda, alabes), eje, sistema de frenado, carcasa, cámara de descargue, blindaje, estructor de energía.”<sup>58</sup>.

### 2.2.8.1 Distribuidor

“Está constituido por uno o varios equipos de inyección de agua, cada uno formado por varios elementos mecánicos. Que tienen como función: Dirigir un chorro de agua (cilíndrico y de sección uniforme) hacia el rodete, regular el caudal que ha de fluir hacia dicho rodete, llegando a cortarlo totalmente cuando proceda, para paradas rápidas debe contar con una pantalla deflectora que desvíe el chorro a la salida.”<sup>59</sup>.

“Está constituido por uno o varios equipos de inyección de agua, cada uno formado por varios elementos mecánicos. Dirigir un chorro de agua (cilíndrico y de sección uniforme) hacia el rodete. Regular el caudal que ha de fluir hacia dicho rodete, llegando a cortarlo totalmente cuando proceda. Para paradas rápidas debe contar con una pantalla deflectora que desvíe el chorro a la salida.”<sup>60</sup>.

---

58 *Ibíd.*, P. 216.

59 *Ídem.*

60 *Ídem.*

### 2.2.8.2 Sistema de regulación

“Elemento que permite regular el caudal de agua hacia el rodete (rueda) para mantener una velocidad constante del grupo para cualquier variación de carga.”<sup>61</sup>.

### 2.2.8.3 Cámara de distribución

“Consiste en la prolongación de la tubería forzada, acoplada a éste, mediante brida de unión, posteriormente a la situación de la válvula de entrada a turbina, según la trayectoria normal del agua. Tiene como misión fundamental conducir el caudal de agua. Igualmente, sirve de soporte a los demás mecanismos que integran el distribuidor.”<sup>62</sup>.

### 2.2.8.4 Inyector

El inyector es una prolongación de la tubería forzada de alimentación que termina en una tobera o boquilla de forma convergente y tiene como misión conducir el fluido hasta el rodete, convertir la energía de presión en energía cinética y regular el caudal (y con ello la pérdida de carga en la tubería de acceso a la turbina). La energía disponible del salto llega prácticamente en forma de presión a la entrada del inyector y es transformada a lo largo de e en energética cinética. En su interior lleva una aguja de regulación que acciona desde el exterior puede acercarse o alejarse de la boquilla del inyector disminuyendo o aumentando el caudal.<sup>63</sup>

Para obtener una alimentación adecuada, disminuyendo las pérdidas de carga la entrada a la parte convergente está precedida de una parte recta de sección recta tan grande como sea posibles (bajas velocidades). El codo también debe tener un gran radio de curvatura en orden a disminuir las pérdidas de cargas a corrientes secundarias. Naturalmente para, asegurar el cierre, el diámetro de la aguja debe ser al menos e igual que al de la boquilla y su ángulo en el vértice no debe ser demasiado pequeña para que tenga una buena resistencia mecánica ( $\alpha$  mayor  $25^\circ$ ). En orden a asegurar además una buena convergencia dicho ángulo del cono de la boquilla debe ser del orden de  $35^\circ$  a  $40^\circ$ .<sup>64</sup>

---

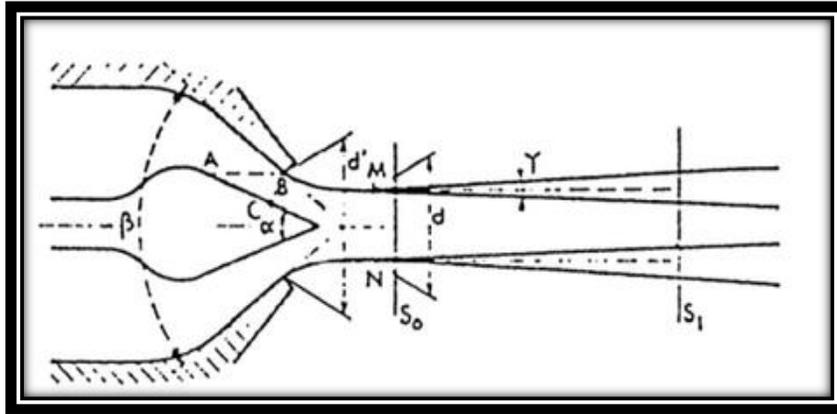
61 *Ibíd.*, p. 218.

62 *Ibíd.*, p. 219.

63 *Ídem.*

64 *Ibíd.*, p .221.

**Figura 1.** Inyector y chorro de una turbina Pelton.



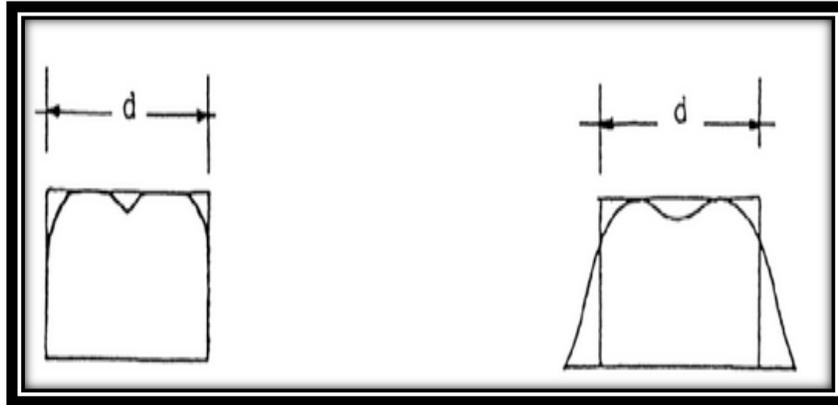
**Fuente:** DOMINGUEZ SANCHES. Urbano, Maquinas Hidráulicas, editorial club universitario, España, 2012, p ,222.

DOMINGUEZ<sup>65</sup> afirma que en la figura 1, se muestra el chorro a la salida del inyector. A la salida de la boquilla el chorro se curva hasta que se alcanza la sección mínima MN, a partir de la cual la presión es uniforme a través de chorro, pero en las secciones anteriores a MN a presión no es uniforme (existen variaciones apreciables de la cantidad de movimiento transversal) pudiendo alcanzarse depresiones importantes con la aparición de cavitación y el consiguiente daño de las superficies. Los perfiles de velocidades en el chorro presentan el aspecto de la figura 3, aguas arriba y aguas abajo.

---

65 Ídem.

**Figura 2.** Perfiles de velocidades de una turbina Pelton cerca y lejos del inyector



**Fuente:** DOMINGUEZ SANCHES. Urbano, Maquinas Hidráulicas, editorial club universitario, España, 2012. P. 222.

- **“Aguas arriba:** (Cerca del inyector) la velocidad tiene una configuración prácticamente uniforme, el chorro sale con mucha energía y la diferencia entre viscosidad entre aire y fluido no es suficiente para que deje de tener esa configuración. En los extremos del chorro la velocidad es algo menor debido a la fricción con el aire.”<sup>66</sup>.
- **“Aguas abajo:** (Lejos del inyector) la fricción con el aire debilita mucho la velocidad en la periferia del chorro, que no tiene tanta energía como al salir del inyector.”<sup>67</sup>

---

66 *Ibíd.*, p. 222.

67 *Ídem.*

➤ **El inyector está compuesto por:**

- **Aguja**

“Es un vástago de acero muy duro situado concéntricamente en el interior del cuerpo de la tobera, guiado mediante cojinetes sobre los cuales tiene movimiento de desplazamiento longitudinal en dos sentidos.”<sup>68</sup>.

- **Tobera**

“Se trata de 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.”<sup>69</sup>.

- **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. Sirve para evitar el embalamiento y el golpe de ariete (cierres bruscos).”<sup>70</sup>.

- **Regulador de velocidad**

---

68 Ídem.

69 Ibíd., p.223

“Conjunto de dispositivos electro-mecánicos, (servomecanismos, palancas, bielas) diseñados para mantener constante la velocidad del grupo, a fin de que la frecuencia de la corriente generada tenga, en todas las circunstancias de carga, 50 Hz.”<sup>71</sup>.

### 2.2.8.5 Rodete

“Es la pieza clave donde se transforma la componente cinética de la energía del líquido en energía mecánica o, dicho de otra manera, en trabajo según la forma de movimiento de rotación. Está compuesto por: Rueda motriz, Alabes, cucharas o cazoletas.”<sup>72</sup>

“La Rueda motriz, está unida rígidamente al eje, montada en el mismo por medio de chavetas y anclajes adecuados. Los alabes pueden ser piezas independientes o constituir una pieza única, están diseñados para recibir el empuje directo del chorro de agua.”<sup>73</sup>

Su forma es similar a la de una doble cuchara, con una arista interior afilada y situada centralmente en dirección perpendicular hacia el eje (divide al álabe en dos partes simétricas de gran concavidad). Esto permite compensar los empujes axiales. Cada álabe lleva en su extremo periférico una escotadura centrada en forma de W. Con ello se consigue que las cazoletas no reciban el chorro de agua hasta que su arista se encuentre en la posición perpendicular respecto al eje del chorro, aprovechando al máximo el caudal y el impulso que éste le proporciona al acompañarle durante un corto trayecto.<sup>74</sup>.

---

70 Ídem.

71 Ídem.

72 Íbid., p.223

73 Ídem.

74 Íbid., p.224

### **2.2.8.6 Eje**

“Rígidamente unido al rodete y situado adecuadamente sobre cojinetes debidamente lubricados, transmite el movimiento de rotación al eje del alternador. En el mismo eje pueden estar unidas varias turbinas y un generador.”<sup>75</sup>.

### **2.2.8.7 Sistema de frenado**

“Además de intercalar totalmente el deflector, se puede disponer de un circuito derivado de la cámara de distribución que permite proyectar agua uno o varios contra chorros incidente sobre la zona convexa de los álabes, favoreciendo el rápido frenado del rodete.”<sup>76</sup>.

### **2.2.8.8 Carcasa**

“Es la envoltura metálica que cubre los inyectores, rodete y otros elementos mecánicos de la turbina. Su misión consiste en evitar que el agua salpique al exterior cuando, después de incidir sobre los álabes los abandona.”<sup>77</sup>.

### **2.2.8.9 Cámara de descarga**

“Es la zona por donde cae el agua libremente hacia el desagüe, después de haber movido al rodete. También se conoce como tubería de Descarga. Para evitar deterioros debidos a la acción de los chorros de agua, especialmente de los originados por la intervención del deflector, se suele disponer en el fondo de la cámara de descarga de un colchón de agua de 2 a 3 m de espesor.”<sup>78</sup>.

---

75 *Ibíd.*, P. 225.

76 *Ídem.*

77 *Ídem.*

78 *Ibíd.*, P. 226.

### 2.2.8.10 Blindaje y destructor de energía

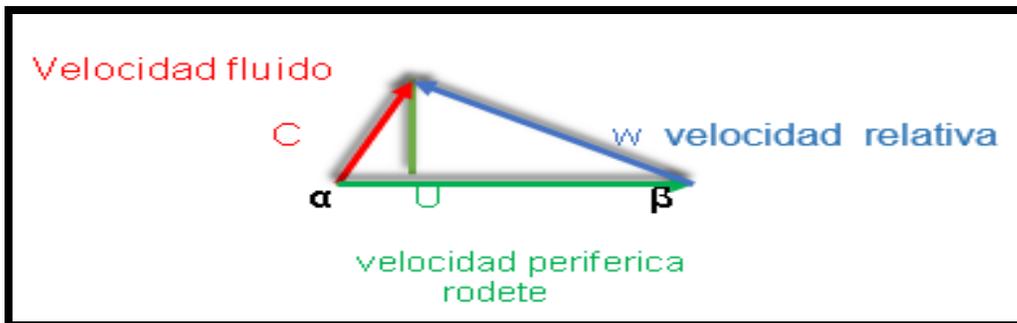
Protegen la infraestructura contra el efecto destructor del chorro desviado.

### 2.2.8.11 Funcionamiento de una turbina Pelton

“La sucesiva transformación de la energía se efectúa así: La energía potencial gravitatoria del agua embalsada (energía de presión hasta los orificios de las toberas) se convierte, salvo pérdidas, en energía cinética al salir el agua a través de dichos orificios en forma de chorros libres (Ecuación de Bernoulli). Se dispone de la máxima energía cinética en el momento en que el agua incide tangencialmente sobre el rodete, empujando a los álabes y obteniéndose el trabajo mecánico deseado.”<sup>79</sup>

Triángulos de velocidades:

**Figura 3.** Triángulo de entrada.

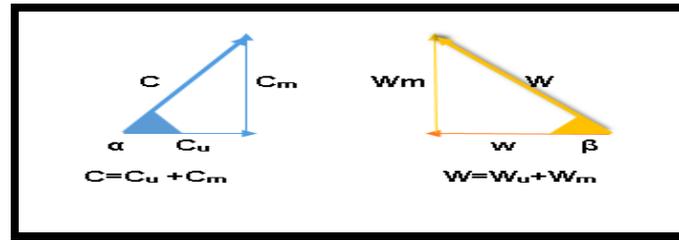


**Fuente:** DOMINGUEZ SANCHES. Urbano, Maquinas Hidráulicas, editorial club universitario, España, 2012. P.227.

---

<sup>79</sup> Ibid., P. 227.

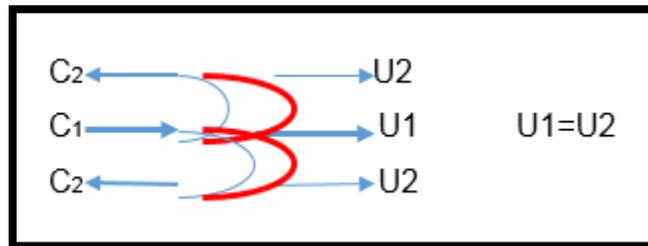
**Figura 4.** Triángulos de salida.



Fuente: DOMINGUEZ SANCHES. Urbano, Maquinas Hidráulicas, editorial club universitario, España, 2012. P. 227.

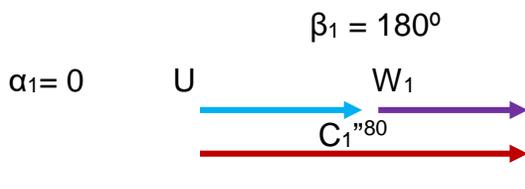
Para turbinas Pelton:

**Figura 5.** Entradas y salidas



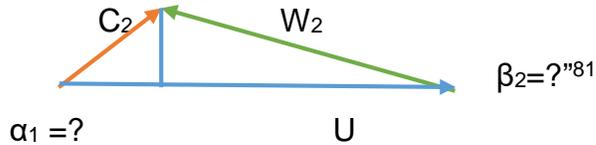
Fuente: DOMINGUEZ SANCHES. Urbano, Maquinas Hidráulicas, editorial club universitario, España, 2012. P. 228.

“Triángulo en la entrada:



80 Ídem.

**“Triángulo de salida:**



- “Al ser la trayectoria del líquido tangencial a los álabes, el diámetro a la entrada y a la salida de la rueda es el mismo, y por tanto  $U_1 = U_2$ . Si no hubiese pérdidas en el inyector, el chorro de agua saldría con una velocidad teórica  $c_1$  dada por la ecuación de Torricelli:”<sup>82</sup>.

$$“C_1 = \sqrt{2 \cdot g \cdot H_n}”$$

- Sin embargo, debido a las pérdidas la velocidad real es:

$$c_1 = \varphi_1 \sqrt{2 \cdot g \cdot H_n} \quad \varphi_1 \approx 0.97$$

- Idealmente una T. Pelton alcanza su  $\eta_{N\text{máx}}$ , cuando:

$$U_1 \approx \frac{1}{2} \cdot C_1 = 0.45 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_n}”<sup>83</sup>.$$

- “Interesa que  $c_2 = 0$  (que toda la energía cinética se aproveche), ya que la energía cinética no aprovechada en la turbina es

$$\frac{C_2}{2 \cdot g}$$

---

81 *Ibíd.*, p. 228.

82 *Ídem.*

83 *Ídem.*

- Debido al rozamiento con el álabe, se cumple que:

$$W_2 = \varphi \cdot W_1, \quad 0 < \varphi < 1$$

- Idealmente  $\alpha_1 = 0^\circ$  y  $\beta_1 = 180^\circ$ ; en la práctica  $\alpha_1 \approx 17^\circ$

$$\alpha_1 \approx 17^\circ; \beta_1 \approx 180^\circ \text{ }^{84}.$$

“Fuerza de una corriente:

$$F = m[\text{kg}] a [\text{m/s}^2] = m[\text{kg}] \frac{V[\text{m/s}]}{t[\text{s}]} = \frac{m[\text{kg}]}{t[\text{s}]} V \frac{\text{m}}{\text{s}} = \left( P \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] Q \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right] \right) V \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

$$= pQv$$

Fuerza sobre los alabes:

C: es la velocidad de fluido.

$$F = p \cdot Q \cdot (c_1 - c_2) = p \cdot Q \cdot (U_1 + W_1) - (U_2 + W_2) \text{ }^{85}.$$

“Puesto que en una turbina Pelton  $U_1 = U_2$  la expresión anterior queda como:

$$F_x = P \cdot Q \cdot (W_1 \cdot \text{COS}(\pi - \beta_1) - W_2 \cdot \text{COS}(\pi - \beta_2))$$

Ecuación de ángulos:

$$F_x = P \cdot Q \cdot (W_1 - W_2 \cdot \text{cos}(\pi - \beta_2)) \text{ }^{86}.$$

---

84 Ídem.

85 Ídem.

86 Íbid., p.228

### 2.2.8.12 Descripción de fluido

El movimiento de un fluido puede ser descrito totalmente, cuando se conoce la velocidad en el espacio de cada una de sus partículas en todo momento. Teóricamente desde el punto de vista matemático se han ideado dos procedimientos para explicar el comportamiento de la velocidad de las partículas de un fluido en cada instante. Los métodos usados se conocen con los nombres de Lagrange y Euler, este último conocido también con el nombre del teorema del transporte. El método Lagrange, intenta explicar el movimiento de una partícula de fluido, estudiando las variaciones en su trayectoria a lo largo de una línea de corriente. Por el contrario el método de Euler, pretende conocer el comportamiento de una región de un flujo de un fluido describiendo el comportamiento de una parte a través del tiempo, cuando atraviesa una zona predeterminada conocida como un volumen de control.<sup>87</sup>

“Ambos métodos permiten formular una serie de expresiones matemáticas, que explican el comportamiento de un fluido y las cuales para casos particulares pueden ser apoyadas experimentalmente con factores de correcciones, a tal punto que las aplicaciones de la mecánica de fluidos en la hidráulica han llevado a esta última a ser conocida como la ciencia de los coeficientes.”<sup>88</sup>.

### 2.2.8.13 Propiedades de los fluidos

“Flujo comprensible e incomprensible: El flujo comprensible se presenta cuando la densidad de un fluido es prácticamente constante a través del espacio, independientemente de las variaciones producidas por la temperatura y la presión. El flujo incomprensible se presenta cuando no se cumplen las condiciones anteriores.”<sup>89</sup>.

“Viscosidad: Es una medida de la resistencia de fluido al corte cuando el fluido está en movimiento. Un fluido no puede resistir esfuerzos de corte sin moverse,

---

87 DIAZ ORTIZ, Jaime. Mecánica de los fluidos e hidráulica. Primera edición. Cali: Univalle. 2006. P. 89.

88 Ídem.

89 Íbid., p. 92.

pero un sólido sí. La viscosidad se debe principalmente a las interacciones entre las moléculas del fluido.<sup>90</sup>

Volumen específico: El volumen específico de una sustancia está relacionado con el peso específico a través una ecuación, por lo que su magnitud al nivel de la superficie del as será igual que para determinar el cambio que ocurre en el volumen específico del agua de más debido al aumento de presión a causa de la profundidad, es necesario hacer uso del concepto de módulo de elasticidad,  $E_v$ . Así es posible mostrar que este resultado indica que el volumen específico del agua (es decir su densidad) varía levemente a pesar del aumento de presión. Esto es un claro ejemplo de un fluido incomparable.<sup>91</sup>

$$V_1 = \frac{1}{P} = \frac{Y}{g} = \frac{32.2(\text{pie}/s^2)}{64(\text{lb}/\text{pie}^3)} = 0.504(\text{pie}^3/s)$$

“Densidad: La densidad  $\rho$  de una sustancia se define como la cantidad de masa  $m$  por unidad de volumen que ocupa  $V$ .

$$\rho = \frac{M}{V} \text{ } ^{92}$$

“Si el fluido de una sustancia pura, la densidad puede variar con la temperatura  $T$  y la presión  $P$ . La ecuación que relaciona las distintas variables del estado de un sistema se denomina ecuación de estado. Peso específico: se define como el peso por unidad de volumen. En el sistema internacional sus unidades son  $[\text{N}/\text{m}^3]$ .

$$r = \frac{P}{V} = \frac{mg}{V} = \rho g \text{ } ^{93}$$

---

90 DUARTE A, Carlos. NIÑO V, José. Introducción a la mecánica de fluidos. Tercera edición. Bogotá D.C: Unidad académica. 2004. P. 7.

91 *Ibíd.*, P. 15.

92 GONZALEZ S, Juan. Fundamentos de mecánica de fluidos. Primera edición. Barcelona: club universitario. 2002. P. 3.

93 *Ídem.*

Siendo:

$\gamma$  = el peso específico

$P$  = el peso de la sustancia

$V$  = el volumen de la sustancia

$\rho$  = la densidad de la sustancia

$m$  = la masa de la sustancia

$g$  = la aceleración de la gravedad

Presión: la presión en un punto se define como el valor absoluto de la fuerza por la unidad de superficie a través de una pequeña superficie que pasa por ese punto y en el sistema internacional su unidad es el Pascal (1 Pa=1N/m<sup>2</sup>). En el caso de los fluidos en reposo la fuerza ejercida sobre la superficie debe ser siempre perpendicular a la superficie, ya que si hubiera un componente tangencial, el fluido fluiría. En el caso de los fluidos en movimiento, si este no es viscoso tampoco aparecen componente tangenciales de la fuerza, pero si se trata de un fluido viscoso sí que aparecen fuerzas tangenciales de movimiento.<sup>94</sup>

#### 2.2.8.14 Tipos de flujos

“Flujo estacionario/no estacionario: se dice que un flujo estacionario si la velocidad  $\vec{v}(\vec{r})$  y la densidad  $\vec{\rho}(\vec{r})$  del flujo no dependen del tiempo y no estacionario en caso contrario. Esto no quiere decir que la velocidad y la densidad deban ser las mismas en dos puntos distintos, sino que solo en un mismo punto no deben variar con el tiempo.”<sup>95</sup>.

“Flujo irrotacional-rotacional: se dice que el flujo es irrotacional cuando el elemento del fluido en un punto dado no tiene una velocidad angular neta alrededor de dicho punto, y es rotacional en caso contrario. Un fluido que circula a través de una

---

94 CRANE. Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías. Primera edición. México: McGraw-Hill. 1987. P. 3.

95 *Ibíd.*, P. 6.

tubería recta de sección uniforme sería un ejemplo simple de flujo irrotacional, mientras que un remolino en un río sería un ejemplo de flujo rotacional.”<sup>96</sup>.

“Flujo compresible-incompresible: se dice que el flujo es compresible si la densidad en el mismo varia, como por ejemplo ocurre con los gases el caso más general, mientras que se dice que un flujo es incompresible cuando la densidad apenas varía en el caso de los líquidos.”<sup>97</sup>.

“Flujo viscoso - no viscoso: se dice que el flujo es viscoso cuando aparece en él importantes fuerzas de rozamiento que no se pueden despreciar. Como consecuencia de estas fuerzas de rozamiento aparecen unas fuerzas tangenciales entre las capas del fluido en movimiento relativo y hay una disipación de energía mecánica. Por el contrario se dice que el flujo no es viscoso cuando estas fuerzas de rozamiento son muy pequeñas o bien no se tienen en cuenta.”<sup>98</sup>.

### 2.2.9. Medidores de caudal

Los medidores de volumen y caudal de fluidos han sido clasificados de diversas formas; en el sistema de clasificación más general, los medidores se separan en medidores de cantidad (totalizadores) y medidores de caudal, otra forma de clasificarlos es dividiéndolos según su principio de operación. Esta alternativa divide los medidores en aquellos que miden volúmenes discretos (medidores de desplazamiento positivo) y los que directa o indirectamente utilizan el movimiento del fluido para actuar sobre un elemento secundario. A pesar de que este sistema describe razonablemente las dos clases de medidores, en la práctica los medidores de caudal son a menudo usados como medidores de cantidad (vortex, turbinas, orificio, etc.), y los medidores de cantidad son usados en ocasiones como medidores de caudal.<sup>99</sup>

Para propósitos de calcular el caudal o el volumen total del fluido, se conoce la clasificación de los medidores en: medidores de raíz cuadrada (generadores de presión diferencia) y

---

96 *Ibíd.*, P. 7.

97 *Ibíd.*, P. 8.

98 *Ibíd.*, P. 9.

99 *Ibíd.*, P. 10.

medidores lineales, esta clasificación es más conveniente puesto que, en general, todos los medidores para los cuales el caudal no es una función de la raíz cuadrada de la presión diferencial son en esencia medidores de escala lineal. Esta clasificación provee el mismo modelo matemático para todos los medidores en cada grupo y evita la confusión en los cálculos de volumen y caudal de fluido. Aunque los medidores lineales tienen principios de operación completamente diferentes de los medidores de raíz cuadrada, las operaciones para obtener volúmenes a condiciones base y caudal másico son las mismas para los dos tipos de medidores.<sup>100</sup>

Una clasificación más particular es aquella que divide las tecnologías en categorías dependiendo de la interacción del medidor con el fluido objeto de medición: Medidores con partes móviles inmersas en el fluido (P. Ej. Medidores de desplazamiento positivo, turbina, área variable). Medidores sin partes móviles inmersas en el fluido (P. Ej. Medidores por presión diferencial, vortex, target, térmicos). Medidores de no intrusión (P. Ej. Coriolis, magnéticos, ultrasónicos). Medidores con sensores externos (P. Ej. Medidores ultrasónicos clamp-on, vertederos)<sup>101</sup>

### 2.2.9.1 Clasificación de las tecnologías de medición

Los medidores de volumen y caudal de fluidos han sido clasificados de diversas formas; en el sistema de clasificación más general, los medidores se separan en medidores de cantidad (totalizadores) y medidores de caudal, otra forma de clasificarlos es dividiéndolos según su principio de operación. Esta alternativa divide los medidores en aquellos que miden volúmenes discretos (medidores de desplazamiento positivo) y los que directa o indirectamente utilizan el movimiento del fluido para actuar sobre un elemento secundario. A pesar de que este sistema describe razonablemente las dos clases de medidores, en la práctica los medidores de caudal son a menudo usados como medidores de cantidad (vortex, turbinas, orificio, etc.).<sup>102</sup> Y los medidores de cantidad son usados en ocasiones como medidores de caudal. Para propósitos de calcular el caudal o el volumen total del fluido, se conoce la clasificación de los medidores en: medidores de raíz cuadrada (generadores de presión diferencial) y medidores lineales, esta clasificación es más conveniente puesto que, en general, todos los medidores para los cuales el caudal no es una función de la raíz cuadrada de la presión diferencial son en esencia medidores de escala lineal. Esta clasificación provee el mismo modelo matemático para todos los medidores en cada grupo y evita la confusión en los cálculos de volumen y caudal de fluido.<sup>103</sup>

“Aunque los medidores lineales tienen principios de operación completamente diferentes de los medidores de raíz cuadrada, las operaciones para obtener volúmenes a condiciones base y caudal másico son las mismas para los dos tipos

---

100 Ídem.

101 Ibíd., P. 11.

102 Ídem.

103 Ibíd., P. 12.

de medidores. Una clasificación más particular es aquella que divide las tecnologías en categorías dependiendo de la interacción del medidor con el fluido objeto de medición.”<sup>104</sup>.

“Medidores con partes móviles inmersas en el fluido (P. Ej. Medidores de desplazamiento positivo, turbina, área variable). Medidores sin partes móviles inmersas en el fluido (P. Ej. Medidores por presión diferencial, vortex, target, térmicos). Medidores de no intrusión (P. Ej. Coriolis, magnéticos, ultrasónicos). Medidores con sensores externos (P. Ej. Medidores ultrasónicos clamp-on, vertederos).”<sup>105</sup>.

“Para el número de Reynolds se utiliza la ecuación y se necesita el caudal máximo, viscosidad cinemática

$$Re = \frac{V * D}{\nu} = \frac{4 * Q_{max}}{\pi * \nu * D}$$

$V$  = Viscosidad cinemática  $m^2/s$

$0,15 \leq \beta \leq 0,75$  Para tomas de presión “en bridas”

$$\beta = \frac{d}{D} \text{ ”106.}$$

### 2.2.9.2 Ecuación de continuidad

“La ecuación de continuidad, que es esencialmente una formulación del principio de conservación de la materia, o sea, un balance de masa que iguala la velocidad

104 Ídem.

105 Ibíd., P. 13.

106 Ídem.

de variación de masa en un volumen elemental con las velocidades diferenciales de flujo tridimensional a través de sus límites.”<sup>107</sup>.

“Ecuación de tasa de flujo

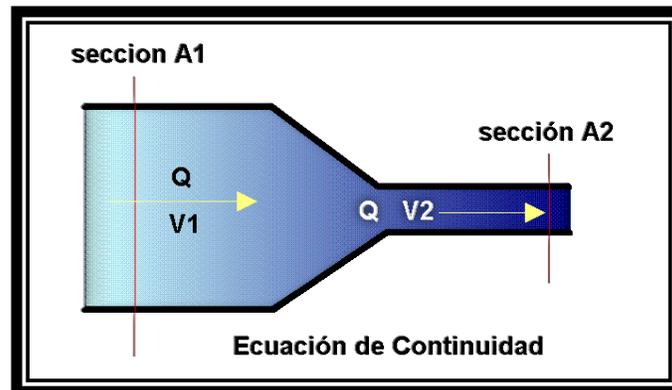
$$A_1V_1 = A_2V_2$$

$A_2$  = es el área transversal del tanque

$A_1$  = Es el área del agujero

Puesto que  $A_2$  es mucho mayor que  $A_1$   $V_1$  es mucho mayor que  $V_2$  (inicialmente  $V_2 = 0$ )”<sup>108</sup>.

**Figura 6.** Ecuación de continuidad



**Fuente:** WILSON, Jerry D. Física quinta edición, México: Pearson, 2003. P. 330.

---

107 Ídem.

108 WILSON, Jerry D. Física, quinta edición. México: Pearson. 2003. P. 330

### 2.3. MARCO HISTÓRICO

WILSON, Jerry<sup>109</sup> afirma que a principios del presente siglo solo habían dos tipos de turbina hidráulica realmente importantes: la turbina de reacción de Francis, de flujo centrípeto, y la rueda de Pelton o turbina de acción. En la turbina de Francis, que funciona completamente sumergida, el agua procedente de un serie de inyectores periféricos se dirige hacia los alabes sujetos al eje vertical giratorio. La potencia del chorro es proporcional a la altura del agua por encima de la instalación. En 1903, la empresa Canadian Niagara Power Company tenía una serie de turbinas Francis dobles que funcionaban bajo un salto de agua de 40 metros; generaban 10.000 CV a 250 revoluciones por minuto. En 1923, se habían instalado en Niagara turbinas Francis de 70.000 CV. El proyecto de embalse Grand Coulee, en el río Columbia, cuya primera fase entro en funcionamiento en 1941, incluía unidades de 115.000 CV que trabajan bajo un salto de 148 metros. Una variable de la turbina Francis es la desarrollada entre 1910 y 1924 por V́ctor Kaplan, un ingeniero checo.

WILSON, Jerry<sup>110</sup> define que el rotor horizontal se asemeja a una hélice de barco y se puede grabar el paso de las hélices durante el funcionamiento de la máquina, lo que permite una alta eficiencia con cargas variables. Rinde más bajo saltos de agua relativamente pequeños, de hasta unos 30m. Las turbinas Kaplan son relativamente caras de construir y no resultan económicas en todas las situaciones. La turbina Deriaz, desarrollada por English Electric, combina las características de ambas turbinas de acción, un chorro de agua incide sobre unos alabes curvados o cucharas de forma elipsoidal, fijadas al extremo de un rodete,

---

109 Ibid., p. 254.

que idealmente invierten por completo el flujo del agua. En las primeras máquinas las cucharas estaban atornilladas al rodete, pero a partir de 1920 el rotor empezó a fabricarse en una sola pieza fundida, innovación introducida por la empresa Gilkes de Gran Bretaña. A mediados del siglo, las mayores instalaciones de tipo Pelton en el mundo eran las de Sao Paulo en Brasil. Generaban 78.000 CV a 360 r.p.m. bajo un salto de agua de 670 m de altura.

A continuación se presentan los siguientes proyectos que permiten obtener energía eléctrica a través del principio de la hidroelectricidad, han sido de gran ayuda para realizar y tener en cuenta el tipo de prototipo que se desea implementar, los proyectos que se han tomado describen como es el uso en Colombia y en otros países el uso de prototipos de generación de energía eléctrica limpia y se describen los objetivos, como lograron cumplirlos y las debidas conclusiones.

MATAS Rubén<sup>111</sup> establece que las turbinas de Rateau y Curtis. En el pasado se han visto algunas de las turbinas de reacción y acción de Parsons y de Laval, como representantes de las principales escuelas de este tipo de máquinas. Sin embargo, a finales del siglo 19 y principios del siglo XX se produjeron otros avances al aparecer nuevas propuestas. Una de ellas fue un tipo de turbina que combinaba características de las anteriores de Parsons y de Laval. El ingeniero francés Auguste Rateau fue quien hizo los primeros desarrollos sobre este tipo de máquinas, también llamadas multicelulares de acción, ya que si bien son turbinas de acción, están compuestas de varias etapas con caídas de presión en cada una de ellas como en las turbinas de reacción.

Auguste Camille Edmond nació en Francia el 13 de octubre de 1863 hasta 1930. Desarrollo las primeras ideas sobre una turbina multiseccional de acción, inicialmente Rateau construyó una

---

110 Ídem.

111 MATAS Rubén. Bielas y alabes. Madrid: castellana. 1990. P. 190.

turbina de acción del tipo DE LAVAL con unos alabes con forma similar a las palas de la turbinas Pelton. Como Parsons, rateau propuso realizar la explotación en varias etapas, pero a diferencia de las turbinas de aquel, este sugirió que cada etapa estuviese separada de sus vecinas mediante diafragmas. Las ideas de rateau se plasmaron rápidamente en patentes; en España rateau presento cerca de veinte patentes de clases de turbinas.<sup>112</sup>

“Las presas y los canales eran necesarios para la instalación de ruedas hidráulicas sucesivas cuando el desnivel era mayor de cinco metros. La construcción de grandes presas de contención todavía no era posible; el bajo caudal de agua durante el verano y el otoño, unido a las heladas en invierno, obligaron a sustituir las ruedas hidráulicas por máquinas de vapor en cuanto se pudo disponer de carbón.”<sup>113</sup>

Mariana Isolve<sup>114</sup> señala que la primera central hidroeléctrica se construyó en 1880 en Northumberland, Gran Bretaña. El renacimiento de la energía hidráulica se produjo por el desarrollo del generador eléctrico, seguido del perfeccionamiento de la turbina hidráulica y debido al aumento de la demanda de electricidad a principios del siglo XX. En 1920 las centrales hidroeléctricas generaban ya una parte importante de la producción total de electricidad. La tecnología de las principales instalaciones se ha mantenido igual durante el siglo XX.

A principios de la década de los noventa, las primeras potencias productoras de hidroelectricidad eran Canadá y Estados Unidos. Canadá obtiene un 60% de su electricidad de centrales hidráulicas. En todo el mundo, la hidroelectricidad representa aproximadamente la cuarta parte de la producción total de electricidad, y su importancia sigue en aumento. Los países en los que constituye fuente de electricidad más importante son Noruega (99%), República Democrática del Congo (97%) y Brasil (96%). La central de Itapúa, en el río Paraná, está situada entre Brasil y Paraguay; se inauguró en 1982 y tiene la mayor capacidad generadora del mundo.<sup>115</sup>

---

112 *Ibíd.*, p. 191.

113 ISOLVE Mariana. Historia de la ciencia y la tecnología, cultura tecnológica. México: limusa, 2000.P. 38.

114 *Ídem.*

115 *Ibíd.*, P. 40.

DEPPERT, W<sup>116</sup> explica que el aire comprimido es una de las formas de energía más antiguas que conoce y utiliza el hombre para reforzar sus recursos físicos. Se sabe que la primera persona que utilizó la neumática como un elemento de trabajo, fue el griego KTESIBIOS aproximadamente hace dos mil años, cuando construyó la primera catapulta de aire comprimido. Desde el tiempo de los griegos de utiliza o procede la expresión Pneuma, que significa “lo etéreo”, lo puro, el alma de los cuatro elementos fundamentales: aire, agua, tierra y fuego. A pesar de que las características de la neumática aparecen dentro de los más antiguos conocimientos de la raza humana, hasta el siglo no fue sino hasta el siglo pasado cuando empezaron a realizarse investigaciones más profundas acerca de su comportamiento y reglas. La neumática se refiere al movimiento del aire y es así como en sus comienzos, el hombre utilizó el viento en navegación y en el uso de los molinos para tareas de molienda de grano y en tareas de bombeo de agua.

En el año de 1868, el señor George Westinghouse creó el freno de aire que revolucionó la seguridad en el tema de transporte de vías de trenes, pero no fue sino hasta 1950 que la neumática empieza su pleno desarrollo en la industria. Los sistemas que utilizan aire comprimido empezaron a suministrar movimiento utilizando cilindros y motores que son aplicados en herramientas, posicionadores, martillos neumáticos, motores neumáticos, entre otros, presentando en estos bajos costos.<sup>117</sup>

“Eventualmente y con el paso de los años, la neumática se desarrolló y trajo ventajas, tales como los bajos costos de componentes, su facilidad en el diseño e implementación y sobre todo la fuerza que puede desarrollar en bajas presiones lo que se traduce en factores de seguridad.”<sup>118</sup>.

---

116 DEPPERT, W. STOOL, K .neumática básica. Barcelona, España. Marcombo, S.A. 2000. P. 16.

117 Ibíd., P. 17.

118 Ídem.

## **2.4. MARCO LEGAL**

### **2.4.1. Sistemas de energías alternativas en Colombia bajo la ley 1715.**

#### **2.4.1.1 Ley 1715 del 13 de mayo de 2014, integración de energías renovables no convencionales al sistema energético nacional.**

“La ley 1715 de mayo de 2014, obedece a la necesidad de generación de energía eléctrica con sistemas no tradicionales, donde se destaca la necesidad de promover el desarrollo y utilización de fuentes no convencionales de energía orientada a mitigar la generación de emisión de gases de efecto invernadero y atender la demanda creciente de energía eléctrica del país.”<sup>119</sup>

“Los grandes desafíos para promover y aumentar la inversión en este tipo de proyectos de fuentes de energía no renovables, se tratan de reducir buscando incentivos económicos establecidos en esta ley y que a su vez generen investigación y desarrollo de tecnologías limpias para producción de energía eléctrica.”<sup>120</sup>.

“Con la publicación y puesta en marcha de la ley 1715, Colombia da cumplimiento a compromisos adquiridos en la aprobación del estatuto de la agencia internacional de energías renovables (IRENA), que buscan concientizar a las diferentes naciones de la importancia de investigar y desarrollar fuentes de energía no convencionales para mejorar el medioambiente y todo lo que este contempla.”<sup>121</sup>.

---

119 Ministerio de minas y energía. Integración de las energías renovables. Reglamento interno ley 1715. Bogotá D.C, 2014. P. 2.

120 Ídem.

“El gobierno nacional mediante esta ley faculta a los diferentes ministerios involucrados en el tema medioambiental y energético a publicar las políticas y condiciones legales aplicables para el desarrollo de proyectos enfocados en la implementación de sistemas de energía no convencionales auto sostenible en el tiempo.”<sup>122</sup>.

- Artículo 1°.

#### Objeto.

La presente ley tiene por objeto promover el desarrollo y la utilización de las fuentes no convencionales de energía, principalmente aquellas de carácter renovable, en el sistema energético nacional, mediante su integración al mercado eléctrico, su participación en las zonas no interconectadas y en otros usos energéticos como medio necesario para el desarrollo económico sostenible, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y la seguridad del abastecimiento energético. Con los mismos propósitos se busca promover la gestión eficiente de la energía, que comprende tanto la eficiencia energética como la respuesta de la demanda.<sup>123</sup>

- Artículo 2°.

#### Finalidad de la ley.

Esta ley establece el marco legal y los instrumentos para la promoción del aprovechamiento de las fuentes no convencionales de energía, principalmente aquellas de carácter renovable, lo mismo que para el fomento de la inversión, investigación y desarrollo de tecnologías limpias para producción de energía, la eficiencia energética y la respuesta de la demanda, en el marco de la política energética nacional. Igualmente, tiene por objeto establecer líneas de acción para el cumplimiento de compromisos asumidos por Colombia en materia de energías renovables, gestión eficiente de la energía y reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, tales como aquellos adquiridos a través de la aprobación del estatuto de la Agencia Internacional de Energías Renovables (Irena) mediante la Ley 1665 de 2013.<sup>124</sup>

---

121 Ídem.

122 Ídem.

123 Ibíd., P. 4.

124 Ibíd., P. 9.

## **2.5. MARCO AMBIENTAL**

### **2.5.1. Normas técnicas ambientales en Puertos- Acuerdo ministerial 155-2007**

#### **2.5.1.1 Norma para la prevención y control de la contaminación ambiental del recurso agua en centrales termoeléctricas**

El presente Anexo Normativo Técnico Ambiental, que es complementario al Anexo 1 Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes: Recurso Agua, del Libro VI De La Calidad Ambiental, del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente, y que se somete a sus disposiciones, es dictado al amparo de la Ley de Gestión Ambiental, del Reglamento a la Ley de Gestión Ambiental para la Prevención y Control de la Contaminación Ambiental y del Reglamento Ambiental para Actividades Eléctricas. El presente instrumento es de aplicación obligatoria en las centrales de generación termoeléctrica en todo el territorio nacional.<sup>125</sup>

#### **Objeto**

La presente normativa tiene como objetivo principal proteger la calidad del recurso agua, para salvaguardar la salud e integridad de las personas así como proteger el equilibrio de los ecosistemas acuáticos involucrados en las actividades de generación eléctrica. Al efecto, se establecen los criterios técnicos ambientales para prevenir y controlar la contaminación del agua y los requerimientos de las descargas vinculadas a los procesos de generación de energía eléctrica o cogeneración en centrales termoeléctricas durante la operación, mantenimiento y abandono o retiro.<sup>126</sup>

- Autoridad ambiental de aplicación responsable (AAAR) El Consejo Nacional de Electricidad

---

125 NORMAS TECNICAS AMBIENTALES. Puertos. Ministerio de protección social. Bogotá D.C, 2005. P. 5.

126 Ídem.

“Aguas de escorrentía, es el flujo de agua que se conduce y escurre superficialmente sin infiltrarse, a través de un área pavimentada o sin pavimentar. El agua de escorrentía arrastra y lava los sólidos que se encuentran a su paso.”<sup>127</sup>.

- Normas de aplicación general

Conforme lo establece el Reglamento Ambiental para las Actividades Eléctricas (RAAE), todo nuevo proyecto, obra o instalación destinada a la generación de energía eléctrica, cuyas capacidades o dimensiones sean iguales o mayores a 1 MW de capacidad de generación de energía deberá contar con un Estudio de Impacto Ambiental. El estudio de Impacto ambiental que incluye un plan de Manejo Ambiental deberá asegurar que el proyecto propuesto cumplirá desde el inicio con lo establecido en el Reglamento para Actividades Eléctricas, el Reglamento a la Ley de gestión ambiental para la prevención y control de la Contaminación Ambiental.<sup>128</sup>

- Operativas.

“Los regulados se someterán a las disposiciones del Texto Unificado de legislación Ambiental Secundaria del Ministerio del Ambiente, Reglamento para la Prevención y Control de la Contaminación y sus Normas Técnicas y del Reglamento Ambiental para Actividades Eléctricas con el objeto de evitar y prevenir la contaminación de cuerpos de agua superficiales y/o subterráneos, así como la afectación de ecosistemas en el área de influencia de las instalaciones.”<sup>129</sup>

#### **2.5.1.2 Normas para el manejo de las descargas de aguas residuales provenientes de la generación de energía.**

“Las descargas provenientes de sistemas de enfriamiento de los condensadores de centrales termoeléctricas que operan con tecnología de calderos de vapor, las

---

127 *Ibíd.*, P. 8.

128 *Ídem.*

129 *Ídem.*

cuales debido a los volúmenes de agua manejados durante el proceso, deberán ser dispuestas en el mismo cuerpo de agua del cual se realiza la captación.”<sup>130</sup>.

“El agua de enfriamiento de los condensadores deberá cumplir previo a su descarga con los límites máximos permisibles establecidos en el presente anexo normativo en las tablas 2 ó 3 según corresponda, además de los criterios establecidos en la Tabla 4 en el cuerpo receptor hacia el que se produce la descarga.”<sup>131</sup>.

“Las descargas de aguas residuales industriales generadas al interior de centrales de generación termoeléctrica deberán cumplir al menos con los límites permisibles de descarga especificados y Los efluentes ácidos o alcalinos que se generan en los procesos de producción de agua desmineralizada o tratada empleada para la generación de energía deberán cumplir con los límites permisibles de descarga.”<sup>132</sup>.

---

130 *Ibíd.*, p. 15.

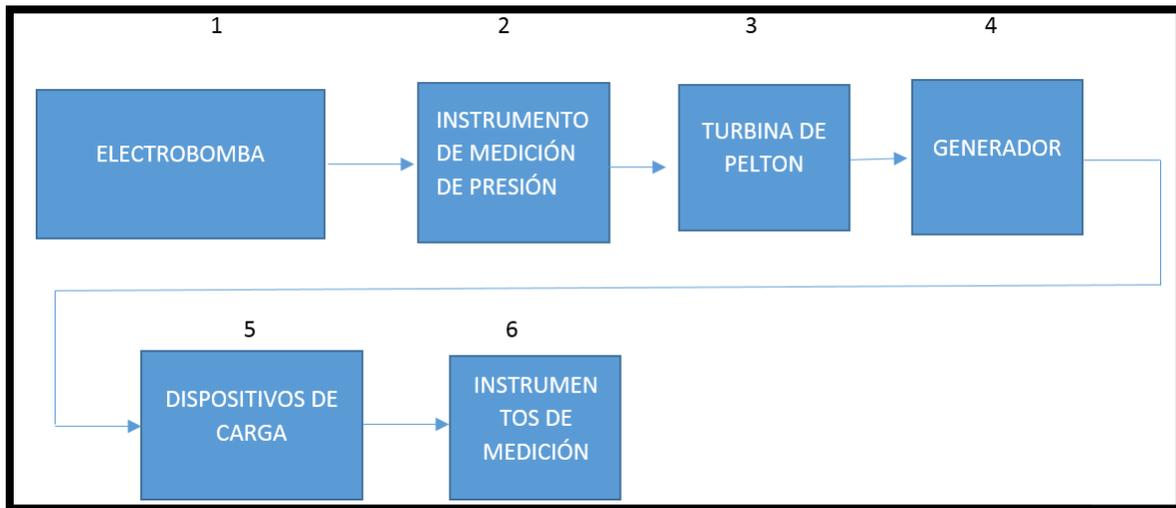
131 *Ídem.*

132 *Ídem.*

### 3. DESARROLLO DEL TRABAJO DE GRADO

A continuación se muestra el diagrama de bloques del proyecto, Figura 6. Se observa que se compone de seis bloques principales los cuales se describen a continuación.

**Figura 7.** Diagrama de bloques del banco con Turbina de Pelton



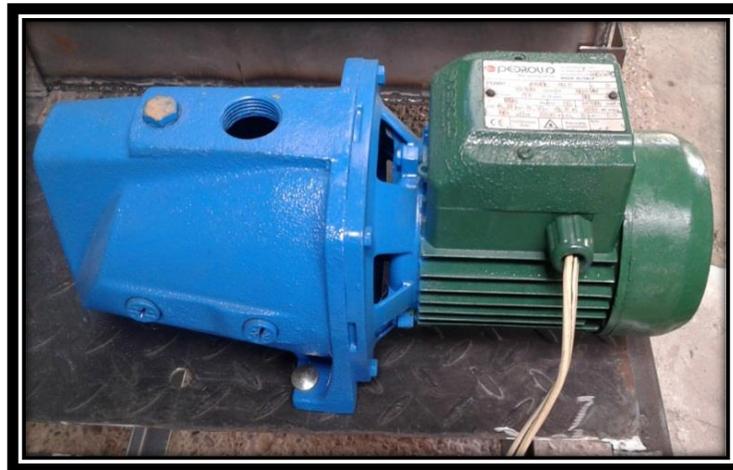
Fuente: Autores

#### 3.1.1. Bloque 1. Electrobomba

En esta etapa, se emplea un bomba de presión hidráulica, su función consiste en aumentar o disminuir dicha presión a rangos bajos o elevados, a través de una

carga en el sistema, la cual se utilizara en la turbina Pelton dándole así una uniformidad al proceso hidráulico, Figura 7. Está ubicada a un costado de la electrobomba, donde se especifican, los valores a tener en cuenta a la hora de hacer cálculos, conexiones eléctricas o colocarla en funcionamiento, estos valores son indispensables, porque dan una guía para tener en cuenta a la hora de utilizarla.

**Figura 8.** Electrobomba.



**Fuente:** Autores

**Tabla 2.** Datos nominales de la electrobomba.

<b>Especificaciones generales</b>	
Potencia	1 HP
Tensión/ Frecuencia	120 V / 60 Hz
Velocidad	3450 rpm
Flujo máximo	116 L /min

Altura máxima	36 m
Máxima profundidad	8 m
∅ entrada / salida	1 NPT
Ciclo de trabajo	50 min, de trabajo X 20 min. De descanso
Máximo Diario	6 Horas

**Fuente:** Autores

La tabla cuatro describe las características de la bomba, las cuales son de gran importancia puesto que permiten que la persona que manipula la turbina, tenga una visión clara y no sobre esforzar la bomba y deteriorar o dañar algún elemento mecánico o eléctrico de la bomba.

La electrobomba debe estar anclada a la mesa metálica, que debe soportar aproximadamente 103 kilogramos, incluyendo el peso del agua, la turbina, rodamientos y demás elementos. Por esta razón, se construye con acero estructural ASTM-A-36, contiene un orificio cuadrado, la cual lleva ángulos o perfiles reforzados, donde se coloca la caja de la turbina Pelton y demás conexiones necesarias, con una altura de 55cm, una profundidad de 1.00m, y un ancho de 52 cm. La mesa se muestra en la Figura 9.

**Figura 9.** Mesa de la turbina Pelton.



**Fuente:** Autores

### **3.1.2. Bloque 2. Instrumentos de medición de presión**

El manómetro es el instrumento de medición, que permite recolectar los datos de las presiones que se presentan en el sistema, de acuerdo a la funcionalidad de la electrobomba. Para ubicar correctamente el manómetro en la tubería galvanizada, es necesario perforar la tubería y soldar una tuerca fija para acoplar correctamente el manómetro, la soldadura empleada es E6013 west arco superior, el proceso de soldadura no debe quedar con grietas para evitar futuras fugas y pérdidas de presión.

**Figura 10.** Manómetro



Fuente: Autores

**Tabla 3.** Datos nominales manómetro

Rango de presión	
Bar	PSI
0-1	0-15
0-2	0-30
0-4	0-60
0-7	0-100
0-10	0-150
0-14	0-200
0-20	0-300
0-40	0-600
0-70	0-1000
0-100	0-1500
0-140	0-2000

**Fuente:** autores

**Tabla 4.** Descripción manómetro

<b>Uso</b>	Para aire, agua, aceite y fluidos compatibles con la conexión y mecanismo. Recomendada para usos industriales, donde no hay vibración y golpes de ariete. Caja: Acero esmaltado negro o polipropileno negro.
<b>Caja</b>	Acero esmaltado negro o polipropileno negro
<b>Mecanismo</b>	Bronce
<b>Diámetro esfera</b>	2 ½" (63mm) o 4" (100mm)
<b>Escala</b>	Doble psi / bar o bar / psi
<b>Conexión</b>	de 1/4" o 1/2" inferior (radial) o posterior de bronce

**Fuente:** autores

### 3.1.3. Bloque 3. Construcción Turbina

Los alabes son piezas independientes las cuales están diseñadas para recibir el empuje directo del chorro de agua y cada alabe lleva en su extremo exterior un corte en forma de "w" para que así el alabe no reciba el chorro de agua, hasta que su arista se encuentre en posición perpendicular respecto al eje del chorro. Los alabes permiten el giro del eje transmisor de potencia, este eje está fabricado en acero AISI SAE4140, es un acero fabricado para soportar grandes esfuerzos, se encuentran debidamente atornilladas las cucharas y a si permiten el desarrollo correcto de la práctica.

**Figura 11.** Alabes ensamblados dentro de la caja de almacenamiento del agua



**Fuente:** Autores

Para construir la turbina se realizan los siguientes cálculos.

**Tabla 5.** Datos del Rodete

Diámetro de chorro	d	0.01905 m
Anchura de la cazoleta	b	0.375 m
Altura de la cazoleta	h	0.150 m
Profundidad de la cazoleta	f	0.10 m

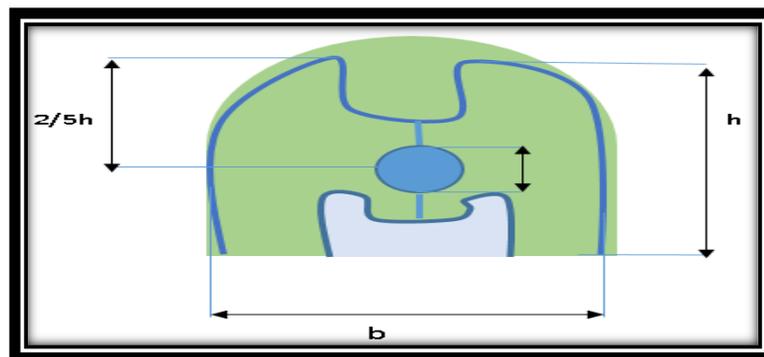
Diámetro del rodete	D	0.10m
---------------------	---	-------

**Fuente:** Autores

“Es la pieza clave donde se transforma la componente cinética de la energía del líquido en energía mecánica o, dicho de otra manera, en trabajo según la forma de movimiento de rotación. Está compuesto por: Rueda motriz, Alabes, cucharas o cazoletas.”<sup>133</sup>

“La Rueda motriz, está unida rígidamente al eje, montada en el mismo por medio de chavetas y anclajes adecuados. Los alabes pueden ser piezas independientes o constituir una pieza única, están diseñados para recibir el empuje directo del chorro de agua.”<sup>134</sup>

**Figura 12.** Rodete



133 DOMINGUEZ, op. Cit, p. 223.

134 Ídem.

DOMINGUEZ SANCHES. Urbano, Maquinas Hidráulicas, editorial club universitario, España, 2012. P.229.

$$N^{\circ} \text{ cazoletas} = 15 + \frac{D}{2 \cdot d}$$

$$\text{Si : } 5 < \frac{d}{D} < 6.5$$

- Componente: Rodete.

$$n_s = n \cdot \frac{pot^{1/2}}{H^{5/4}}$$

$$n_s = 3,65 \cdot n \cdot \frac{Q^{1/2}}{H^{3/4}} \cdot \sqrt{n}$$

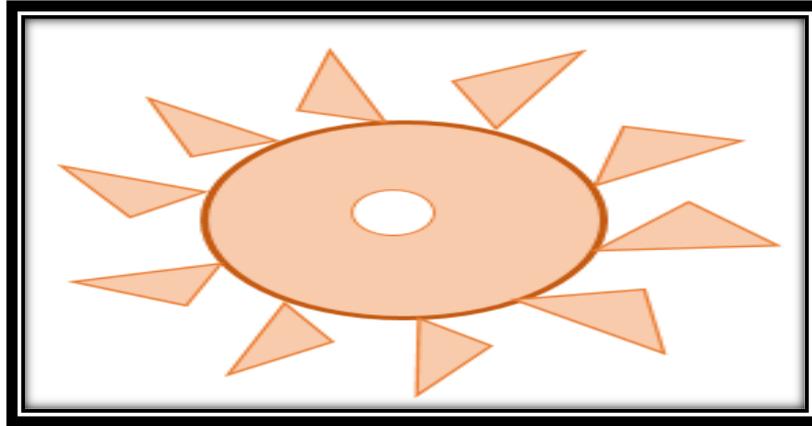
Donde D es el diámetro del rodete el cual permite juntos con una constante y el diámetro de chorro (d) calcular en número de alabas que requiere la turbina, en el caso actual son 5,  $n_s$  es la velocidad específica de la turbina, H es la altura, Q es el caudal, en el momento de realizar la división del diámetro de chorro y del diámetro del rodete el resultado no puede ser menor que 5 ni mayor que 6.5. Para determinar la velocidad específica  $n_s$ , en el presente caso se utiliza un rodete lento debido a que el caudal es pequeño.

**Figura 13.** Rodete lento.

Rodete lento,  $n_s = 3.5$

(Pequeños caudales)

$\frac{d}{D}$  Es pequeño



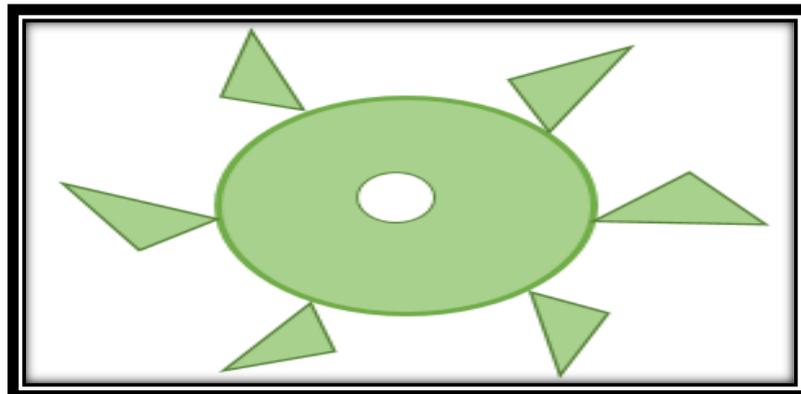
Fuente: Autores

**Figura 14.** Rodete rápido.

Rodete rápido,  $ns = 35$

(Grandes caudales relativos)

$\frac{d}{D}$  Es grande



Fuente: Autores

### 3.1.4. Adecuación y características del generador

**Figura 15.** Generador.



**Fuente:** Autores

Es el que toma o recoge la energía mecánica, transmitida por la turbina a través de la presión de agua en el rodete, el cual hace su movimiento de rotación hacia las poleas y luego esa energía pasa al generador que la guarda en energía eléctrica

- **Placa del generador.**

Es donde se origina todas las especificaciones del generador y sus diferentes características de valores relacionados dependiendo la capacidad, con la corriente D.C, los amperajes, las RPM “revoluciones por minuto”, el sistema de rotativo del generador etc.

**Tabla 6.** Datos del generador

<b>MOTOR DC</b>	
Modelo	C3364B31112

Marca	ICON P/N
Intensidad	19.5 A
Rpm	65552
Potencia nominal	1.75 HP
Potencia máxima	2.75 HP
Voltaje	100 VDC

**Fuente:** Autores

### 3.1.4.1 Cálculos del sistema

El caudal de la electrobomba trabajando en un 100% de su capacidad es de 55 l/m. La ecuación de continuidad.

$$V_1 * A_1 = V_2 * A_2$$

$$A_1 V_1 = A_2 V_2$$

$A_2$  = es el área transversal del tanque

$A_1$  = Es el área del agujero

Para el desarrollo del presente proyecto es sumamente elemental aplicar la ecuación de continuidad por que la velocidad con la que se mueve el fluido por el tubo de sección trasversal variable es inversamente proporcional al área de sección transversal del tubo por eso se utiliza la relación de  $V_1 * A_1 = V_2 * A_2$ , donde están representadas las áreas y volúmenes de sistema.

Puesto que  $A_2$  es mucho mayor que  $A_1$   $V_1$  es mucho mayor que  $V_2$  (inicialmente  $V_2 = 0$ )<sup>135</sup>

---

135 WILSON, Jerry D. Física quinta edición, México: Pearson, 2003, 330 p

$$Q = V * A$$

Donde Q representa el caudal, V representa el volumen y A representa el área

El diámetro de la tubería de la descarga de la electrobomba

$$d = 0.01905 \text{ m}$$

Para determinar el volumen que pasa debajo del área del agujeró es necesario conocer el caudal realizando el debido cálculo se deja pasar aproximadamente por un minuto el flujo constante una vez transcurrido el minuto se cierra la llave y se mide la cantidad de líquido, de este modo se obtienen 55 litros/minuto.

$$V1 = \frac{Q}{A} \quad V1 = \frac{55 \text{ Lt}/\text{min}}{\frac{\pi D^2}{4}}$$

Para determinar el área de una circunferencia, se debe conocer el área de la tubería de descarga, se realiza la medida con un pie de rey y se obtiene un área de 0.01905 m, el resultado es multiplicado por el número  $\pi$  y dividido por la constante 4.

$$A1 = \frac{\pi d^2}{4}$$

$$A1 = \frac{\pi(0.01905)^2}{4}$$

$$A1 = 2.8502 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

Como el caudal son 55 lt/min se deberán pasar a m<sup>3</sup>/s

$$\frac{55 \text{ lt}}{\text{min}} * \frac{0.001 \text{ m}^3}{41 \text{ lt}} * \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} = 9.17 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$V1 = \frac{9.17 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}}{\frac{\pi(0.01905 \text{ m})^2}{4}} \quad V1 = 3.2159 \text{ m/s}$$

$$A2 = \frac{\pi(0.008 \text{ m})^2}{4}$$

$$A2 = 5.0265 \times 10^{-5} \text{ m}^2$$

$$V1 = \frac{V_1 * S_1}{S_2} \quad V1 = \frac{3.2159 \frac{\text{m}}{\text{s}} * 2.850 \times 10^{-4} \text{ m}^2}{5.0265 \times 10^{-5} \text{ m}^2}$$

$V1 = 18.23 \text{ m/s}$  **APERTURA DE LA VALVULA AL 100%**

**APERTURA DE LA VALVULA AL 75%**

$$\frac{9}{19} \text{''} = 0.5625 = 0.0142875 \text{ m}$$

$$A1(75\%) = \frac{\pi(0.0142875 \text{ m})^2}{4} = 1.603254 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$V1(75\%) = \frac{9.166 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}}{1.603254 \times 10^{-4} \text{ m}^2} = 5.7171 \text{ m/s}$$

$$V2(75\%) = \frac{\frac{5.7171 \text{ m}}{\text{s}} * 1.603254 \times 10^{-4} \text{ m}^2}{5.0265 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}} = \text{m/s}$$

**APERTURA DE LA VALVULA AL 50%**

$$\frac{3}{8}'' = 0.375 = 9.525 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$A1(50\%) = \frac{\pi(9.525 \times 10^{-3} \text{ m})^2}{4} = 7.1255739 \times 10^{-5} \text{ m}^2$$

$$V1(50\%) = \frac{9.166 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}}{7.1255739 \times 10^{-5} \text{ m}^2} = 12.8635 \text{ m/s}$$

$$V2(50\%) = \frac{\frac{12.8635 \text{ m}}{\text{s}} * 7.1255739 \times 10^{-5} \text{ m}^2}{5.0265 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}} = 18.235 \text{ m/s}$$

#### APERTURA DE LA VALVULA AL 25%

$$\frac{3}{16}'' = 0.1875 = 4.7625 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$A1(25\%) = \frac{\pi(4.7625 \times 10^{-3} \text{ m})^2}{4} = 1.781393 \times 10^{-5} \text{ m}^2$$

$$V1(25\%) = \frac{9.166 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}}{1.781393 \times 10^{-5} \text{ m}^2} = 51.454 \text{ m/s}$$

$$V2(25\%) = \frac{\frac{51.454 \text{ m}}{\text{s}} * 1.781393 \times 10^{-5} \text{ m}^2}{5.0265 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}} = 18.237 \text{ m/s}$$

- **Calculo de las revoluciones por minuto**

Las revoluciones por minuto se hallaron por medio de la regla de tres debido a que no se contaba con un tacómetro

$$RPM(25\%) = \frac{6550 \text{ RPM} * 1.7V}{100 \text{ VDC}} = 111.4 \text{ RPM}$$

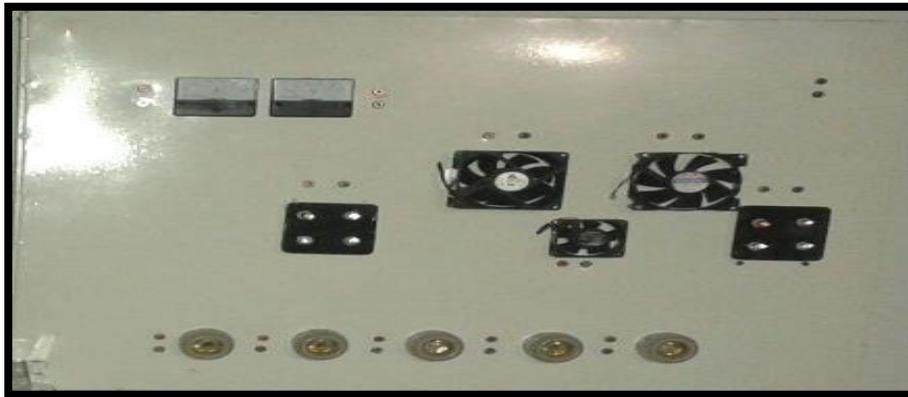
$$RPM(50\%) = \frac{6550 \text{ RPM} * 11.72V}{100 \text{ VDC}} = 768 \text{ RPM}$$

$$RPM(75\%) = \frac{6550 \text{ RPM} * 13V}{100 \text{ VDC}} = 852 \text{ RPM}$$

$$RPM(100\%) = \frac{6550 \text{ RPM} * 12.57V}{100 \text{ VDC}} = 824 \text{ RPM}$$

### 3.1.5. Paso 5. Dispositivos de carga

**Figura 16.** Elementos eléctricos



**Fuente:** Autores

Los elementos eléctricos juegan un papel muy importante para el desarrollo del proyecto, debido a que en ellos se pueden tomar las lecturas y así determinar la funcionalidad del prototipo para la generación de la electricidad, los ventiladores de 250 y 25 mA, son puesto a prueba una vez se enciende la turbina y presentan movimiento normal, estos ventiladores son usados para la refrigeración de pequeños equipos como consolas de video juegos, equipos de cómputo entre otros. Se utilizan para las pruebas los bombillos leds, los cuales hoy en día son utilizados en avisos publicitarios, adornos, advertencias entre otros, y por ultimo

plafones de 12V, que permiten generar luminosidad una vez son ubicados en la turbina.

Con una apertura de la valvula del 25% el generador gira a 111.2 revoluciones por minuto y genera una tensión lineal de 1.7V, la velocidad de es de 51,45 lt/min, la tensión en los bombillos rojos es de 0,97 voltios, en los bombillos verdes es de 1.6 voltios, en el ventilador A es de 1.42V y en el ventilador B es de 0.78 voltios.

**Figura 17.** Prueba de encendido leds

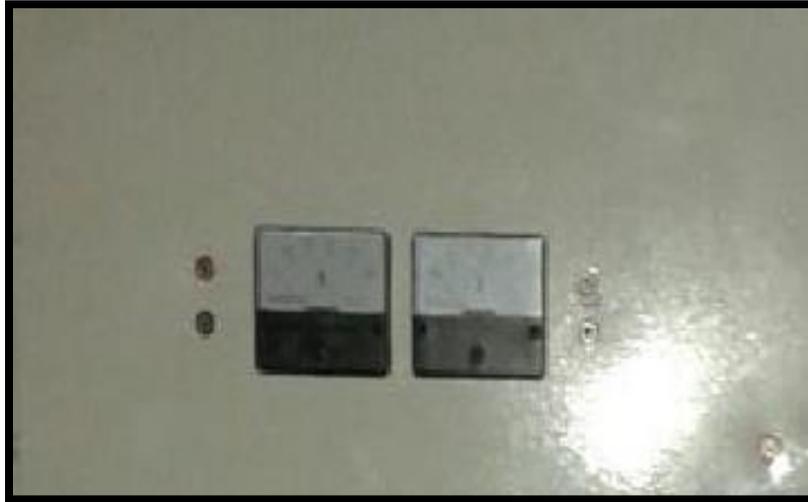


**Fuente:** Autores

En la figura se observa una prueba realizada la cual permite la generación de energía y el encendido de los bombillos leds, con una apertura de la valvula del 50% el generador gira a 768 revoluciones por minuto y genera una tensión lineal de 11.7V, la velocidad de salida es de 12.85 lt/min, la tensión en los bombillos rojos es de 10.84 voltios, la tensión en los bombillos verdes es de 10.56 voltios. Con una apertura de la valvula del 75% el generador gira a 852 revoluciones por minuto y genera una tensión lineal de 13V, la velocidad de salida es de 5.72 lt/min, la tensión en los bombillos rojos es de 11.62 voltios, la tensión en los bombillos verdes es de 12.13 voltios.

### 3.1.6. Paso 6. Instrumentos de medición amperímetro y voltímetro análogo

**Figura 18.** Voltímetro y amperímetro análogos



**Fuente:** Autores

El ensamble del amperímetro y el voltímetro se realizan una vez terminadas todas las conexiones eléctricas. La tabla 8, 9 y 10, permiten describir las características del multímetro y del amperímetro como también los resultados arrojados durante las pruebas que se desarrollaron en la turbina de Pelton, los datos reflejan concordancia y demuestran que la turbina de Pelton funciona correctamente

**Figura 19.** Amperímetro analógico



**Fuente:** Medida y Control eléctrico, Instrumentación analógica, Barcelona: reverté, 2001. P. 393.

“Es utilizado en aplicaciones de corriente alterna para controlar el estado de la corriente de una forma muy rápida y visual. Permite un sistema de medición HM, BM, la fijación se realiza en un panel o carril DIM, las especificaciones están dadas como miliamperímetro para HM de tipo EC con un rango de 100-600 mA, un tamaño en mm de 48\*48\*,72\*72 y un ángulo de escala de 90°.”<sup>136</sup>

“Para el sistema BM, se emplea la fijación por medio del carril DIM las especificaciones es utilizar con conmutador, el tipo es EZC, con un tamaño en mm de 96\*96,144\*144 y ángulo de escala de 240°.”<sup>137</sup>

### Tabla 7. Características amperímetro análogo

136 MEDIDA Y CONTROL ELÉCTRICO. Instrumentación analógica, Barcelona: reverté, 2001. P. 393.

137 Ídem.

Sistema de medición	Fijación	Especificaciones	Tipo	Rango	Tamaño mm	Angulo escala
HM	Panel	Miliamperímetro	EC	100-600 mA	48*48*,72*72	90°
BM	Carril DIM	Con conmutador	EZC	5-100/5A	96*96,144*144	240°
		Con relés	EC. FA	5A	72*72,96*96	90°
			CEC	5-60A-60mV	96*96	90°

FUENTE: Autores

Figura 20. Voltímetro analógico.



Fuente: Medida y Control eléctrico. Instrumentación analógica. Barcelona: reverté, 2001.P. 415.

“Aplicados en corriente alterna para controlar el estado de la tensión de una forma muy rápida y visual. El amperímetro consta de una alimentación auxiliar con fijación EC, de tipo EZC y tipo EC-FA y un angulo CEC 96 con relés. El consumo es de 0.3-1.5vA con un angulo 0.2 V.A, la frecuencia que maneja es 20-100Hz con

un angulo de 45-65 Hz, las sobrecargas son de 1.2 permanente 5/ durante 30<sub>s</sub> 10/ durante 1<sub>s</sub> y una temperatura de + 10...+30°C -25...+40°C.”<sup>138</sup>

**Tabla 8.** Características voltímetro análogo

Sistema de medición	Fijación	Especificaciones	Tipo	Tipo 2	Angulo
Alimentación auxiliar	EC	EM	EZC	EC-FA	CEC 96 con relés
Consumo	–	–	–	–	230V .c.a
Frecuencia	–	–	–	–	2.5 V.A
Circuito entrada					
consumo	0.3-1.5vA				0.2 V.A
frecuencia	20-100Hz				45-65 Hz
Sobrecargas	1.2 permanente 5/ durante 30 <sub>s</sub> 10/ durante 1 <sub>s</sub>				1.2/ <sub>n</sub> permanente
Temperatura	+ 10...+30°C -25...+40°C				+5...+55°C -25...+75°C
Tensión aislamiento	2Kv, 50Hz,				3Kv, 50Hz

FUENTE: Autor

---

138 Ibid., p. 394.

#### 4. RESULTADOS

El desarrollo del proyecto arroja el debido diagrama de bloque que permite describir el paso a paso de la funcionalidad y construcción de la turbina de Pelton, los libros y demás fuentes de información permiten determinar las partes y accesorios de la turbina entre los cuales se destacan, la estructura metálica, la turbina, el generador, la electrobomba, los instrumentos de medición entre otros.

Las ecuaciones suministradas han determinado los valores necesarios para realizar las piezas y elementos que no se compraron, se realizan los cálculos donde se arrojan valores aceptables y constatan el buen funcionamiento de la turbina.

**Tabla 9.** Datos obtenidos

%apertura	Generador [Rpm]	Tensión línea[v]	Velocidad de salida	Tensión Bombillos Rojos [v]	Tensión Bombillos Verde [v]	Tensión de ventilador A [v]	Tensión de ventilador B [v]
0	0	0	0	0	0	0	0
25	111.4	1.7	51.45	0.97	1.06	1.42	0.78
50	768	11.7	12.86	10.84	10.56	8.12	7.98
75	852	13	5.72	11.62	12.13	11.34	9.95
100	824	12.57	18.23	12.3	11.18	4.81	5.68

**Fuente:** autores

Con una apertura de la válvula del 25% el generador gira a 111.2 revoluciones por minuto y genera una tensión lineal de 1.7V, la velocidad de es de 51,45 lt/min, la

tensión en los bombillos rojos es de 0,97 voltios, en los bombillos verdes es de 1.6 voltios, en el ventilador A es de 1.42V y en el ventilador B es de 0.78 voltios.

En la tabla nueve se observa una prueba realizada la cual permite la generación de energía y el encendido de los bombillos leds, con una apertura de la valvula del 50% el generador gira a 768 revoluciones por minuto y genera una tensión lineal de 11.7V, la velocidad de salida es de 12.85 lt/min, la tensión en los bombillos rojos es de 10.84 voltios, la tensión en los bombillos verdes es de 10.56 voltios en el ventilador A es de 8.12V y en el ventilador B es de 7.98 voltios. Con una apertura de la valvula del 75% el generador gira a 852 revoluciones por minuto y genera una tensión lineal de 13V, la velocidad de salida es de 5.72 lt/min, la tensión en los bombillos rojos es de 11.62 voltios, la tensión en los bombillos verdes es de 12.13 voltios, en el ventilador A es de 11.34V y en el ventilador B es de 9.95 voltios.

Con una apertura de la valvula del 100% el generador gira a 824 revoluciones por minuto y genera una tensión lineal de 12.57V, la velocidad de salida es de 18.23 lt/min, la tensión en los bombillos rojos es de 12.3 voltios, la tensión en los bombillos verdes es de 11.18 voltios en el ventilador A es de 4.81V y en el ventilador B es de 5.68 voltios.

**Tabla 10.** Datos arrojados en las resistencias de las bombillas

Resistencia bombillos Verde [ $\Omega$ ]	Resistencia bombillos Rojo [ $\Omega$ ]	Resistencia ventilador A Verdes [ $K\Omega$ ]	Resistencia ventilador B Verdes [ $K\Omega$ ]
11.3	9	25.6	28.6

**Fuente:** autores

La tabla número 10 permite evidenciar los datos arrojados en las resistencias de las bombillas, para las bombillas de color verde se presenta una resistencia de

11.3Ω, para las bombillas de color rojo se presenta una resistencia de 9Ω, para el ventilador A se presenta un resistencia de 25.6Ω, para el ventilador B se presenta un resistencia de 28.6Ω. Las pruebas se realizaron con un multímetro permitiendo arrojar los valores anteriormente descritos.

**Tabla 11.** Datos arrojados en la apertura, generador, bombillos

%apertura	Generador [Rpm]	Bombillos Rojo			Bombillos Verde		
		Tensión [v]	Amperaje [A]	Potencia [W]	Tensión [v]	Amperaje [A]	Potencia [w]
0	0	0	0	0	0	0	0
25	111.4	1.06	118*10 <sup>-3</sup>	0.12	0.97	0.09	0.09
50	768	10.56	1.17	12.35	10.84	0.96	10.41
75	852	12.13	1.35	16.38	11.62	1.03	11.97
100	824	11.18	1.24	13.86	12.3	1.09	13.41

**Fuente:** autores

La tabla número 11 muestra los datos que han sido arrojados en la apertura de la valvula entre el 0, 25, 50, 75 y 100%, en la parte superior está el generador y las cantidades de revoluciones por minuto, como también el tipo de amperaje, potencia y tensión en los bombillos leds rojos y verdes.

En el momento que se da la apertura de la valvula a un 25% el generador inicia con 111.4 revoluciones por minuto, en el bombillo rojo los datos obtenidos son una tensión de 1.06 voltios, un amperaje de 118\*10<sup>-3</sup> Amperios, una potencia de 0.12 Watts, en el bombillo verde los datos obtenidos son una tensión de 0.97 voltios, un amperaje de 0.09 Amperios, una potencia de 0.09 Watts. Con una apertura de la valvula a un 50% el generador inicia con 768 revoluciones por minuto, en el

bombillo rojo los datos obtenidos son una tensión de 10.56 voltios, un amperaje de 1.17 Amperios, una potencia de 12.35 Watts, en el bombillo verde los datos obtenidos son una tensión de 10.84 voltios, un amperaje de 0.96 Amperios, una potencia de 10.41 Watts. Con una apertura de la válvula a un 75% el generador inicia con 852 revoluciones por minuto, en el bombillo rojo los datos obtenidos son una tensión de 12.13 voltios, un amperaje de 1.35 Amperios, una potencia de 16.38 Watts, en el bombillo verde los datos obtenidos son una tensión de 11.62 voltios, un amperaje de 1.03 Amperios, una potencia de 11.97 Watts. Con una apertura de la válvula a un 100% el generador inicia con 824 revoluciones por minuto, en el bombillo rojo los datos obtenidos son una tensión de 11.18 voltios, un amperaje de 1.24 Amperios, una potencia de 13.86 Watts, en el bombillo verde los datos obtenidos son una tensión de 12.3 voltios, un amperaje de 1.09 Amperios, una potencia de 13.41 Watts

**Tabla 12.** Datos arrojados en la apertura, generador, ventiladores

%apertura	Generador [Rpm]	Ventilador A			Ventilador B		
		Tensión [v]	Amperaje [uA]	Potencia [uw]	Tensión [v]	Amperaje [uA]	Potencia [uW]
0	0	0	0	0	0	0	0
25	111.4	1.42	55.47	78.77	0.78	27.27	21.27
50	768	8.12	317.18	2575.50	7.98	279.02	2226.58
75	852	11.34	442.97	5020.28	9.95	347.90	3461.61
100	824	4.81	187.89* 10 <sup>-6</sup>	903.75	5.68	198.60	1128.05

Fuente: autores

La tabla número 12 evidencia los datos que han sido arrojados en la apertura de la válvula entre el 0, 25, 50, 75 y 100%, en la parte superior está el generador y las cantidades de revoluciones por minuto, como también el tipo de amperaje, potencia y tensión en los ventiladores A y B.

En el momento que se da la apertura de la válvula a un 25% el generador inicia con 111.4 revoluciones por minuto, en el ventilador A, los datos obtenidos son una tensión de 1.42 voltios, un amperaje de 55.47 micro Amperios, una potencia de 78.77 micro Watts, en el ventilador B, los datos obtenidos son una tensión de 0.78 voltios, un amperaje de 27.27 Amperios, una potencia de 21.27 micro Watts.

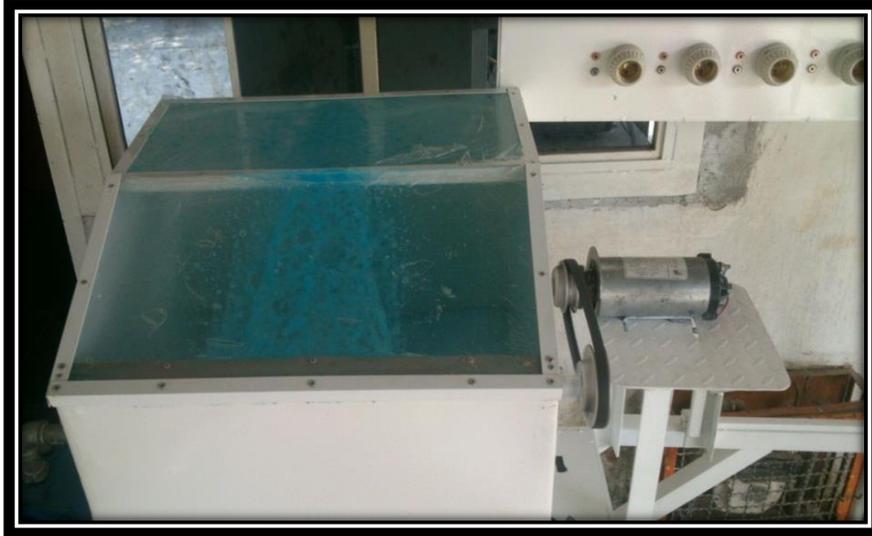
Con una apertura de la válvula a un 50% el generador inicia con 768 revoluciones por minuto, en el ventilador A, los datos obtenidos son una tensión de 8.12 voltios, un amperaje de 317.18 micro Amperios, una potencia de 2575.50 micro Watts, en el ventilador B los datos obtenidos son una tensión de 7.98 voltios, un amperaje de 279.20 micro Amperios, una potencia de 2226.58 micro Watts.

Con una apertura de la válvula a un 75% el generador inicia con 852 revoluciones por minuto, en el ventilador A, los datos obtenidos son una tensión de 11.34 voltios, un amperaje de 442.97 micro Amperios, una potencia de 5020.28 micro Watts, en el ventilador B los datos obtenidos son una tensión de 9.95 voltios, un amperaje de 347.90 micro Amperios, una potencia de 3461.61 micro Watts.

Con una apertura de la válvula a un 100% el generador inicia con 824 revoluciones por minuto, en el ventilador A los datos obtenidos son una tensión de 4.81 voltios, un amperaje de  $187.89 \cdot 10^{-6}$  micro Amperios, una potencia de 903.75 micro Watts, en el ventilador B los datos obtenidos son una tensión de 5.68 voltios, un amperaje de 198.60 micro Amperios, una potencia de 1128.05 micro Watts.

- **Turbina de Pelton terminada**

**Figura 21.** Vista lateral izquierda



**Fuente:** CUADRADO J, FERREIRA J, GARCIA C, JIMENES J.

**Figura 22.** Vista frontal turbina terminada



**Fuente:** CUADRADO J, FERREIRA J, GARCIA C, JIMENES J.

**Figura 23.** Turbina Pelton



**Fuente:** CUADRADO J, FERREIRA J, GARCIA C, JIMENES J.

**Figura 24.** Conexiones del cableado eléctrico



**Fuente:** CUADRADO J, FERREIRA J, GARCIA C, JIMENES J.

## 5. CONCLUSIONES

Se recopiló la información referente a sistemas de generación de energía con turbina Pelton, esto permitió el diseño del banco con sus respectivos elementos de medida e identificar las diferentes variables que intervinieron en el sistema.

Se Implementó el banco de pruebas de generación eléctrica en él se incluyó una moto-bomba, un generador eléctrico y un equipo de medida, estos elementos junto con otros componentes. Una vez seleccionados los componentes se construyó la turbina ensamblándolos paso a paso y realizando pruebas de conexión y funcionamiento.

El manual de operación se determina en el libro final donde se observan las tablas para la recolección de los datos, las respectivas fórmulas que permiten desarrollar los ejercicios prácticos e identificar las variables de tensión, voltaje, número de Reynolds, caudal entre otras.

Se realizaron pruebas de verificación de funcionamiento mediante la medición de energía inyectada al sistema respecto a la energía generada, se observa en la turbina de Pelton al momento de iniciar las pruebas, la estructura es la adecuada, la electrobomba funciona debidamente, el generador suministra energía eléctrica hacia los elementos de carga y estos a su vez realizan la función establecida demostrando el funcionamiento de la turbina de Pelton.

## 6. RECOMENDACIONES

Se recomiendan realizar estudios para la recolección de datos que permitan conocer la cantidad de fuentes hídricas que permitan y cuenten con una caída de agua considerable, en donde se puedan instalar prototipos como la turbina de pelton de mayor estructura y así generar suministro de energía eléctrica a zonas alejadas donde la energía eléctrica es limitada o de elevado valor.

Para próximos trabajos o diseños de un prototipo como lo es la turbina de Pelton se recomienda utilizar un programa de modelado en 3d de bajo valor o alto valor si se cuenta con el recurso suficiente, que permita a los estudiantes realizar pruebas de simulación de los fluidos y comportamiento de los materiales.

Se recomienda seguir las instrucciones y normas de seguridad al momento de hacer uso de la turbina de Pelton, puesto que se maneja un voltaje considerable en la afectación del ser humano, al momento de realizar la prueba los estudiantes deben alejarse del sistema de transmisión de potencia, para que de esta manera la banda no afecta la integridad de las personas, evitar el uso de anillos, manillas, prendas largas, las mujeres deben tener el cabello recogido.

En el momento de proceder a energizar el prototipo, la válvula de la compuerta debe estar cerrada y así evitar un salto de amperaje en la electroválvula, a catar la presente recomendación ayuda a mantener la vida útil del equipo y aumentar la eficiencia de la electrobomba.

Se recomienda que por medio de amortiguadores se de soporte a la electrobomba y soportes de los rodamientos para disminuir la fricción y adsorber las vibraciones mecánicas para evitar desajustes y un bajo rendimiento de la turbina.

A partir del presente proyecto se incentiva a los estudiantes a realizar otros tipos de prototipos de generación de energía eléctrica como lo es la turbina de Francis, las turbinas de hélice, fomentar el uso de los recursos naturales para la generación de energía renovable de manera que no se genere ningún tipo de impacto ambiental negativo.

## 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BETANCOURT JURADO Marcelo. Diseño de un módulo interactivo de generación hidráulico de energía eléctrica. Ingeniería mecánica. Universidad tecnológica de Pereira. Pereira: 2007.

CRANE. Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías. Primera edición. México: McGraw-Hill. 1987.

CREUS. Antonio. Instrumentación industrial, sexta edición, Barcelona, España, 199.

DIAZ ORTIZ, Jaime. Mecánica de los fluidos e hidráulica. Primera edición. Cali: Uní valle. 2006.

DEPERT, W. / STOOL, K .Marcombo, S.A Barcelona, España. Primera Edición Alfa Omega. 2000.

DOMINGUEZ SANCHES, Urbano, Maquinas Hidráulicas. España: club universitario, 2012. P. 13.

DUARTE A, Carlos. NIÑO V, José. Introducción a la mecánica de fluidos. Tercera edición. Bogotá D.C: Unidad académica. 2004.

Edwin Chica, Felipe Obando, sierra, Velásquez y Enríquez. Diseño, simulación, fabricación y caracterización de una turbina tipo Pelton de 5 kW. Universidad de Antioquia. Facultad de ingeniería mecánica. Medellín. 2013.

FERRADA S, LORENA. Diseño de rodete de turbina hidráulica tipo Pelton para microgeneración. Universidad de Chile. Departamento de ingeniería mecánica. Santiago de Chile. Diciembre 2012.

GARCIA REZA, Clemente. Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías. Santafé de Bogotá: Mcgraw-Hill, 2003.

GONZALEZ S, Juan. Fundamentos de mecánica de fluidos. Primera edición. Barcelona: club universitario. 2002.

ISOLVE. Mariana. Historia de la ciencia y la tecnología, cultura tecnológica. México: limusa, 2000.

MATAS. Rubén. Bielas y alabes. Madrid: castellana. 1990.

Ministerio de minas y energía. Integración de las energías renovables. Reglamento interno ley 1715. Bogotá D.C, 2014.

MONTERO A, CARLOS. Equipamiento electromecánico de una central mini-hidroeléctrica a través de una turbina Pelton. Escuela técnica superior de ingeniería. Marid. 2007.

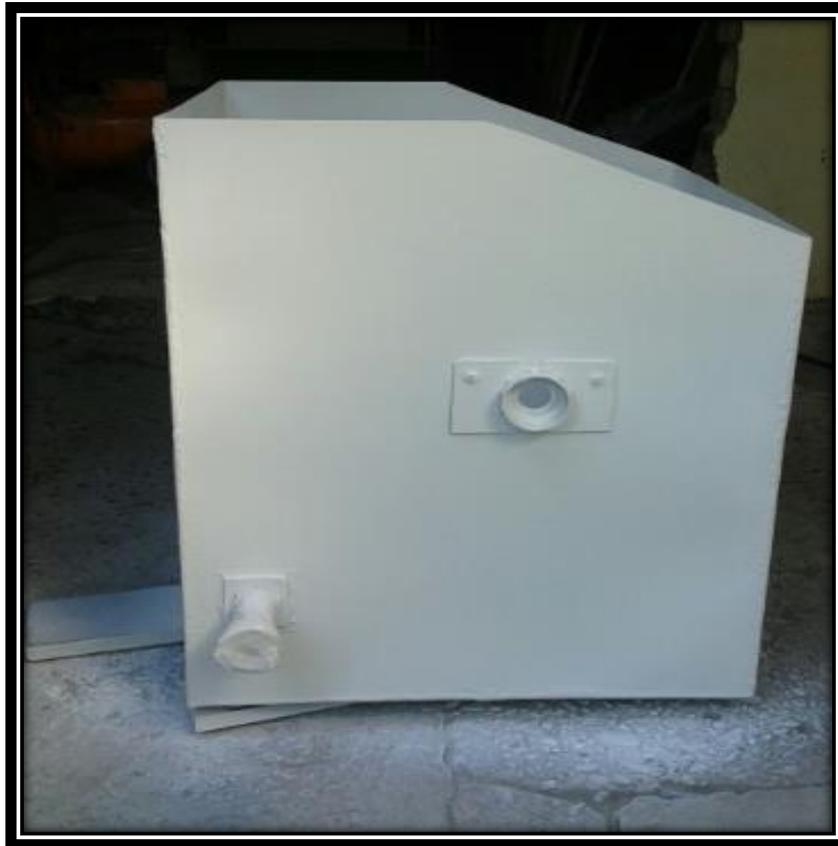
MUNSON, YOUNG, OKIISHI. Fundamentos de mecánica de fluidos. México: limusa S.A. 2003.

NORMAS TECNICAS AMBIENTALES. Puertos. Ministerio de protección social. Bogotá D.C, 2005.

WILSON, Jerry D. Física quinta edición. México: Pearson. 2003.

## 8. ANEXOS

### Anexo A. Caja metálica o tambor turbina Pelton



**Fuente:** Autores

Este recipiente tiene una altura de 60 cm, una profundidad de 50 cm y un ancho de 50 cm, en él se deposita un volumen de agua de  $0.15\text{m}^3$ , en el interior de esta caja está la turbina con un eje y su respectivo rodete, el material que se utilizó fue una lámina de calibre 20 para que le dé a la caja un acabado uniforme.

## **Anexo B. Tubería de succión**



**Fuente:** Autores

La tubería de succión es debidamente acoplada y respectivamente sellada, para este proceso se utiliza tubería galvanizada de media pulgada, codos, una universal de media. Las medidas y cortes se realizan con la precisión que se requiere y de esta manera evitar el desperdicio de material y avanzar en el proceso.

### Anexo C. conexiones eléctricas electrobomba.



**Fuente:** Autores

Se verifica el cable que lleva la conexión a la electro-bomba, para así poder hacer las diferentes conexiones revisado que todo esté acorde a lo establecido en los procedimientos estándares eléctricos.

### Anexo D. Ensamble de la electrobomba



**Fuente:** Autores

La electrobomba debe ubicarse de tal forma que permita el paso del fluido utilizando la menor cantidad de tubería y sobre una mesa metálica con una determinada altura.

### Anexo E. Registro de la altura



**Fuente:** Autores

Para desarrollar correctamente los ejercicios se deberán tomar los datos referentes a las medidas del banco, estos datos incluirán caudal, alturas y las áreas determinadas tanto del tubo como de la caja.

### Anexo F. Medida de la altura del líquido



**Fuente:** Autores

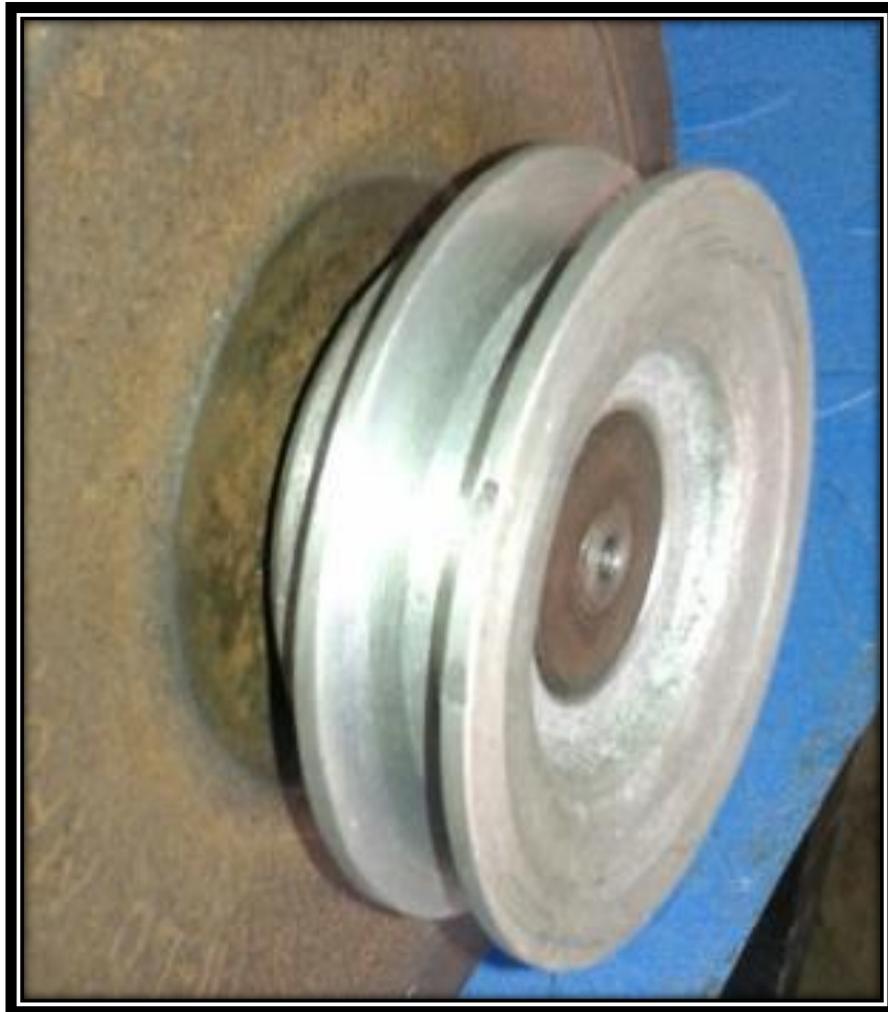
### **Anexo G. Paso 9. Ensamble de ejes y rodamiento**



**Fuente:** Autores

Este rodamiento está ubicado en un extremo de la caja turbina, el cual tiene como función o pieza primordial darle giro o continuidad al eje cuando el equipo este movimiento.

## Anexo H. Poleas



**Fuente:** Autores

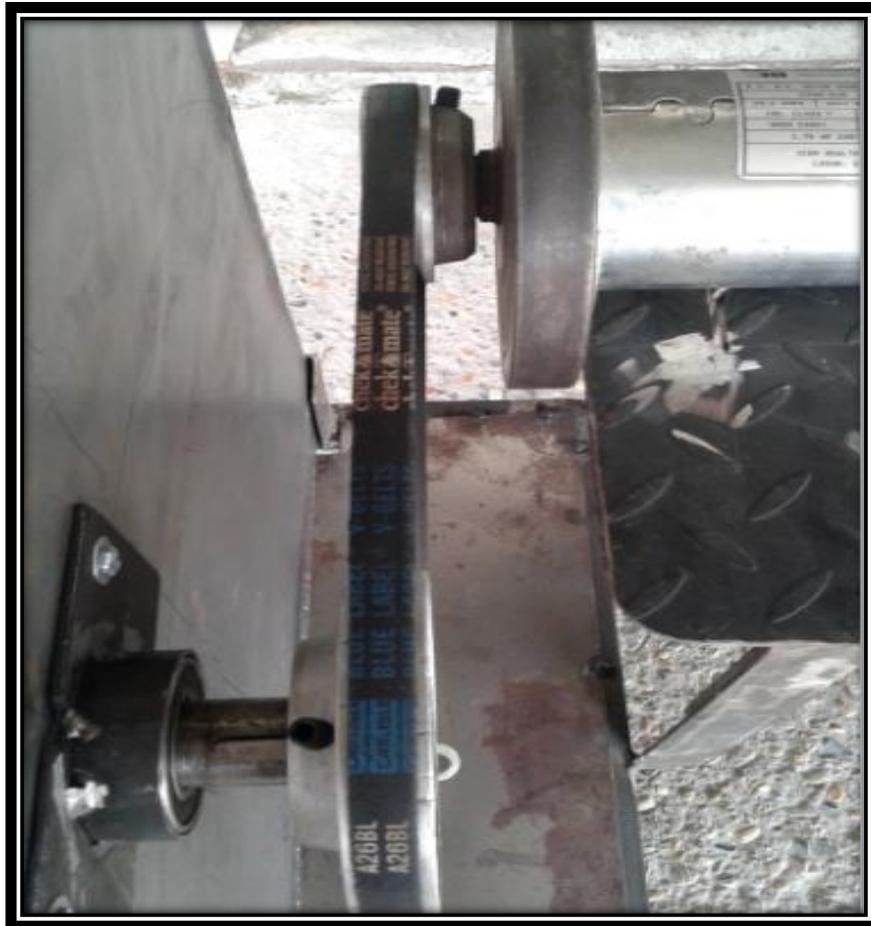
Esta polea tiene un diámetro 3 pulgadas, va conectada al generador y con una correa o banda referencia tipo A que conecta la otra polea que está conectada al eje de la turbina. Esta polea tiene como función transmitir fuerza en ambas direcciones de una forma uniforme.

**Anexo I.** Datos de las poleas.

Selección de correas	Diámetros rangos primitivos	Angulo de canal	Dimensiones				
			A	W	D	X	S
A-B	3.4 – 6.8 >6.8°	34° 38°	0.612 0.625	0.625	0.175	0.75	0.5
C	7.0- 7.99 8.0- 12.0	34° 36°	0.879 0.887	0.78	0.2	1.00	0.688
D	12.0-12.99 13.0- 17.0	34° 36°	1.259 1.271	1.05	0.3	1.438	0.875
E	18.0- 24.0 >24.0	36° 38°	1.527 1.542	1.3	0.4	1.75	1.23

Fuente: Autores

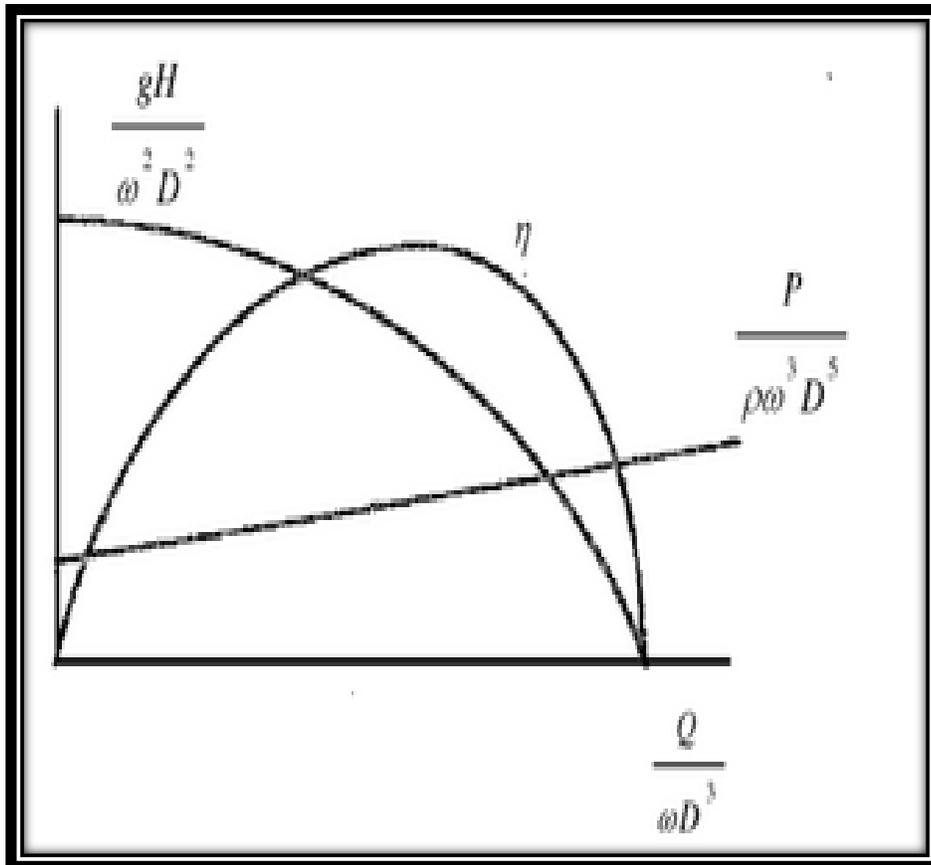
### Anexo J. Posicionamiento de la correa.



**Fuente:** Autores

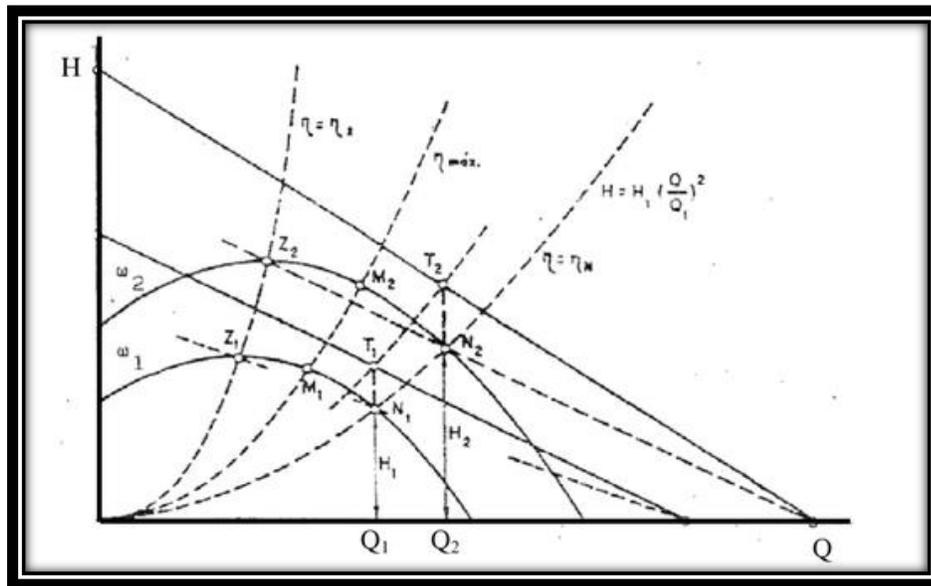
Se estableció para el montaje de la correa un tipo A, por sus características particulares al movimiento y resistencia, esta correa brinda una estabilidad gradual a la hora de aumentar el movimiento.

**ANEXO K.** Relación entre los parámetros adimensionales de las máquinas hidráulicas.



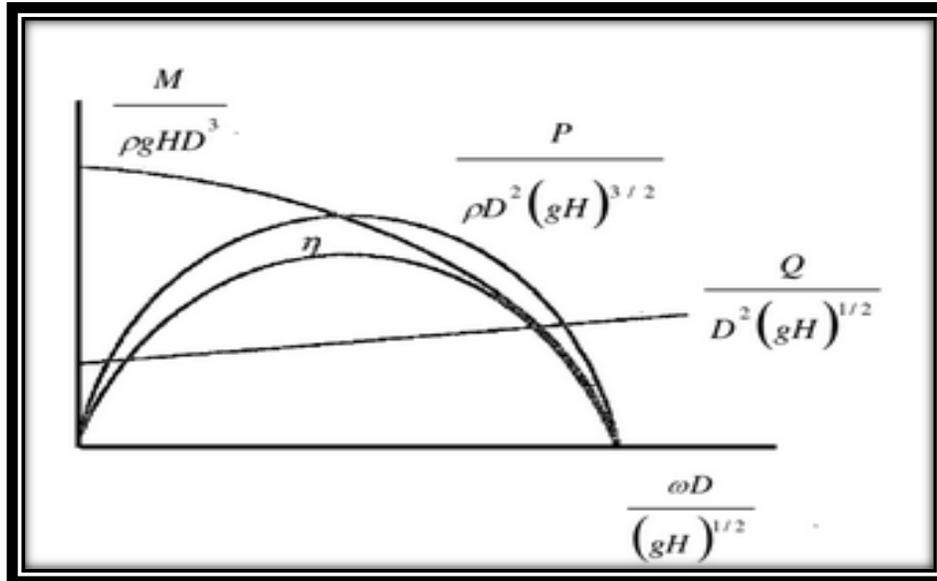
**Fuente:** DOMINGUEZ SANCHES. Urbano, Maquinas Hidráulicas, editorial club universitario, España, 2012, p ,26.

**ANEXO L.** Obtención de las curvas características de las maquina hidráulica mediante las relaciones de semejanza.



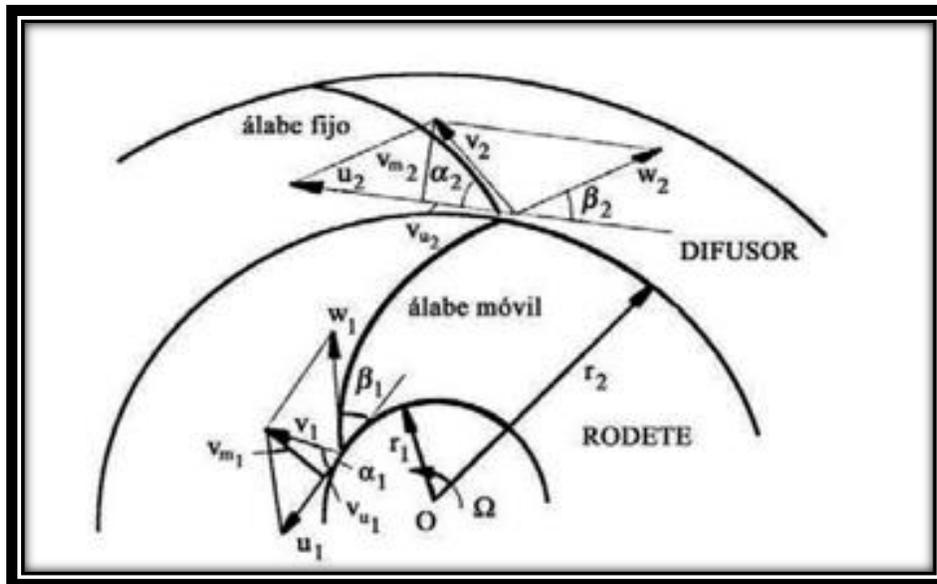
**Fuente:** DOMINGUEZ SANCHES. Urbano, Maquinas Hidráulicas, editorial club universitario, España, 2012, p ,28.

**ANEXO M.** Relación entre los parámetros adimensionales de las turbinas hidráulicas.



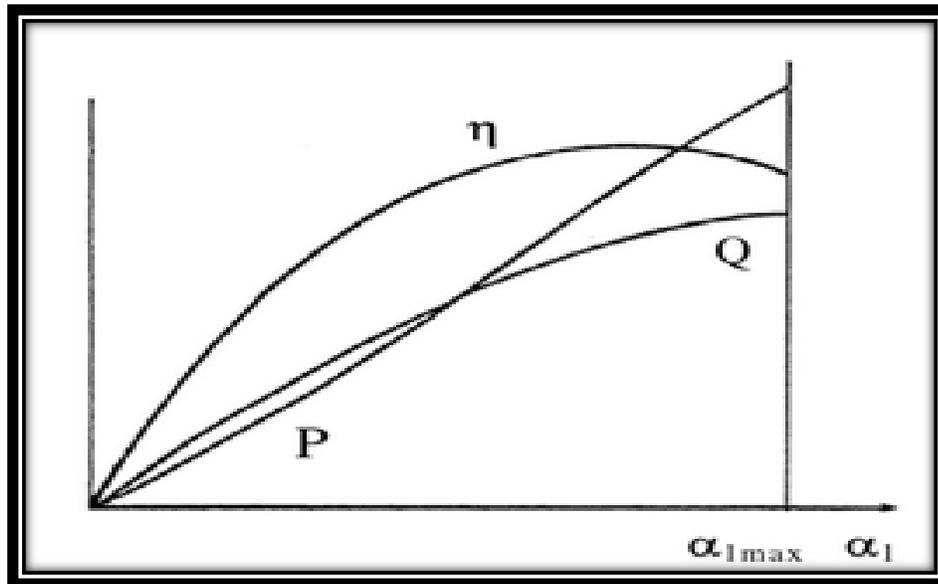
**Fuente:** DOMINGUEZ SANCHES. Urbano, Maquinas Hidráulicas, editorial club universitario, España, 2012, p ,30.

**ANEXO N.** Sección de una bomba y componentes de la vector velocidad del fluido.



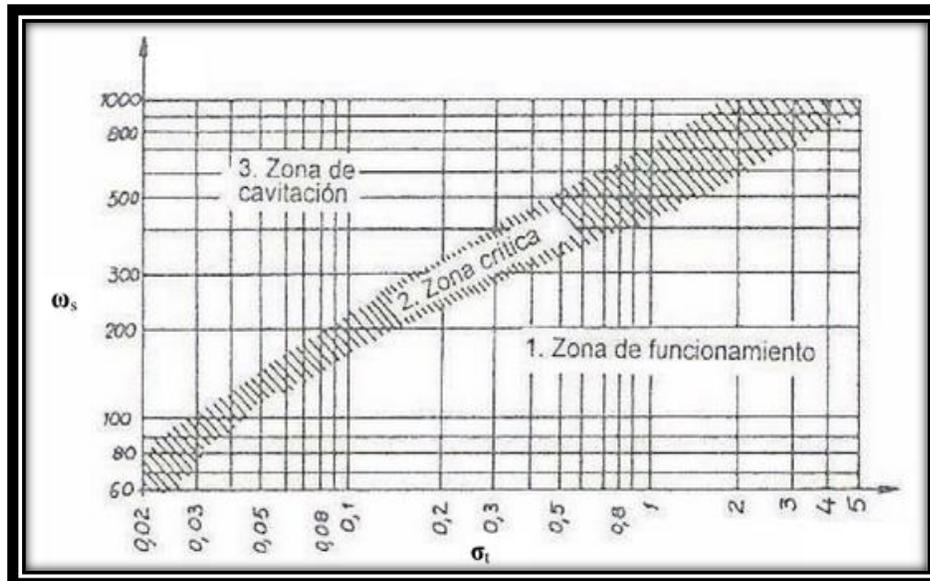
**Fuente:** DOMINGUEZ SANCHES. Urbano, Maquinas Hidráulicas, editorial club universitario, España, 2012, p, 51.

**ANEXO O.** Curva características de potencia, caudal y rendimiento en función de la posición del distribuidor de una turbina.



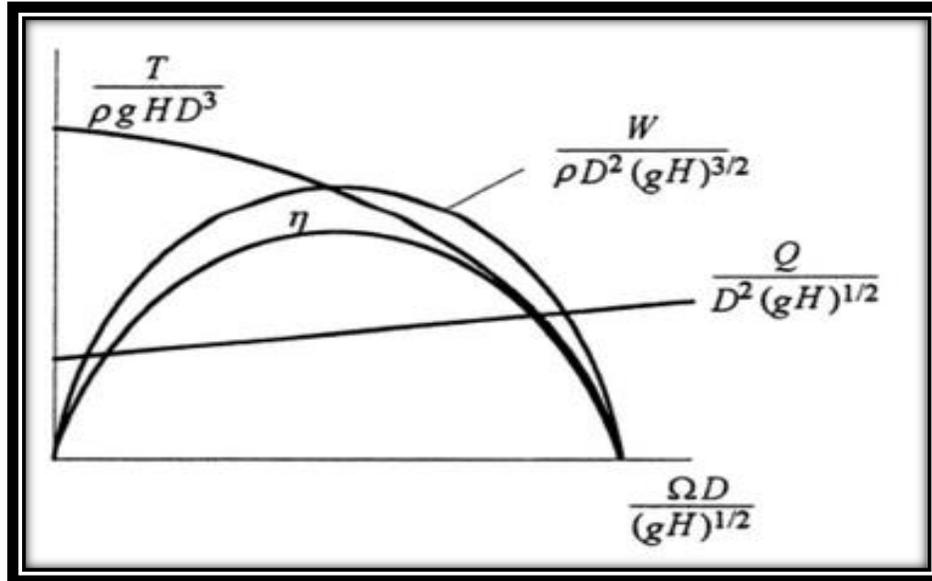
**Fuente:** DOMINGUEZ SANCHES. Urbano, Maquinas Hidráulicas, editorial club universitario, España, 2012, p ,210.

**ANEXO P.** Posibilidad de cavitación en turbinas según su velocidad específica y el parámetro de toma.



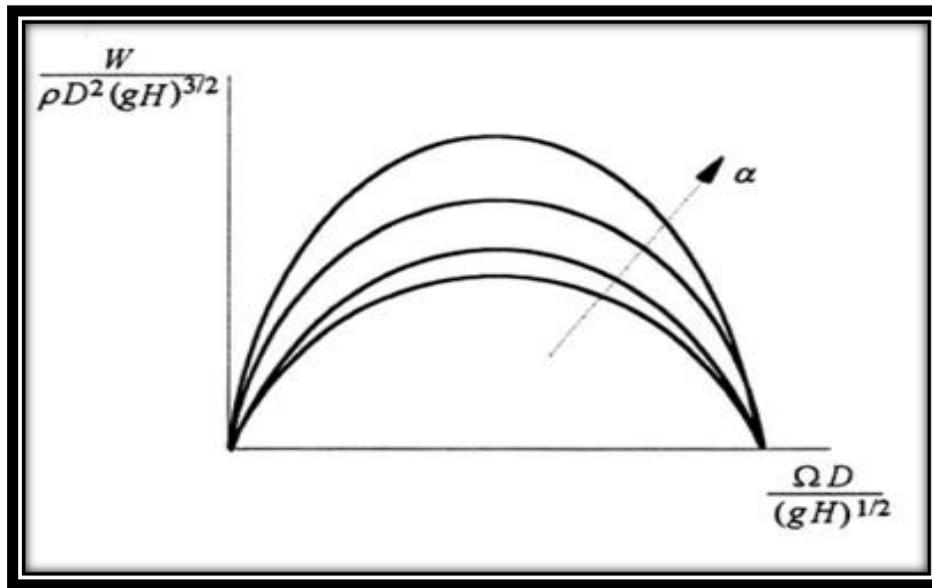
**Fuente:** DOMINGUEZ SANCHES. Urbano, Maquinas Hidráulicas, editorial club universitario, España, 2012, p ,218.

**ANEXO Q.** Curvas características típicas en una turbina de reacción.



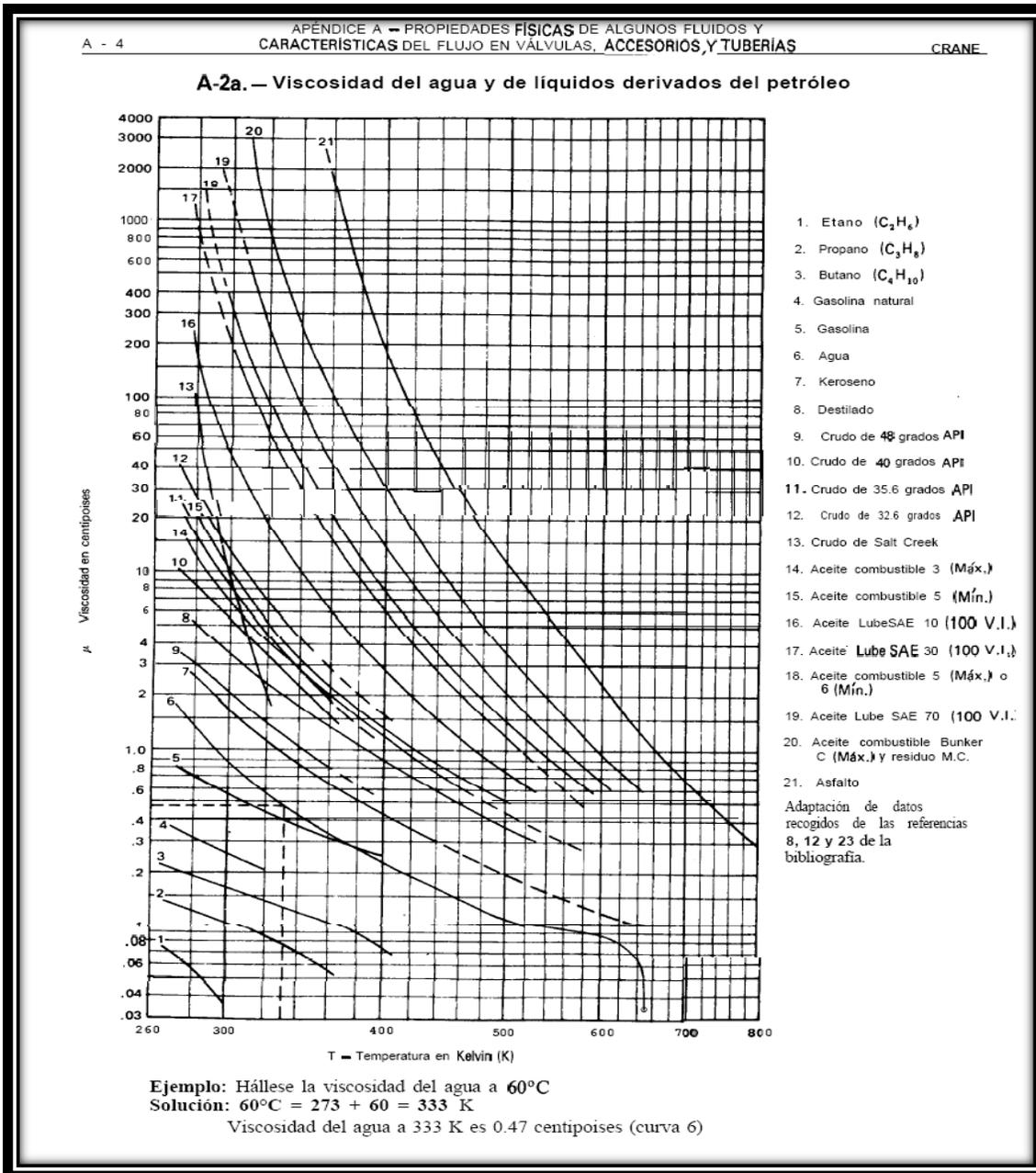
**Fuente:** VIEDMA ROBLES. Antonio, teoría de máquinas hidráulicas, editorial servicio de publicaciones, España, 1997, p, 3.9.

**ANEXO R.** Curva característica de potencia para una turbina de reacción en función del régimen de giro y de la apertura del distribuidor.



**Fuente:** VIEDMA ROBLES. Antonio, teoría de máquinas hidráulicas, editorial servicio de publicaciones, España, 1997, p, 3.9.

**ANEXO S.** Tabla de viscosidades en centipoise



Fuente: VIEDMA ROBLES. Antonio. Teoría de máquinas hidráulicas. Servicio de publicaciones, España, 1997, P. 10.

ANEXO T. Propiedades físicas del agua

APÉNDICE A — PROPIEDADES FÍSICAS DE ALGUNOS FLUIDOS Y CARACTERÍSTICAS DEL FLUJO EN VÁLVULAS, ACCESORIOS Y TUBERÍAS			
A — 10			CRANE
A-5a. Propiedades físicas del agua			
Temperatura del agua <i>t</i> Grados centígrados	Presión de saturación <i>P'</i> Bar absolutos	Volumen específico <i>v x 10<sup>3</sup></i> Decímetros cúbicos por kilogramo	Densidad <i>P</i> Kilogramos por metro cúbico
.01	.006112	1.0002	999.8
5	.008719	1.0001	999.9
10			
15	.017041	1.0010	997.990
20	.023368	1.0018	998.2
25			
35	.042468	1.0030	990.995
40	.073750	1.0039	992.990
45	.09582	1.0099	990.2
55	.15740	1.0121	980.987
60	.19919	1.0171	983.2
65	.25008	1.0199	980.5
70			
75	.31160	1.0229	977.978
80	.47359	1.0290	971.8
85			
90	.70163	1.0390	966.961
95			
100	1.84526	1.0390	960.983
110	1.4326	1.0515	951.0
120	1.9853	1.0603	943.1
130	2.7012	1.0697	934.8
140	3.6136	1.0798	926.1
		1.0906	
150	4.7597	1.1021	916.9
		1.1144	907.4
160	6.2325	1.1144	897.3
180	10.0271	1.1275	886.9
190			
200	12.552	1.1415	876.0
225	15.551	1.1565	864.7
250	25.504	1.1992	833.9
	39.776	1.2512	799.2
275	59.49	1.3168	759.4
300	85.92	1.4036	712.5
325	120.57	1.5289	654.1
350	165.37	1.741	574.4
374.15	221.20	3.170	315.5

Para convertir el volumen específico de decímetros cúbicos por kilogramo (**dm<sup>3</sup>/kg**) a metros cúbicos por kilogramo (**m<sup>3</sup>/kg**) dividanse los valores de la tabla entre 10<sup>3</sup>.

Para convertir la densidad en kilogramos por metro cúbico (**kg/m<sup>3</sup>**) a kilogramos por litro (**kg/litro**) dividanse los valores de la tabla entre 10<sup>3</sup>.

Peso específico del agua a 15°C = 1.00

Los datos de presión y volumen se han obtenido con permiso de HMSO, del "Steam Tables 1964" (Tablas de vapor de agua 1964) del *U.K. National Engineering Laboratory*.

Fuente: VIEDMA ROBLES. Antonio. Teoría de máquinas hidráulicas. Servicio de publicaciones, España, 1997, P. 11.

ANEXO U. Propiedades físicas del agua

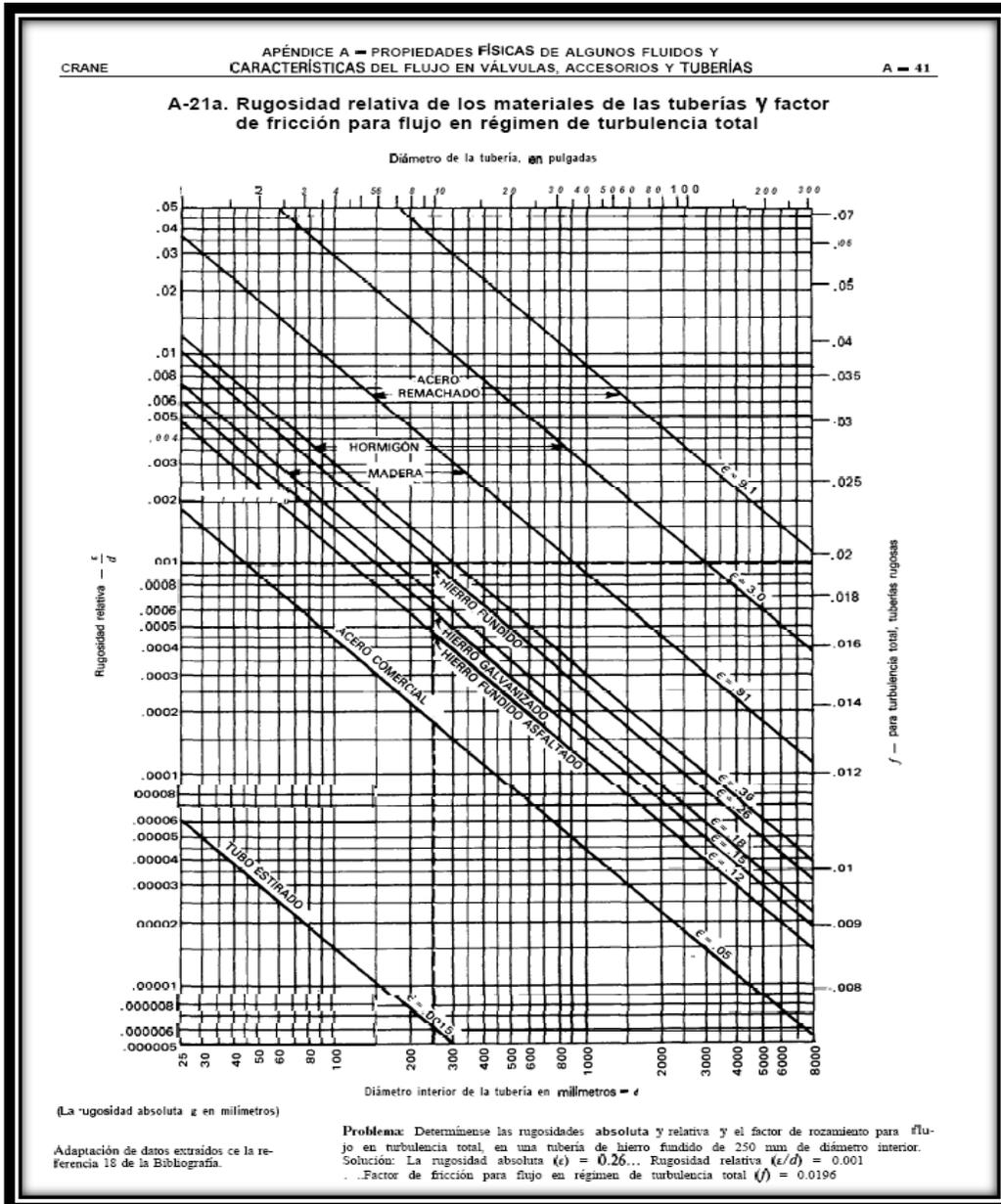
APENDICEA — PROPIEDADES FÍSICAS DE ALGUNOS FLUIDOS Y CARACTERÍSTICAS DEL FLUJO EN VÁLVULAS, ACCESORIOS Y TUBERÍAS				
A-5b. — Propiedades físicas del agua				
Temperatura dell agua	Presión de saturación	Volumen específico	Densidad	Peso
grados Fahrerheit	lb/pulg <sup>2</sup> abs.	pie <sup>3</sup> /lb	lb/pie <sup>3</sup>	libras/galón
32	0.08859	0.016022	62.414	8.3436
40	0.12163	0.016019	62.426	8.3451
50	0.17796	0.016023	62.410	8.3430
60	0.25611	0.016033	62.371	8.3378
70	0.36292	0.016050	62.305	8.3290
80	0.50683	0.016072	62.220	8.3176
90	0.69813	0.016099	62.116	8.3037
100	0.94924	0.016130	61.996	8.2877
110	1.2750	0.016165	61.862	8.2698
120	1.6927	0.016204	61.7132	8.2498
130	2.2230	0.016247	61.550	8.2280
140	2.8892	0.016293	61.376	8.2048
150	3.7184	0.016343	61.188	8.1797
160	4.7414	0.016395	60.994	8.1537
170	5.9926	0.016451	60.787	8.1260
180	7.5110	0.016510	60.569	8.0969
190	9.340	0.016572	60.343	8.0667
200	11.526	0.016637	60.107	8.0351
210	14.123	0.016705	59.862	8.0024
212	14.696	0.016719	59.812	7.9957
220	17.186	0.016775	59.613	7.9690
240	24.968	0.016926	59.081	7.8979
260	35.427	0.017089	58.517	7.8226
280	49.200	0.017264	57.924	7.7433
300	67.005	0.01745	57.307	7.6608
350	134.604	0.01799	55.586	7.4308
400	247.259	0.01864	53.648	7.1717
450	422.55	0.01943	51.467	6.8801
500	680.86	0.02043	48.948	6.5433
550	1045.43	0.02176	45.956	6.1434
600	1543.2	0.02364	42.301	5.6548
650	2208.4	0.02674	37.397	4.9993
700	3094.3	0.03662	27.307	3.6505

Peso específico del agua a 60°F = 1.00  
El peso por galón está basado en 7.40052 galones por pie cúbico.

Los datos de presión y volumen se han obtenido de ASME Steam Tables (1967) con permiso del editor, The American Society of Mechanical Engineers, New York, N.Y.

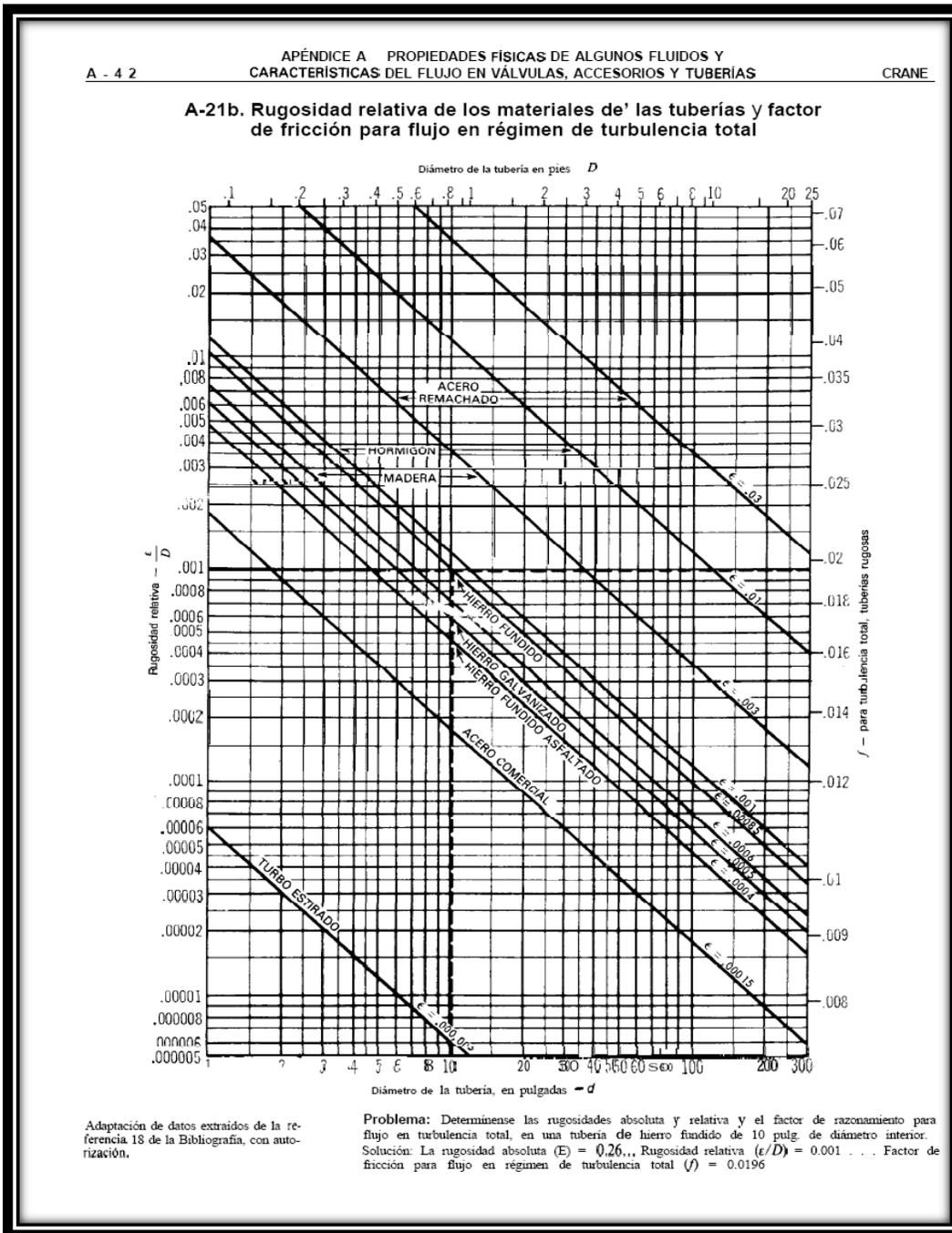
Fuente: VIEDMA ROBLES. Antonio. Teoría de máquinas hidráulicas. Servicio de publicaciones, España, 1997, P. 12.

ANEXO V. Diagrama de rugosidad relativa



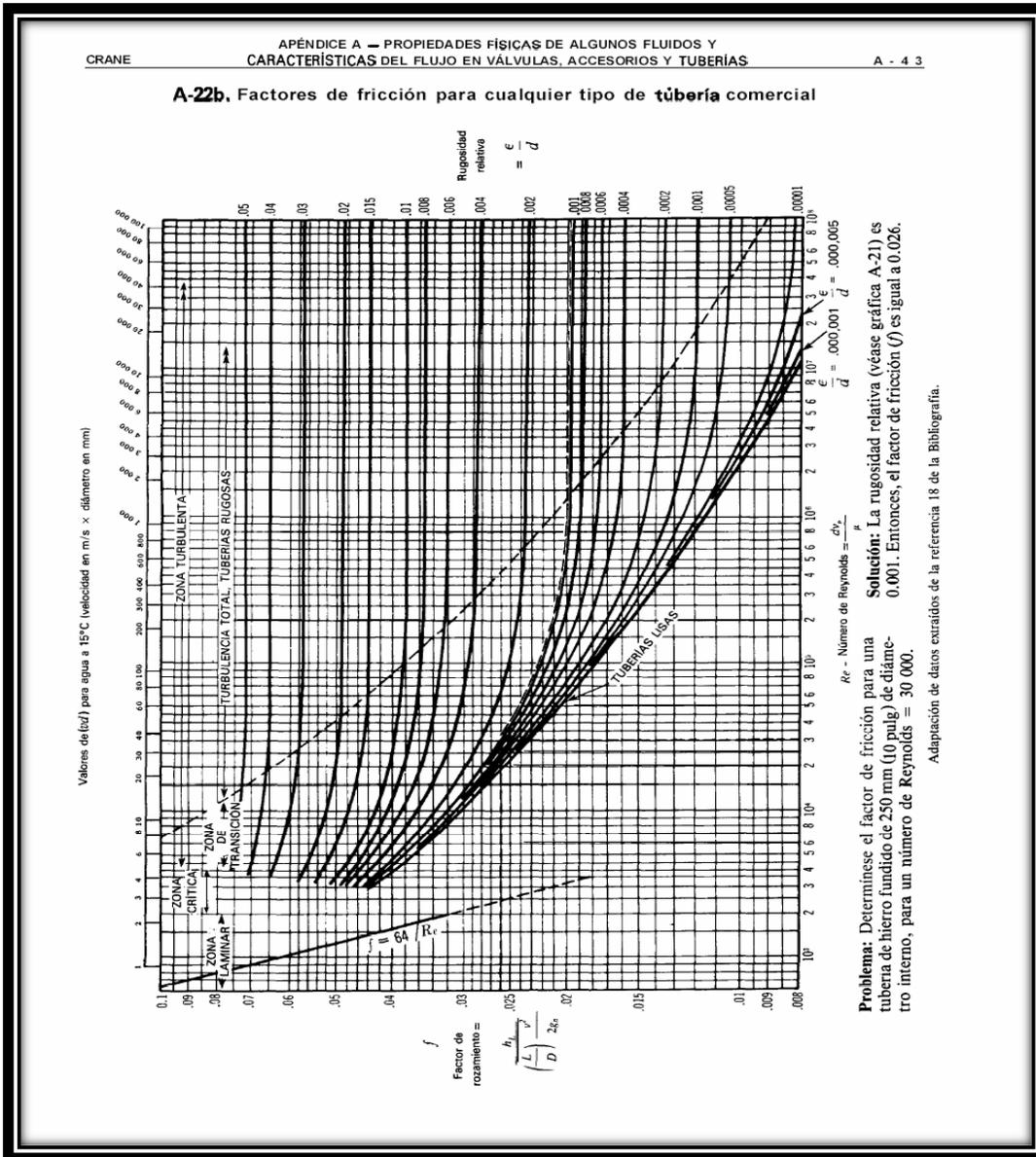
**Fuente:** VIEDMA ROBLES. Antonio. Teoría de máquinas hidráulicas. Servicio de publicaciones, España, 1997, P. 13.

## **ANEXO W. Rugosidad relativa**



Fuente: VIEDMA ROBLES. Antonio. Teoría de máquinas hidráulicas. Servicio de publicaciones, España, 1997, P. 14.

**ANEXO X. Factor de fricción diagrama de Moody**



**Fuente:** VIEDMA ROBLES. Antonio. Teoría de máquinas hidráulicas. Servicio de publicaciones, España, 1997, P. 15.