

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA TURBINA DE IMPULSO

**INDIRA ANGARITA IGUARAN
ANDREA KATHERIN HERNÁNDEZ ROJAS**



**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
ESCUELA DE INGENIERÍA
BUCARAMANGA**

2012

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA TURBINA DE IMPULSO

**INDIRA ANGARITA IGUARAN
ANDREA KATHERIN HERNÁNDEZ ROJAS**

**Trabajo de grado para optar por el título de
Ingeniero Mecánico**

**Director: Emil Hernández Arroyo
Ingeniero Mecánico**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
ESCUELA DE INGENIERÍA
BUCARAMANGA
2012**

Nota de aceptación

Firma del presidente del Jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bucaramanga, 12 Mayo del 2012

Dedicatoria

Agradezco a Dios, por tantas bendiciones en mi vida, al regalarme la maravilla de familia que tengo, desde mis padres que han hecho lo posible para aportar su grano de arena en sus enseñanzas y regaños que son la fortaleza de la persona que en mi se ha formado, a mi hermano por su apoyo incondicional y en especial a mis sobrinos Nicole y Daniel que son el motorcito y esa alegría que en esos momentos difíciles necesite.

A todas esas personas que estuvieron presentes en toda mi formación y que de una u otra forma aportaron en este crecimiento.

Finalizando solo puedo decir gracias por estar conmigo en esta parte de mi vida, a todos y cada uno de ustedes les debo su comprensión y afecto, sus sapiencias e ilustraciones que hicieron de esta mujer, la profesional de orgullo y entrega que hoy en día soy.

ANDREA KATHERIN HERNÁNDEZ ROJAS

Dedicatoria

A Dios por haberme creado, ser mi refugio y guía espiritual.

A mis padres por haberme educado, formado con principios y sobre todo por su constante apoyo, fe y paciencia.

A mis hermanos Alexandra, Yalenis y Alexander quienes han sido un modelo a seguir en mi vida. Gracias por su cariño y apoyo incondicional.

A mis amigas Justyne, Sandra y Heydy que a pesar del tiempo y la distancia siempre han estado presentes a lo largo de mi vida, demostrándome que la verdadera amistad existe.

A mis amigos y compañeros de estudio Andrea, Nicolás, Hernán por su cariño, sinceridad, confianza y motivación durante estos años, gracias.

A mi familia y demás compañeros de estudio que me brindaron su colaboración.

INDIRA ANGARITA IGUARAN

Agradecimientos

- ◆ Al ingeniero Emil Hernández quien Dirigió este proyecto, le agradecemos inmensamente, por su colaboración.
- ◆ Agradecemos especialmente el acompañamiento y asistencia que nos brindo el ingeniero Juan Carlos Villamizar.
- ◆ Un aporte indispensable, que nos permitió llevar a cabo la construcción de este proyecto fue de colaboración de Ludwing Casas y Víctor Cuellar.

CONTENIDO

INTRODUCCION	1
OBJETIVOS.....	2
Objetivo general.....	2
Objetivos específicos	2
1 MARCO TEÓRICO	3
1.1 TURBO MAQUINAS HIDRÁULICAS: TURBINAS	3
1.1.1 Definición	3
1.1.2 Clasificación.....	3
1.1.2.1 Según el Grado de Reacción	3
1.1.2.2 Según el Número Específico de Revoluciones	4
1.2 TURBINA PELTON	5
1.2.1 Componentes de una Turbina Pelton	5
1.2.1.1 Distribuidor.....	5
1.2.1.2 Rodete.	9
1.2.1.3 Carcasa.....	10
1.2.1.4 Cámara de Descarga	11
1.2.1.5 Sistema Hidráulico de Frenado.....	11
1.2.1.6 Eje.....	11
1.2.2 ESTUDIO TEÓRICO.....	12
1.2.2.1 Triángulos de Velocidades.....	12
1.2.2.2 Velocidad del Chorro	14

1.2.2.3 Velocidad Tangencial o Periférica de un Punto de la Rueda	14
1.2.2.4 Caudal	14
1.2.2.5 Altura Neta	14
1.2.2.6 Potencia Hidráulica	15
1.2.2.7 Diámetro del Chorro	15
1.2.2.8 Diámetro Pelton	16
1.2.2.9 Diámetro por Fuera del Rodete	16
1.2.2.10 Velocidad Angular del Rodete.....	16
1.2.2.11 Torque en el Rodete	17
1.2.2.12 Número de Álabes	17
1.2.3 Dimensiones de los Álabes.....	17
1.2.3.1 Ancho del Álabes	17
1.2.3.2 Profundidad del Álabes	18
1.2.3.3 Largo del Álabes	18
1.2.3.4 Ancho en el Destalonamiento	18
1.2.3.5 Punto de Cruce de las Trayectorias de los Puntos Exteriores de dos Álabes Contiguos	18
1.2.3.6 Espesor del Álabes	18
1.2.3.7 Medidas en el Plano del Álabes.....	19
1.2.4 Dimensiones del Inyector.....	20
1.2.4.1 Diámetro del Bulbo de la Aguja.....	20
1.2.4.2 Diámetros de Salida del Inyector	20
1.2.4.3 Diámetro de la Aguja	20
1.2.4.4 Longitud del Bulbo	20

1.2.4.5 Diámetro Interno del Inyector	21
1.2.4.6 Medidas en el Plano del Inyector	21
1.2.4.7 Ángulos del Inyector.....	21
1.3 MECANIZADOS DE LA TURBINA.....	22
1.3.1. Modelo y Fundición de los Álabes, Cangilones o Cucharas	22
1.3.1.1 Impresión CNC 3D	22
1.3.1.2 Fundición	22
1.3.2 Mecanizado del Inyector	23
1.3.3 Mecanizado del Rodete	23
1.3.4 Propiedades del Aluminio, ABS plus, Bronce y Acero aisi 1045	24
1.3.4.1 Aluminio	24
1.3.4.2 ABS Plus.....	25
1.3.4.3 Bronce.....	26
1.3.4.4 Acero 1045.....	26
1.4 GENERADOR.....	26
1.4.1 Clasificación de las Máquinas de DC.....	26
1.4.1.1 Servomotores.....	26
1.4.1.2 Máquina de Excitación Independiente	27
1.4.1.3 Máquina de Excitación en Derivación	27
1.4.1.4 Máquina de Excitación en Serie.....	27
1.4.1.5 Máquina de Excitación Compuesta.....	27
1.4.2 Máquina de Excitación Independiente Funcionando como Generador.....	28
1.5 SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA	28
1.6 ESTADO DEL ARTE.....	29

1.6.1 Turbina Pelton de la Universidad de Jyväskylä de Finlandia	29
1.6.2 Soluciones Energéticas, S.A.....	32
2 METODOLOGÍA	33
2.1 Diseño y Construcción de la Turbina	34
2.1.1 Álabes Pelton.....	34
2.1.1.1 Ancho del Álabes	35
2.1.1.2 Profundidad del Álabes	35
2.1.1.3 Largo del Álabes	35
2.1.1.4 Medidas en el Plano del Álabes.....	35
2.1.1.5 Ancho del Destalonamiento	36
2.1.1.6 Punto de Cruce de las Trayectorias de los Puntos Exteriores de dos Alabes Contiguas.....	36
2.1.1.7 Espesor del Álabes	36
2.1.2 Rodete Pelton	38
2.1.2.1 Velocidad Tangencial o Periférica de un Punto de la Rueda	39
2.1.2.2 Diámetro Pelton	39
2.1.2.3 Diámetro por Fuera del Rodete.....	40
2.1.2.4 Número de Álabes	40
2.1.3 Inyector	41
2.1.3.1 Diámetro del Bulbo de la Aguja.....	42
2.1.3.2 Diámetro de Salida del Inyector	42
2.1.3.3 Diámetro de la Aguja	42
2.1.3.4 Longitud del Bulbo	42

2.1.3.5 Diámetro Interno del Inyector	43
2.1.4 Carcasa.....	43
2.1.5 Poleas y Banda.....	44
2.1.5.1 Diámetro de la Polea del Eje.....	44
2.1.5.2 Criterios de Selección de la Banda	44
2.1.5.3 Longitud de la Banda	46
2.1.5.4 Distancia Entre Centros Corregida	46
2.1.5.5 Ángulo de Contacto de la Banda con la Polea Menor	47
2.1.6 Eje.....	48
2.1.6.1 Caudal.....	48
2.1.6.2 Altura Neta	48
2.1.6.3 Potencia Hidráulica	48
2.1.6.4 Potencia en el Eje	49
2.1.6.5 Velocidad Angular del Rodete.....	49
2.1.6.6 Torque en el Rodete	49
2.1.6.7 Esfuerzos Reales Independientes	53
2.1.6.8 Esfuerzos Principales.....	54
2.1.6.9 Diámetro Mínimo.....	55
2.1.7 Determinación del Número de Pruebas	56
2.1.7.1 Caudal Promedio	56
2.1.7.2 Desviación	57
2.1.7.3 Margen de Error.....	58
2.1.7.4 Determinación del Margen de Error	59
2.2 Ensamble de la Turbina Pelton antes de Instalarla en el Banco de Pruebas.....	66

2.3 Implementación de la Turbina al Banco de Pruebas.....	66
2.4 Realización de las Pruebas.....	68
3 RESULTADOS.....	70
3.1 Pruebas de Caudal vs Velocidad de Giro (Sin carga).....	70
3.1.1 Tabla de Caudal vs Velocidad de Giro.....	70
3.1.2 Grafica de Caudal vs Velocidad de Giro	71
3.2 Pruebas de Potencia de Flecha vs Velocidad de Giro	72
3.2.1 Tabla de Potencia de Flecha vs Velocidad de Giro	72
3.2.2 Grafica de Potencia de Flecha vs Velocidad de Giro.....	72
3.3 Pruebas de Potencia de Eléctrica vs Velocidad de Giro	74
3.3.1 Tabla de Potencia de Eléctrica vs Velocidad de Giro	74
3.3.2 Grafica de Potencia de Eléctrica vs Velocidad de Giro.....	75
3.4 Pruebas de Eficiencia de la Turbina vs Velocidad de Giro	76
3.4.1 Tabla de Eficiencia de la Turbina vs Velocidad de Giro.....	76
3.4.2 Grafica de Eficiencia de la Turbina vs Velocidad de Giro	77
3.5 Pruebas de Eficiencia de la Total vs Velocidad de Giro	78
3.5.1 Tabla de Eficiencia de la Total vs Velocidad de Giro.....	78
3.5.2 Grafica de Eficiencia de la Total vs Velocidad de Giro	79
3.6 Comparación de Resultados con otras Curvas de Rendimiento.....	80
3.6.1 Grafica de Caudal	80
3.6.1.1 Figura de la Grafica Teórica de Caudal vs Velocidad de Giro	80
3.6.1.2 Grafica de Caudal vs Velocidad de Giro de la Turbina Construida.....	81

3.6.2 Grafica de Torque	81
3.6.2.1 Figura de la Grafica Teórica de Torque vs Velocidad de Giro	82
3.6.2.2 Grafica de Velocidad de Giro vs Torque de la Turbina Construida, en Varias Posiciones de la válvula.....	82
3.6.2.3 Grafica de Torque vs Velocidad de Giro de la Turbina Construida, en una Posición de la válvula	83
4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	84
4.1 CONCLUSIONES	84
4.2 RECOMENDACIONES	84
BIBLIOGRAFIA	85
ANEXO	89

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Turbina Hélice y Turbina de Acción	4
Figura 2. Componentes de una Turbina Pelton de Eje Horizontal, con dos Equipos de Inyección.....	5
Figura 3. Esquema de un Distribuidor	6
Figura 4. Cámara de Distribución de una Turbina Pelton	7
Figura 5. Detalles de una Tobera de una Turbina Pelton	8
Figura 6. Detalle Punta de la Aguja	8
Figura 7. Representación Esquemática de la Actuación de un Deflector en Distintas Formas de Acción Sobre el Ahorro de Agua	9
Figura 8. Detalles de un Cangilón.....	10
Figura 9. Conjunto de una Turbina Pelton	10
Figura 10. Turbina Pelton de Eje Horizontal, con un Equipo de Inyección	11
Figura 11. Conjunto Turbina Pelton- Alternador.....	12
Figura 12. Corte del Cangilón o Alabe Atacado por el Chorro de Agua y Triángulos de Velocidades de Entrada y Salida	13
Figura 13. Plano del Alabe Pelton con sus Parámetros de Diseño.....	19
Figura 14. Plano del inyector de una Turbina Pelton	21
Figura 15. Circuito Equivalente de una Máquina de DC de Excitación Independiente	28
Figura 16. Sistema de Transmisión por Poleas	29
Figura 17. Turbina Pelton de la Universidad de Jyväskylä de Finlandia	30
Figura 18. Instalaciones Soluciones Energéticas.....	32

Figura 19. Rangos de Aplicación de una Micro Turbina Pelton	33
Figura 20. Plano del Álabe Pelton con los Datos de Diseño	34
Figura 21. Fundamentos de la Turbina	38
Figura 22. Plano del Inyector con los Datos del Diseño.....	41
Figura 23. Diseño de la Correa	45
Figura 24. Tipo de Correa (Perfil)	46
Figura 25. Sistema de transmisión.....	47
Figura 26. Diagramas de Cargas	50
Figura 27. Diagrama de Cortante.....	52
Figura 28. Diagrama de Momento	52
Figura 29. Placa Base.....	67
Figura 30. Medición del Torque	69
Figura 31. Curvas Q(n) para diversos grados de apertura.....	80
Figura 32. Curva de Par Motor.....	82
Figura 33. Modelo del Álabe	89
Figura 34. Modelo del Álabe Vista Perfil	89
Figura 35. Modelo del Álabe Vista Superior.....	89
Figura 36. Arena de Fundición.....	90
Figura 37. Proceso de Compactar la Arena.....	90
Figura 38. Molde de Fundición.....	91
Figura 39. Horno	91
Figura 40. Álabe Fundido.....	91
Figura 41. Álabe Fundido Vista Perfil.....	92
Figura 42. Álabe Fundido Vista Frente	92

Figura 43. Álabe Fundido Vista Superior	92
Figura 44. Álabe en la Fresadora.....	93
Figura 45. Resultado de los agujeros	93
Figura 46. Brillado del Álabe.....	94
Figura 47. Pulido del Álabe	94
Figura 48. Resultado Final del Álabe	95
Figura 49. Rodete	95
Figura 50. Rodete Vista Perfil	96
Figura 51. Proceso de Torneado del Inyector	96
Figura 52. Primera Parte del Inyector	97
Figura 53. Inyector Dividido	97
Figura 54. Inyector	97
Figura 55. Bulbo de la Aguja.....	98
Figura 56. Aguja del Regulador	98
Figura 57. Turbina Pelton	98
Figura 58. Montaje Turbina Pelton Vista Perfil.....	99
Figura 59. Montaje Turbina Pelton Vista Superior	99

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Número de Pruebas	58
Tabla 2. Caudal para la Potencia Hidráulica	60
Tabla 3. Propagación de error para la Potencia Hidráulica.....	61
Tabla 4. Torque para la Potencia de Flecha	62
Tabla 5. Velocidad de Giro para la Potencia de Flecha	62
Tabla 6. Propagación del Error para la Potencia de Flecha.....	63
Tabla 7. Voltaje para la Potencia Eléctrica con cuatro Bombillos	64
Tabla 8. Corriente para la Potencia Eléctrica con cuatro Bombillos.....	64
Tabla 9. Propagación de Error de la Potencia Eléctrica con cuatro Bombillos	65
Tabla 10. Caudal vs Velocidad de Giro.....	70
Tabla 11. Potencia de Fecha vs Velocidad de Giro	72
Tabla 12. Potencia de Eléctrica vs Velocidad de Giro	74
Tabla 13. Eficiencia de la Turbina vs Velocidad de Giro.....	76
Tabla 14. Eficiencia Total vs Velocidad de Giro.....	78

INDICE DE GRAFICAS

Grafica 1. Caudal vs Velocidad de Giro	71
Grafica 2. Potencia de Flecha vs Velocidad de Giro	73
Grafica 3. Potencia Eléctrica vs Velocidad de Giro	75
Grafica 4. Eficiencia de la Turbina vs Velocidad de Giro	77
Grafica 5. Eficiencia Total vs Velocidad de Giro	79
Grafica 6. Caudal vs Velocidad de giro, para diversas aperturas de la válvula.	81
Grafica 7. Velocidad de Giro vs Torque	82
Grafica 8. Torque vs Velocidad de Giro	83

RESUMEN GENERAL DEL TRABAJO DE GRADO

TÍTULO: Diseño y construcción de una turbina de impulso

AUTOR: Andrea Katherin Hernández Rojas, Indira Angarita Iguaran

FACULTAD: Facultad de Ingeniería Mecánica

DIRECTOR: Emil Hernández Arroyo

RESUMEN:

Se construyó una turbina de impulso que se utilizará en el programa de Máquinas Hidráulicas de Ingeniería Mecánica de la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga. Para la construcción de la turbina Pelton se elaboraron planos detallados, mediante el diseño y aplicación de las ecuaciones fundamentales de la hidráulica y la turbomaquinaria.

La turbina de impulso diseñada y construida obtuvo la máxima eficiencia de turbina del 97% bajo las condiciones de velocidad de giro a 430,37 rpm y un caudal de 0,00205 m³/s y la máxima eficiencia del turbogenerador de 23% a las condiciones de velocidad de giro a 259 rpm y un caudal de 0,00083 m³/s.

PALABRAS CLAVES: Turbina de impulso, máquinas hidráulicas, turbomaquinaria.

GENERAL SUMMARY

TITLE: Design and construction of an impulse turbine

AUTHOR: Andrea Katherin Hernández Rojas, Indira Angarita Iguaran

FACULTY: Mechanical Engineering

DIRECTOR: Emil Hernández Arroyo

ABSTRACT:

An impulse turbine that will be used at Universidad Pontificia Bolivariana at Bucaramanga's Mechanical Engineering Hydraulic Machines program was built.

For the construction of the Pelton turbine detailed plans were elaborated by means of the design and application of hydraulics and turbomachinery fundamental equations.

The designed and built obtained a maximum 97% turbine efficiency, under a 430.37 rpm angular velocity, a 0,00205 m³/s water flow, and a 23% turbogenerator maximum efficiency under 259 rpm angular velocity conditions and a 0.00083 m³/s water flow.

KEY WORDS: Impulse turbine, hydraulic machines, turbomachinery.

INTRODUCCION

En este proyecto se utiliza la energía hidráulica, aprovechando una caída de agua, en la que se convierte la energía potencial en cinética. Para después hacerla pasar por una turbina de impulso que gira a cierta velocidad, esta turbina fue diseñada con un parámetro de generación de potencia de 1kw. Luego esta energía cinética se convierte en energía eléctrica por medio de un generador, el cual pasa esta energía a un tablero de carga y es allí donde se puede visualizar finalmente el proceso de generación de energía.

Una turbina de impulso es una maquina hidráulica que recibe energía y transfiere energía a un fluido que fluye constantemente, debido a su movimiento rotacional, el cual a su vez hace girar unos alabes, que es donde cae directamente el chorro de agua.

En este trabajo se realizo el diseño, la construcción y evaluación de una turbina de impulso o turbina pelton, con el fin de hacer prácticas de laboratorios los estudiantes que cursen la asignatura de maquinas hidráulicas en la UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA.

Para evaluar el desempeño de la turbina pelton se realizaron pruebas de operación y medición de potencia, caudal y revoluciones por minuto; se encuentran de forma detallada los datos obtenidos, las curvas características y los resultados que arrojaron las pruebas, estos fueron comparados con curvas de desempeño teóricamente aceptadas.

OBJETIVOS

Objetivo general

Diseñar, construir y evaluar una turbina de Impulso, siguiendo los criterios contemplados en el libro “Micro Pelton Turbines”, para que sea utilizado como laboratorio de prácticas por los estudiantes de la asignatura Máquinas Hidráulicas, en la Universidad Pontificia Bolivariana, donde se podrá estudiar el funcionamiento de la turbina.

Objetivos específicos

- ◆ Diseñar una Turbina de Impulso que genere 1Kw de potencia como parámetro de diseño, teniendo como base las ecuaciones del libro “Micro Pelton Turbines”. Resultado: Planos detallados de la Turbina de Impulso. Indicador: Los planos se realizaron teniendo en cuenta las ecuaciones fundamentales de la hidráulica y la turbo maquinaria.
- ◆ Construir una Turbina de Impulso, con un regulador de caudal tipo aguja, siguiendo los parámetros del libro “Micro Pelton Turbines”, que cumpla con el diseño propuesto e implementar en el banco de turbinas ubicado cerca al edificio I. Resultado: Turbina de impulso en funcionamiento. Indicador: La turbina será construida teniendo como referencia el libro “Micro Pelton Turbines” con una potencia de generación de 1Kw como parámetro de diseño.
- ◆ Evaluar el desempeño de la turbina a través de pruebas de operación y medición de potencia, caudal, revoluciones por minuto. Resultado: Tablas y curvas de desempeño procesadas. Indicador: Los resultados obtenidos serán comparados con curvas de desempeño teóricamente aceptadas.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 TURBO MAQUINAS HIDRÁULICAS: TURBINAS

1.1.1 Definición. Las turbinas hidráulicas son turbomáquinas que permiten la transferencia de energía del agua a un rotor provisto de álabes, mientras el flujo pasa a través de éstos [2].

1.1.2 Clasificación

1.1.2.1 Según el Grado de Reacción. Las turbinas hidráulicas, según el grado de reacción, se clasifican en dos grupos: turbinas de acción y turbina de reacción. (Ver figura 1); Esta clasificación se funda en el concepto de grado de reacción, si el grado de reacción es cero, la turbina se llama de acción, si el grado de reacción es igual a uno, la turbina se llama de reacción (ver figura 1) [4].

El grado de reacción de una bomba se mide así.

$$B = \frac{\text{Altura de presión comunicada por el rodete}}{\text{Altura total comunicada por el rodete}}$$

Análogamente, el grado de reacción de una turbina se define así:

$$B = \frac{\text{Altura de presión absorbida por el rodete}}{\text{Altura total absorbida por el rodete}}$$

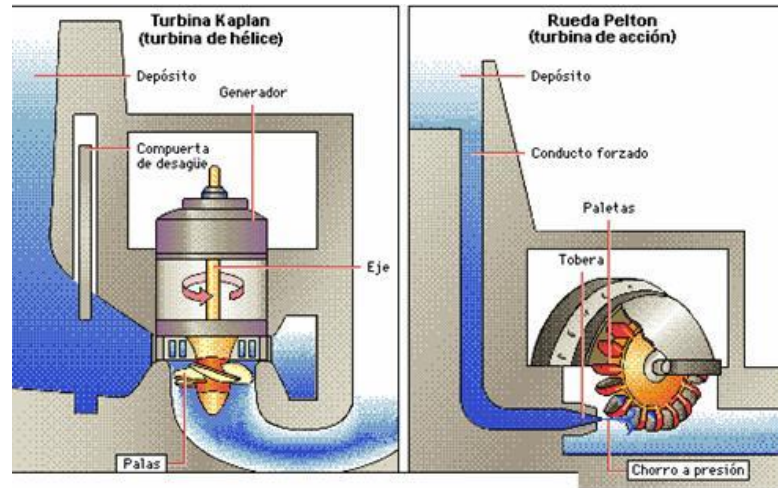


Figura 1. Turbina Hélice y Turbina de acción.

Fuente [3]

1.1.2.2 Según el Número Específico de Revoluciones. En la actualidad se construyen principalmente cinco tipos de turbinas:

Pelton, Francis, Déraiz, Hélice y Kaplan. A éstas hay que añadir las bombas-turbinas reversibles de los grupos binarios de las centrales de acumulación por bombeo, La turbina Pelton es de acción y las otras cuatro de reacción.

La naturaleza provee los saltos hidráulicos con potencias muy variadas y una misma potencia con combinaciones múltiples de Q y H (H -salto neto). Por tanto aquí como en las bombas, el rodete de las turbinas hidráulicas va cambiando insensiblemente de forma para adaptarse a las diferentes condiciones de servicio.

Por tanto aquí como en las bombas, la clasificación más precisa de las turbinas hidráulicas es una clasificación numérica, que se hace asignando a toda familia de turbinas geoméricamente semejantes un número, a saber, el numero específico de revoluciones [4].

1.2 TURBINA PELTON

Las turbinas de impulso o de acción tienen la peculiaridad de aprovechar solamente la energía cinética del fluido; no existe, pues, gradiente de presión entre la entrada y salida de la máquina. El grado de reacción es cero [2].

Su utilización es idónea en saltos de gran altura (alrededor de 200 m y mayores), y caudales relativamente pequeños (hasta 10 m³/s aproximadamente). Pueden ser instaladas con el eje en posición vertical u horizontal [5].

1.2.1 Componentes de una Turbina Pelton. Los componentes esenciales de una turbina Pelton. (Ver figura 2).

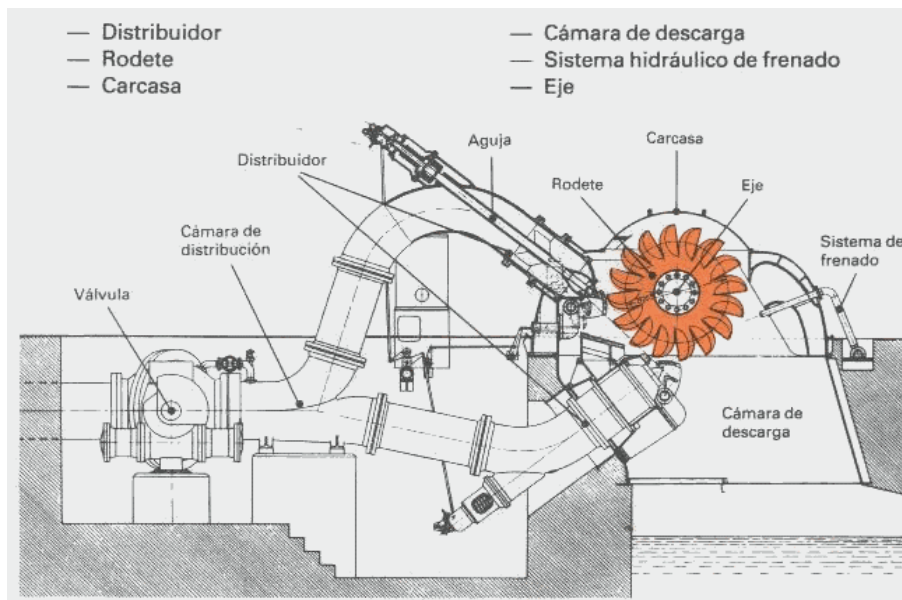


Figura 2. Componentes de una Turbina Pelton de Eje Horizontal, con Dos Equipos de Inyección

Fuente [6]

1.2.1.1 Distribuidor. Está constituido por uno o varios equipos de inyección de agua. Cada uno de dichos equipos, formado por determinados elementos mecánicos, tiene como misión dirigir, convenientemente, un chorro de agua,

cilíndrico y de sección uniforme, que se proyecta sobre el rodete, así como también, regular el caudal preciso que ha de fluir hacia dicho rodete, llegando a cortarlo totalmente cuando proceda [6]. (ver figura 3) [5].

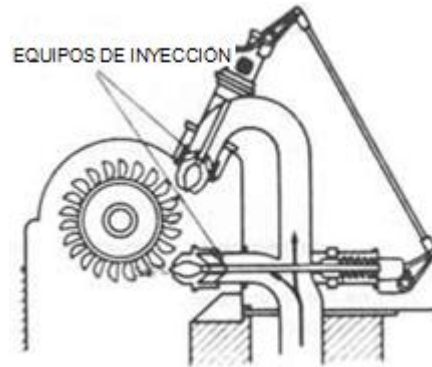


Figura 3. Esquema de un Distribuidor

Fuente [5]

- **Partes Constitutivas del Distribuidor.** El distribuidor consta de las siguientes partes:
 - ◆ **Cámara de Distribución:** Consiste en la prolongación de la tubería forzada acoplada a ésta mediante una brida de unión, posteriormente a la situación de la válvula de entrada a la turbina, según la trayectoria normal del agua. También se nombra **cámara de inyectores**. Tiene como misión fundamental, conducir el caudal de agua y servir de soporte a los demás mecanismos que integran el distribuidor (ver figura 4) [5].

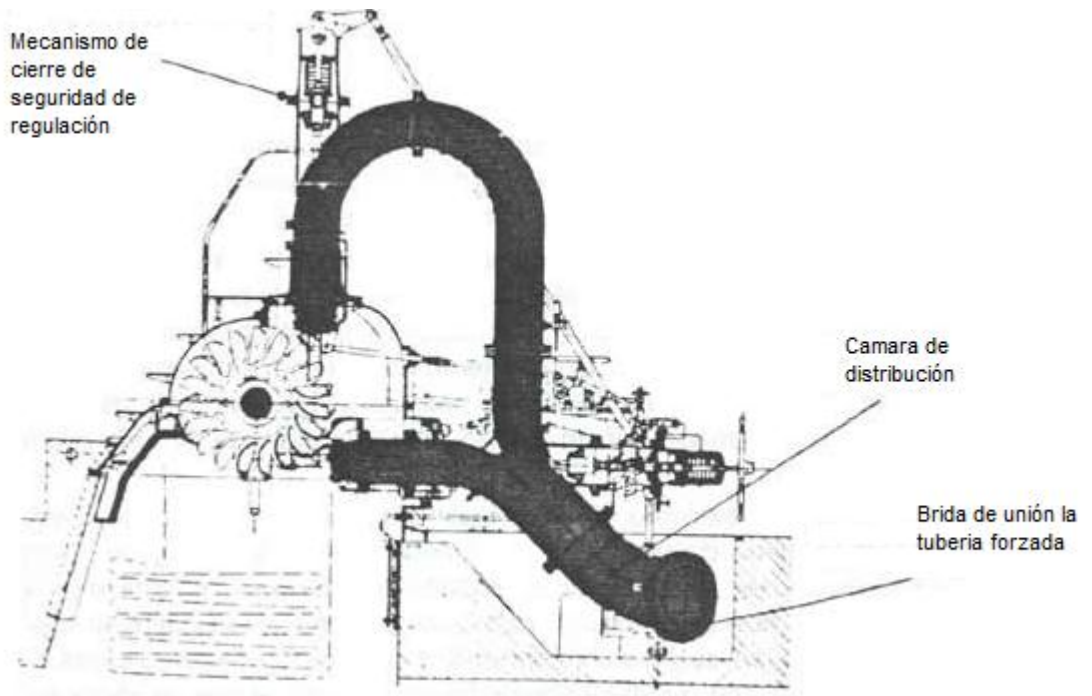


Figura 4. Cámara de Distribución de una Turbina Pelton.

Fuente [5]

- ◆ **Inyector:** Transforma la energía de presión del fluido en energía cinética [4]. Es el elemento mecánico destinado a dirigir y regular el chorro de agua [7]. Está compuesto por:
- ◆ **Tobera:** Constituye una boquilla con orificio de sección circular, instalada en la terminación de la cámara de distribución. Dirige el chorro de agua, tangencialmente hacia la periferia del rotor, de tal modo que la prolongación de la tobera forma un ángulo de 90° con los radios del rotor (ver figura 5) [7].

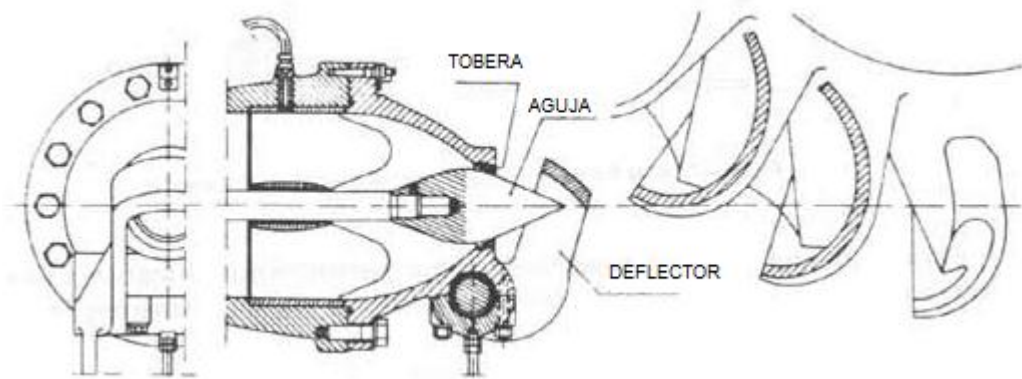


Figura 5. Detalles de la Tobera de una Turbina Pelton.

Fuente [7]

- ◆ **Aguja:** Constituye un vástago situado concéntricamente en el interior del cuerpo de la tobera con movimiento de desplazamiento longitudinal en dos sentidos (ver figura 6) [7].



Figura 6. Detalle de Punta de Aguja

Fuente [7]

- ◆ **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 rotor a fin de desviar, total o parcialmente el agua, impidiendo el embalamiento del rotor [7].(ver figura 7) [5].

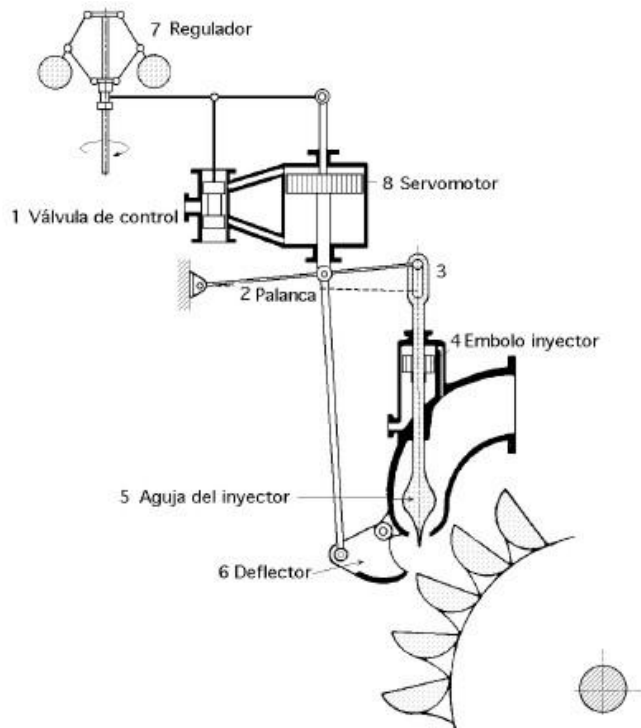


Figura 7: Representación Esquemática de la Actuación de un Deflector en Distintas Formas de Acción Sobre el Ahorro de Agua. (p)

Fuente [5]

- ◆ **Equipo de Regulación de Velocidad:** Está constituido por un conjunto de dispositivos a base de servomecanismos, cuya función es mantener constante la velocidad de rotación [7].

1.2.1.2 Rodete. Es la pieza clave donde se transforma la energía hidráulica del agua en energía mecánica [7].

Esencialmente consta de los siguientes elementos:

- ◆ **Rueda Motriz:** Está unida rígidamente al eje, montada en el mismo por medio de chavetas y anclajes adecuados. Su periferia está mecanizada apropiadamente para ser soporte de los denominados **cangilones**.

- ◆ **Cangilones:** también denominados álabes, cucharas o paletas. Están diseñados para recibir el empuje directo del chorro de agua. Su forma es similar a la de una doble cuchara, con una arista interior lo más afilada posible y situada centralmente en dirección perpendicular hacia el eje, de modo que divide al cangilón en dos partes simétricas de gran concavidad cada una, siendo sobre dicha arista donde incide el chorro de agua (Ver figura 8) [5].

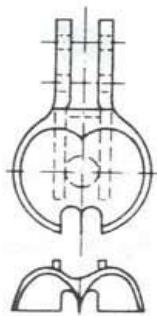


Figura 8. Detalle de un Cangilón

Fuente [5]

1.2.1.3 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 cangilones, abandona a éstos (ver figura 9) [5].



Figura 9. Conjunto de una Turbina Pelton

Fuente [5]

1.2.1.4 Cámara de Descarga. La cámara de descarga, también conocida como tubería de descarga, es la zona por donde cae el agua libremente hacia el desagüe, después de haber movido el rotor (Ver figura 10) [8].

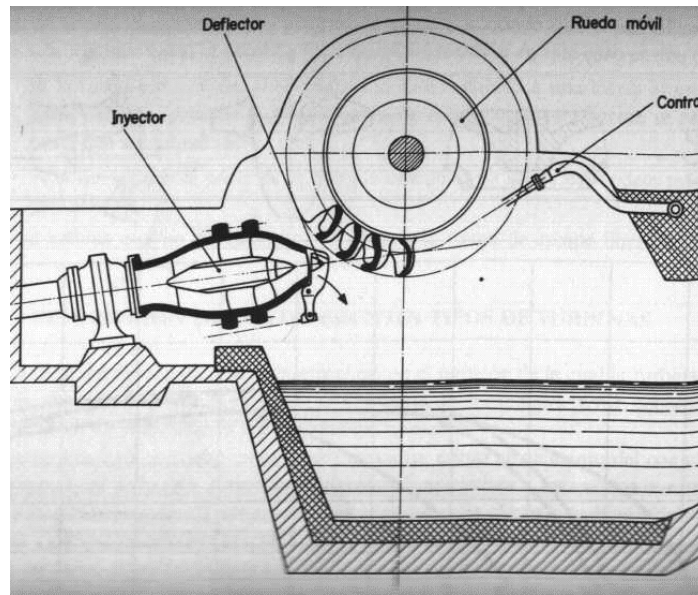


Figura 10. Turbina Pelton de Eje Horizontal, con un Equipo de Inyección.

Fuente [8]

1.2.1.5 Sistema Hidráulico de Frenado. Consiste en un circuito de agua derivado de la cámara de distribución. El agua, proyectada a gran velocidad sobre la zona convexa de los cangilones, favorece el rápido frenado del rodete, cuando las circunstancias lo exigen [8].

1.2.1.6 Eje. Esta rígidamente unido al rotor y situado adecuadamente sobre cojinetes debidamente lubricados, transmite el movimiento de rotación al eje del generador. El número de cojinetes instalados así como su función, radial o radial - axial, depende de las características del grupo turbina – generador [8] (Ver figura 11) [9].



Figura 11. Conjunto Turbina Pelton/Alternador.

Fuente [9]

1.2.2 Estudio teórico

1.2.2.1 Triángulos de Velocidades. Para hacer los cálculos se asumió que el chorro pegará por completo y constantemente en el cangilón o álabe, y que este siempre ataca en dirección perpendicular a la arista o nervio central de ésta.

La velocidad absoluta del agua a la entrada (\vec{C}_1) tiene igual dirección que la velocidad tangencial del rodete (\vec{u}) por lo cual se obtiene un triángulo de velocidades que obliga a tener un ángulo β_1 de entrada nulo, situación que en la práctica no es posible debido a que la arista o nervio central no puede tener un espesor nulo. Esto se traduce en la existencia de un choque entre el chorro y el álabe en su arista o nervio central, pero será despreciado para fines de cálculo.

A la entrada se tiene $\vec{C}_1, \vec{u}, \vec{w}_1$ con la misma dirección y sentido. Así,

$$\vec{C}_1 = \vec{u} + \vec{w}_1$$

Donde \vec{C}_1 es igual a la velocidad de salida del chorro desde el inyector (C1). Por otro lado, a la salida la velocidad relativa \vec{w}_1 tiene la dirección del ángulo β_2 Luego,

La magnitud de la proyección de \vec{C}_2 en la dirección de \vec{u}_2 (C_{u2}) es:

$$C_{u2} = u_2 - w_2 \cos(\beta_2)$$

Como los puntos de entrada (1) y salida (2) del agua pertenecen a la cazoleta, se tiene que las velocidades tangenciales deben ser iguales [1]. Así,

$$\vec{u} = \vec{u}_1 = \vec{u}_2$$

La magnitud de la proyección \vec{C}_1 en la dirección de \vec{u}_1 (C_{u1}), (ver figura 12).

$$C_{u1} = u + w_1$$

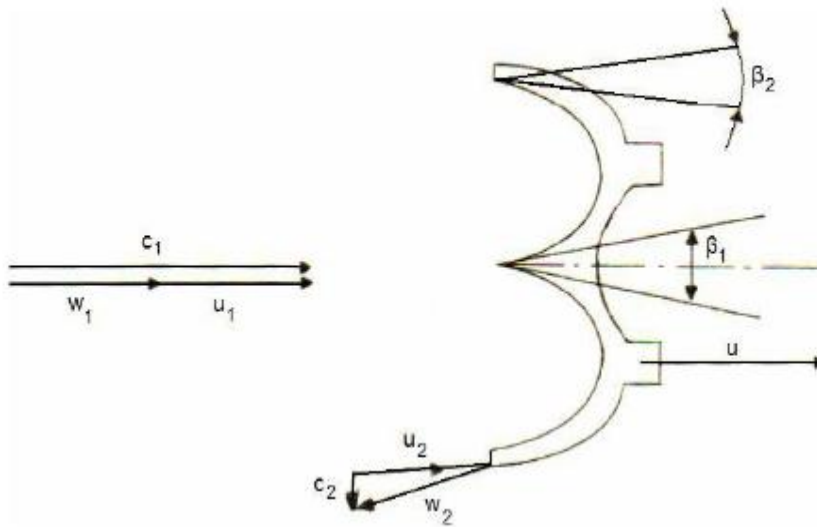


Figura 12. Corte del Cangilón o Álabe Atacado por el Chorro de Agua y Triángulos de Velocidades de Entrada y de Salida.

Fuente: [10]

1.2.2.2 Velocidad del Chorro (c_1). La velocidad teórica del chorro a la salida del inyector se determina así [1]:

$$C_1 = K_c \sqrt{2g * H_n}$$

Donde:

K_c : Coeficiente de velocidad absoluta (coeficiente de tobera)

H_n : Altura neta de la turbina

g : Aceleración de gravedad

El coeficiente K_c varía entre 0,96 y 0,98%, esto debido a la forma del inyector.

1.2.2.3 Velocidad Tangencial o Periférica de un Punto de la Rueda (u_1). La velocidad periférica se determina así [1]:

$$U_1 = K_u \sqrt{2g * H_n}$$

Donde:

K_u : Coeficiente de velocidad

H_n : Altura neta de la turbina

g : Aceleración de gravedad

El coeficiente K_u varía entre 0,45 y 0,49%.

1.2.2.4 Caudal (Q). El caudal se determina mediante esta fórmula; en la cual se tiene la potencia de diseño, que es la que deseo generar y la presión de diseño que es la del banco de pruebas.

$$Q = \frac{P_{OTENCIA}}{P_{RESIÓN}}$$

Donde:

P = Potencia de diseño en vatios (W)

P = Presión de diseño (Pa) [2]

1.2.2.5 Altura Neta (H_n). Se calcula con la siguiente ecuación:

$$H_n = \frac{P_{OTENCIA}}{\gamma * Q}$$

Donde:

P = Potencia de diseño en vatios (W)

γ : Peso específico del agua

Q: Caudal

1.2.2.6 Potencia Hidráulica (P_{hid}). La máxima potencia que se puede obtener con un salto de agua H_n y un

Caudal Q es:

$$P_{hid} = Q * \rho * g * H_n$$

Donde:

Q: Caudal

ρ : Densidad del agua

g: Aceleración de gravedad

H_n : Altura neta de la turbina [1]

1.2.2.7 Diámetro del Chorro (d). En base a este diámetro se calculan las dimensiones del cangilón o álabe.

$$d = \sqrt{\frac{4 * Q}{\pi * C_1}}$$

Donde:

Q: Caudal

C_1 : Velocidad del chorro

π : (π) = 3,1416 [1]

1.2.2.8 Diámetro Pelton (D_p). Se define diámetro pelton al diámetro de la rueda que es tangente al centro del chorro.

$$D_p = \frac{60 * u_1}{\pi * n}$$

Donde:

U_1 : Velocidad periférica

n : Revoluciones

π : (π) = 3,1416 [1]

1.2.2.9 Diámetro por Fuera del Rodete (D_a). Esta medida se puede apreciar en la Figura 13.

$$D_a = D_p + 1,2h$$

Donde:

D_p : Diámetro pelton

h : Altura de las cucharas [1]

1.2.2.10 Velocidad Angular del Rodete (W). Se calcula con la siguiente ecuación:

$$W = 2\pi * N$$

Donde:

N : Velocidad angular

π : (π) = 3,1416 [1]

1.2.2.11 Torque en el Rodete (T). Se calcula con la siguiente ecuación:

$$T = \frac{P_{\text{eje}}}{W}$$

Donde:

P_{eje} = Potencia del eje

W = Velocidad angular del rodete [1]

1.2.2.12 Número de Álabes (z). Se calcula con la siguiente ecuación:

$$z = \frac{D_p * \pi}{2d}$$

Donde:

D_p : Diámetro pelton

π : (Pi) = 3,1416

d : Diámetro del chorro [1]

1.2.3 Dimensiones de los Álabes. Las dimensiones del álabe son proporcionales al diámetro del chorro, y en base a este se hacen los cálculos para las respectivas dimensiones. [1]

1.2.3.1 Ancho del Álabe (b). Se calcula con la siguiente ecuación:

$$b = 2,85*d$$

Donde:

d : Diámetro del chorro [1]

1.2.3.2 Profundidad del Álabes (t). Se calcula con la siguiente ecuación:

$$t = 0,9*d$$

Donde:

d : Diámetro del chorro [1]

1.2.3.3 Largo del Álabes (h). Se calcula con la siguiente ecuación:

$$h = 2,4*d$$

Donde:

d : Diámetro del chorro [1]

1.2.3.4 Ancho en el Destalonamiento (a). Se calcula con la siguiente ecuación:

$$a = 1,2*d$$

Donde:

d : Diámetro del chorro [1]

1.2.3.5 Punto de Cruce de las Trayectorias de los Puntos Exteriores de dos Álabes Contiguos (K). Se calcula con la siguiente ecuación:

$$K = 0,135*D_p$$

Donde:

D_p : Diámetro pelton [1]

1.2.3.6 Espesor del Álabes (X). Se calcula con la siguiente ecuación:

$$X = K - t$$

Donde:

K: Punto de cruce de las trayectorias de los puntos exteriores de dos álabes contiguas

t : Profundidad de la cuchara [1]

1.2.3.7 Medidas en el Plano del Álabes (ver figura 13). Se calcula con la siguiente ecuación:

$$h_1 = 0,175*d$$

$$h_2 = 1,175*d$$

Donde:

d : Diámetro del chorro [1]

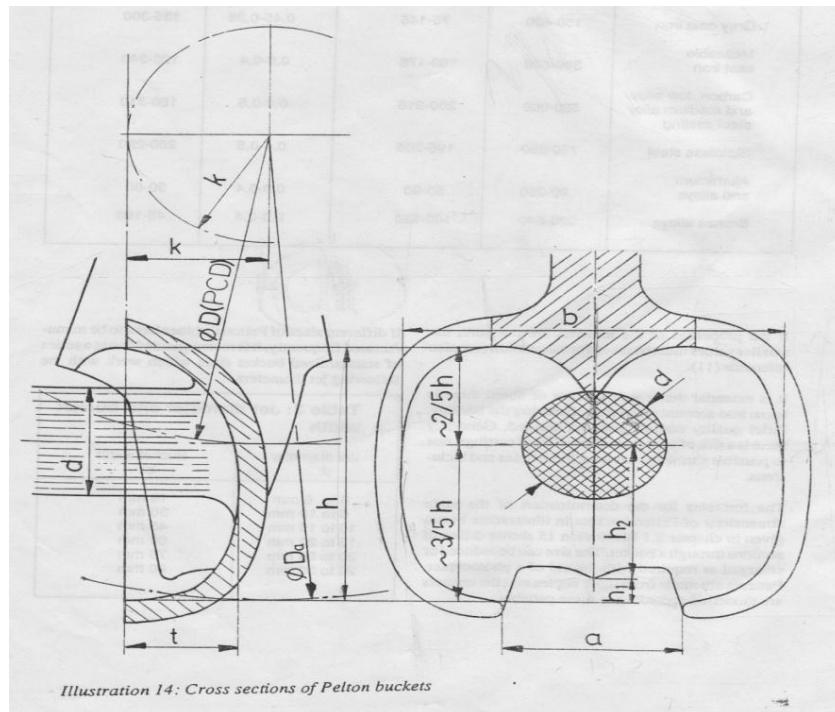


Figura 13. Plano del Álabes Pelton con sus Parámetros de Diseño

Fuente [1]

1.2.4 Dimensiones del Inyector. Las dimensiones del inyector están en función al diámetro del chorro, y en base a este se hacen los cálculos para las respectivas dimensiones [11].

1.2.4.1 Diámetro del Bulbo de la Aguja (a). Se calcula con la siguiente ecuación:

$$a = 1,42 * d$$

Donde:

d : Diámetro del chorro [11]

1.2.4.2 Diámetros de Salida del Inyector (dt). Se calcula con la siguiente ecuación:

$$dt = 1,1 * d$$

Donde:

d : Diámetro del chorro[11]

1.2.4.3 Diámetro de la Aguja (dv). Se calcula con la siguiente ecuación:

$$dv = 1,25 * d$$

Donde:

d : Diámetro del chorro[11]

1.2.4.4 Longitud del Bulbo (b). Se calcula con la siguiente ecuación:

$$b = 3,25 * d$$

Donde:

d : Diámetro del chorro[11]

1.2.4.5 Diámetro Interno del Inyector (d_1). Se calcula con la siguiente ecuación:

$$d_1 = 2,5 * d$$

Donde:

d : Diámetro del chorro[11]

1.2.4.6 Medidas en el Plano del Inyector (ver figura 14). Se calcula con la siguiente ecuación:

$$x = 0,5 * d$$

$$l = 6 * d$$

Donde:

d : Diámetro del chorro[11]

1.2.4.7 Ángulos del Inyector

α_0 Esta entre 40° y 60°

α_1 Esta entre 60° y 90°

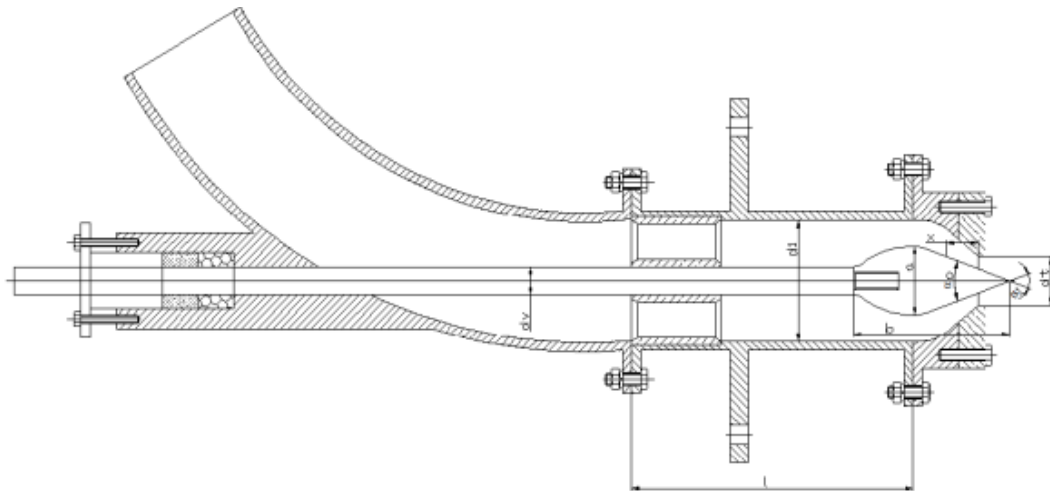


Figura 14. Plano del Inyector de una Turbina Pelton

Fuente [11]

1.3 MECANIZADOS DE LA TURBINA

1.3.1 Modelo y Fundición de los Álabes, Cangilones o Cucharas.

1.3.1.1 Impresión CNC 3D. El modelo de la cuchara se realizó en una impresora CNC 3D Dimension Uprint de Stratasys.

Para fabricar un prototipo rápido es necesario contar con un diseño CAD 3D pero además hay que exportarlo a formato STL. El formato STL es la forma más simple de almacenar la información de un sólido o unas superficies. Convierte toda la información que contiene a triángulos o facetas. Por ejemplo una superficie plana y rectangular se definiría con dos triángulos, pero una superficie curva, necesitará un gran número de triángulos. Este formato de fichero es el que lee prácticamente la totalidad de sistema de impresión 3D, mediante su propio software de proceso y posicionamiento de las piezas. Es decir, traducimos nuestro diseño 3D a formato STL, el software de la impresora 3D lo lee y prepara la posición de construcción de la pieza, filetea en capas el volumen, prepara los soportes y envía a máquina la información.

Normalmente. El software de las impresoras 3D no tiene grandes capacidades por lo que los ficheros STL tienen que llegar en buen estado. Esto quiere decir que necesitan estar bien cerrados y sin agujeros o áreas sin definir. Además de bien cerrados, los STL necesitan tener buena calidad y definición ya que un número bajo de triángulos hace que esas caras segmentadas queden reflejadas en el prototipo fabricado [12]

1.3.1.2 Fundición. Se denomina fundición y también esmelter al proceso de fabricación de piezas, comúnmente metálicas pero también de plástico,

consistente en fundir un material e introducirlo en una cavidad, llamada molde, donde se solidifica.

El proceso tradicional es la fundición en arena por ser ésta un material refractario muy abundante en la naturaleza y que, mezclada con arcilla, adquiere cohesión y moldeabilidad in perder la permeabilidad que posibilita evaluar los gases del molde al tiempo que se vierte el metal fundido.

La fundición en arena consiste en colar un metal fundido, típicamente aleaciones de hierro, acero, bronce, latón y otros, en un molde de arena, dejarlo solidificar y posteriormente romper el molde para extraer la pieza fundida.

La fundición en arena requiere un molde a tamaño natural de madera, plástico y metales que define la forma externa de la pieza que se pretende reproducir y que formara la cavidad interna en el molde [13]

1.3.2 Mecanizado del Inyector

Torno: Se utiliza para producir piezas redondas. Las piezas de trabajo, sostenida por un dispositivo de sujeción montado en el eje del torno, se hace girar contra la herramienta de corte, lo que produce una forme cilíndrica. El torneado cilíndrico, el ahusamiento, el careado, el torneado interior, el barrenado, el escariado, y la generación de roscas son algunas de las operaciones comunes llevadas a cabo en un torno [14].

1.3.3 Mecanizado del Rodete

Fresadora: La fresadora horizontal y la fresadora vertical son dos de las herramientas más útiles y versátiles. Ambas maquinas utilizan uno o mas fresas o cortadores giratorios que tiene uno o varios filos cortantes. La pieza de trabajo,

que debe quedar sujeta en una prensa de tornillo, o con un aditamento o accesorio para fijar a la mesa, es avanzada o alimentada hacia la herramienta de corte giratoria. Equipadas con los accesorios apropiados, las maquinas de fresado son capaces de llevar a cabo una gran variedad de operaciones, como taladrado, escariado, barreado, contra taladrado y careado, para tuercas, y sirve para producir superficies planas y de contorno, ranuras, dientes de engranajes y formas helicoidales [14].

1.3.4 Propiedades del Aluminio, ABS plus, Bronce y Acero AISI 1045

1.3.4.1 Aluminio. El aluminio es uno de los metales más abundantes de la corteza terrestre, de la que forma parte en una proporción del 8% aproximadamente. No se encuentra en la naturaleza, sino formando parte de los minerales de los cuales los más importantes son las bauxitas posee una combinación de propiedades que le convierten en un material extremadamente útil en la industria.

- ◆ **Propiedades físicas.** El aluminio es un meta blanco brillante y muy ligero, con un peso específico $2,7 \text{ g/cm}^3$ aproximadamente un tercio del peso del acero. Su conductividad eléctrica es aproximadamente un 60% la del cobre y unas 3,5 veces superior a la del hierro. Además posee un punto de fusión relativamente bajo lo que unido a su punto de ebullición bastante alto, facilita su fusión y moldeo.
- ◆ **Propiedades químicas.** La propiedad química mas destacada del aluminio es su gran resistencia a la corrosión debido a la forma de una capa de alúmina sobre la superficie del metal que impide la difusión del oxido hacia el metal base propiedad que resulta especialmente útil en aquellos productos que requieren protección o conservación. Si en algunas aplicaciones industriales fuera necesaria una mayor resistencia a la corrosión, esta se puede conseguir

mediante anodizado, que es un tratamiento superficial que consiste en aumentar artificialmente el espesor de la capa de alúmina.

- ◆ **Propiedades mecánicas.** Las propiedades mecánicas más destacables del aluminio son su baja resistencia mecánica y su gran ductilidad y maleabilidad, propiedades que facilitan el conformado de productos a través de laminación, forjado o extrusionado. Sus amplias posibilidades de tratamiento con máquinas a altas velocidades proporcionan una elevada productividad, lo que lleva a un abaratamiento de los costes y a un ahorro energético. Debido a la baja resistencia mecánica del aluminio, este se alea con diferentes metales como el cobre, magnesio, silicio, manganeso y zinc con lo que se obtienen diferentes aleaciones con una mejor resistencia mecánica [15].

1.3.4.2 ABS Plus. Es un material termoplástico ideal para moldeado conceptual, desarrollo de prototipos funcionales herramientas para la industria manufacturera y piezas de uso final.

El matrimonio de ABSplus con Fortusen 3D sistemas de producción le da la capacidad para crear piezas reales directamente desde archivos digitales que son más fuertes, más suave y con detalles característicos de alta calidad.

ABSplus es hasta un 40% más fuerte que el estándar de material ABS y es un material ideal para prototipo conceptual a través de la verificación del diseño hasta la fabricación digital directa. El matrimonio de ABSplus con FDM tecnología le da la capacidad de crear elementos reales TM dirigidos a partir de archivos digitales que son más fuertes, más suave y con más función de los detalles [16].

1.3.4.3 Bronce. Es una aleación de cobre y estaño en cantidades variables, pudiendo contener otros componentes en menor proporción como zinc, plomo, etc. Su módulo de elasticidad esta entre 11000 y 12500 kg/mm².

El bronce se usa para la construcción de piezas que están sometidas a rozamiento como por ejemplo cojinetes de deslizamiento, guarniciones de válvulas y grifos, coronas de engranajes, etc. Es muy resistente a la corrosión y es adecuado para trabajar sumergido en agua [17].

1.3.4.4 Acero 1045. Son aceros al medio carbono, procesado en horno eléctrico. En alto contenido de carbono les imparte mejores propiedades de resistencia que el 1018. Las barras laminadas en caliente usadas en la manufacturera de estos aceros son de calidad especial. La mayoría de las barras son estiradas en frío, aunque algunas medidas grandes son torneadas y pulidas. Cuando un alto grado de seguridad dimensional y rectitud se requiere, se recomienda usar la "flecha de precisión", la cual es producida por rectificación y pulido [18].

1.4 GENERADOR

Un generador eléctrico es un dispositivo capaz de mantener la diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos, llamados polos. Los generadores eléctricos son máquinas encargadas de transformar la energía mecánica en eléctrica [19].

1.4.1 Clasificación de las Máquinas de DC. De acuerdo a la conexión de los devanados de campo las maquinas de dc se pueden clasificar en:

1.4.1.1 Servomotores. Este tipo de motores tiene imanes permanentes en el estator para producir el flujo necesario para funcionar. Este motor es el más sencillo en construcción, operación y ecuaciones.

1.4.1.2 Máquina de Excitación Independiente. Este tipo de motores es un poco más grande tanto físicamente como en potencia. El flujo es producido por electroimanes o bobinas colocadas en el estator. Para que funcione adecuadamente el estator debe ser alimentado con una fuente de alimentación independiente en el campo y en la armadura. Este motor puede trabajar en la zona lineal, donde su comportamiento es similar al servomotor; o puede trabajar en la zona de saturación donde la relación tensión corriente de flujo es regida por una tabla o por una grafica. Por lo general los devanados de campo y armadura tienen tensiones de alimentación diferentes.

1.4.1.3 Máquina de Excitación en Derivación. Esta máquina en su construcción y operación es similar a la máquina de excitación independiente, la diferencia principal radica en que las tensiones del devanado de campo y armadura tienen la misma tensión nominal y se puede alimentar con una sola fuente.

1.4.1.4 Máquina de Excitación en Serie. El campo de esta máquina tiene pocas vueltas y por él debe circular una gran corriente, esta es la misma corriente de armadura. Este tipo de maquina no debe operarse en vacío, ya que como generador la corriente en la armadura es nula por que no hay campo; como motor esta máquina puede embalsarse y dañarse. Este tipo de máquina se construye para mover o producir grandes cantidades de potencia.

1.4.1.5 Máquina de Excitación Compuesta. Este tipo de máquina puede tener la combinación de las maquinas de excitación independiente y serial. El campo principal es producido por el devanado shunt o paralelo y este se puede modificar (reforzar o debilitar) por el devanado serial. Las ecuaciones para su empleo son las más complejas de todas pero su operación es tal vez una de las más confortables.

1.4.2 Máquina de Excitación Independiente Funcionando como Generador

Para que una máquina de excitación independiente trabaje como generador debe tener una máquina motriz que le suministre potencia mecánica, a esta máquina se le puede llamar primo motor y puede ser un motor a gasolina, una turbina de vapor, una turbina pelton etc. (ver figura 15) [20].

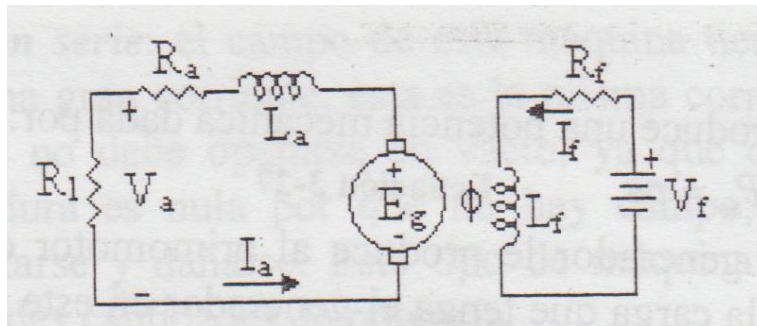


Figura 15. Circuito Equivalente de una Máquina de DC de Excitación Independiente

Fuente [20]

1.5 SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA

Los sistemas de transmisión de poleas y correas se emplean para transmitir la potencia mecánica proporcionada por el eje del motor entre dos ejes separados entre sí por una cierta distancia. La transmisión del movimiento por correas se debe al rozamiento éstas sobre las poleas, de manera que ello sólo será posible cuando el movimiento rotórico y de torsión que se ha de transmitir entre ejes sea inferior a la fuerza de rozamiento. El valor del rozamiento depende, sobre todo, de la tensión de la correa y de la resistencia de ésta a la tracción; es decir, del tipo de material con el que está construida (cuero, fibras, hilos metálicos recubiertos de goma, etc.) y de sus dimensiones (ver figura 16).

Las **poleas** son ruedas con una o varias hendiduras en la llanta, sobre las cuales se apoyan las correas.

Las **correas** son cintas cerradas de cuero y otros materiales que se emplean para transmitir movimiento de rotación entre dos ejes generalmente paralelos. Pueden ser de forma plana, redonda, trapezoidal o dentada [21].

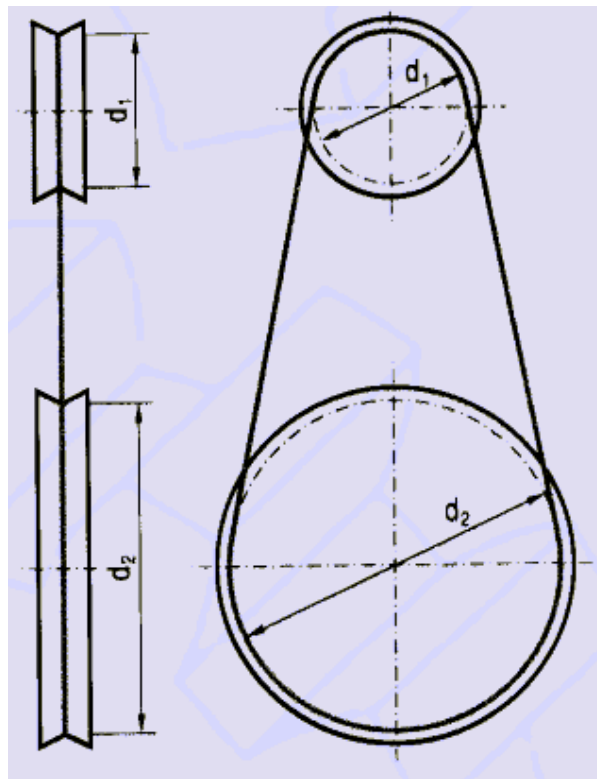


Figura 16. Sistema de Transmisión por Poleas

Fuente [21]

1.6 ESTADO DEL ARTE

1.6.1 Turbina Pelton de la Universidad de Jyväskylä de Finlandia.

La generación de energía hidroeléctrica desempeña un papel importante en el suministro de energía global. Por ejemplo, en 2003 representó casi el 16% de la generación mundial de electricidad [22]. La turbina de impulso (pelton), que fue patentada por Lester Pelton en 1880, es comúnmente utilizada en la generación

hidroeléctrica en las zonas geográficas donde la cabeza de agua alta está disponible, pero los flujos de volumen son pequeños.

Para el programa de energías renovables (RE) de la universidad de Jyväskylä (Jyu) Finlandia que inició en 2003 un programa multidisciplinario grado Master-nivel se centra en el sector de la RE. Un componente importante y obligatorio del plan de estudios es un curso de laboratorio que tiene como objetivo proporcionar a los estudiantes una comprensión de los principios físicos que intervienen en la generación de energía renovable. Con este fin, se realizó el diseño, construcción y evaluación de una turbina de impulso (pelton) de 12 paletas equidistantes entre sí alrededor del eje central. El eje de la turbina está equipada con una rueda de la polea (primer plano) que impulsa el generador de corriente continua (no se muestra) con una correa de goma (ver figura 17).



Figura 17. Turbina Pelton de la Universidad de Jyväskylä de Finlandia

Fuente [23]

Como resultado de las pruebas de la turbina se encontró que tienen una eficiencia mecánica máxima de $0,47 \pm 0,02$ para un caudal de agua de 0.17 l/s. Las turbinas sirven para demostrar los principios de la energía hidroeléctrica y son muy adecuadas para la educación en energía renovable.

Otro grupo de investigación que también trabaja en el aprovechamiento de la energía hidráulica, es la universidad de los lagos de Chile, quienes ejecutaron la construcción de la turbina hidráulica Pelton; esta fue realizada por parte de dos alumnos de pregrado de la carrera de Ingeniería Civil Industrial. La facultad se encuentra en una etapa de desarrollo de sus equipos de laboratorio, por lo cual ha fomentado el diseño y la construcción de estos, a través de los trabajos de titulación de los alumnos.

El hecho de plasmar en un equipo o máquina los conocimientos que se entregan en el aula, no solo son beneficioso en el proceso educativo de los alumnos, sino que también en el ejercicio de la docencia, dado que obliga a profundizar en los temas teóricos y prácticos de los programas académicos como mecánica de fluidos, máquinas hidráulicas y térmicas, en las cuales muchas veces, en las aulas de clases no son abarcados en toda su extensión.

Este proyecto permite medir los datos de entrada y salida, para así poder determinar la potencia hidráulica de entrada y la potencia mecánica de salida en el eje de la turbina y por tanto el rendimiento de la turbina. La potencia hidráulica de entrada se determina con el gasto másico del agua y la velocidad de llegada del agua a los álabes, y la potencia mecánica de salida se determina con un freno de fricción que nos permite medir el torque que entrega la turbina, y con la velocidad angular de ésta, la cual se mide con un tacómetro. [23]

La facultad de mecánica de la universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga se ha preocupado por investigar y mostrar a sus estudiantes la importancia de aprovechar los recursos hídricos existentes para la producción de energías limpias y es ahí donde nace la idea de realizar la turbina de impulso.

1.6.2. Soluciones Energéticas, S.A

Es una empresa formada por un equipo multidisciplinar con una alta experiencias en el campo de las energías renovables. Diseña y fabrica sus propios productos y sistemas para: solar fotovoltaica, eólica, e hidráulica.

Las aplicaciones de estos sistemas son muy variadas: electrificación de casas de campo y chalets, sistemas de bombeo para riego y consumo humano, naves ganaderas y granjas cinegéticas, depuradoras de aguas residuales, sistemas de señalización terrestre y marítima, repetidores (radio, televisión, teléfonos móviles), iluminación de carreteras y vallas publicitarias, etc (ver figura 18) [9]



Figura 18. Instalaciones Soluciones Energéticas

Fuente [9]

2. METODOLOGÍA

Para el diseño y construcción de la turbina se investigó sobre los parámetros iniciales de diseño a utilizar, también cada uno de los procesos y cálculos necesarios, esto de diferentes fuentes bibliográficas, para obtener la turbina deseada.

A continuación se mencionan los parámetros utilizados y los resultados obtenidos en el diseño.

Parámetros de:

Caudal = 5 l/s

Potencia = 1kw

Revoluciones = 1400rpm

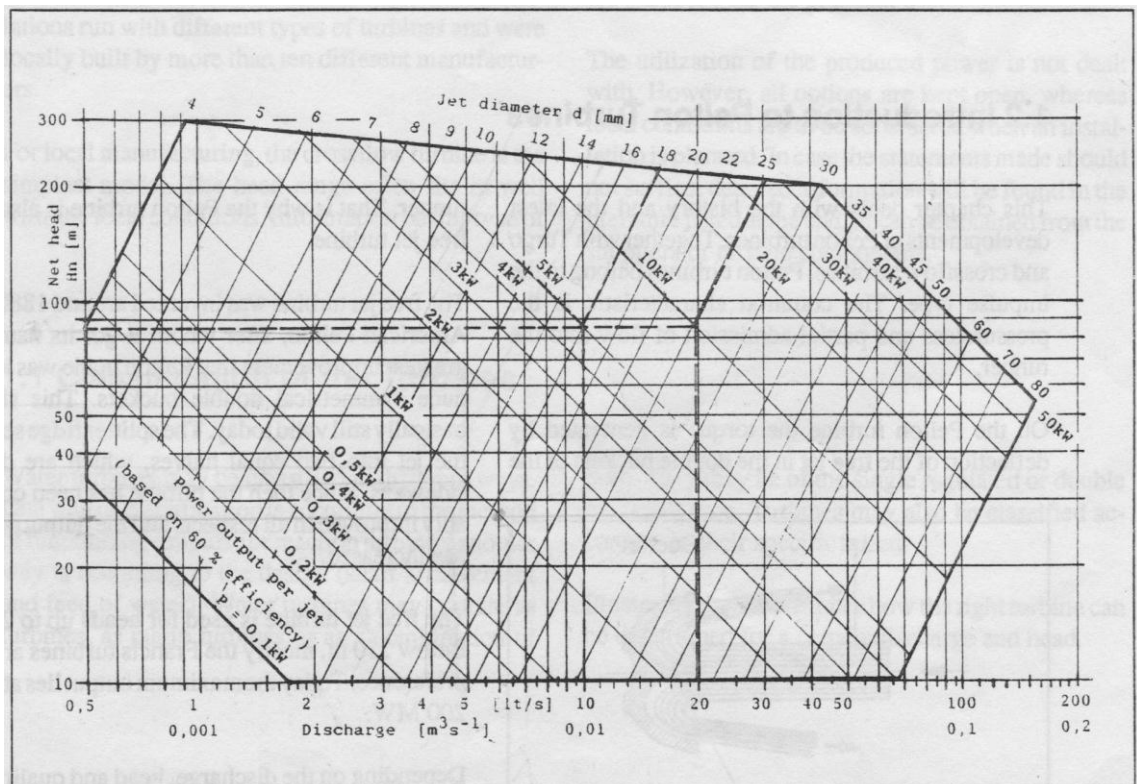


Figura 19. Rangos de Aplicación de una Micro Turbina Pelton

Fuente [1]

Teniendo en cuenta los parámetros de caudal y potencia; con la figura 19 se obtuvo:

Diámetro del inyector = 16mm

Cabeza estática = 35m

2.1 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA TURBINA

2.1.1 Álabes Pelton. El diseño del álabes se basó en el libro Micro Turbines Pelton [1]. Con base en esto se realizaron los siguientes cálculos.

Los resultados se aprecian en la figura 20; unidades en milímetros (mm).

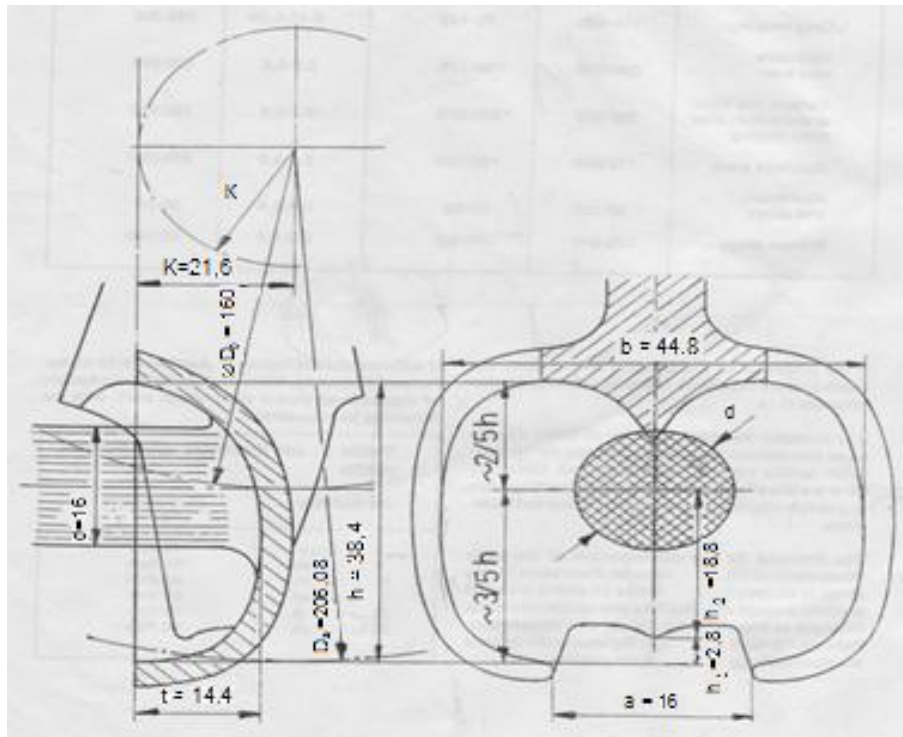


Figura 20. Plano del Álabes Pelton con los Datos de Diseño

Fuente [1]

2.1.1.1 Ancho del Álabo (b)

$$b = 2,85*d$$

$$b = 2,85*16\text{mm}$$

$$b = 44,8\text{mm [1]}$$

Donde:

d: Diámetro del inyector [1]

2.1.1.2 Profundidad del Álabo (t)

$$t = 0,9*d$$

$$t = 0,9*16\text{mm}$$

$$t = 14,4\text{mm [1]}$$

Donde:

d: Diámetro del inyector [1]

2.1.1.3 Largo del Álabo (h)

$$h = 2,4*d$$

$$h = 2,4*16\text{mm}$$

$$h = 38,4\text{mm [1]}$$

Donde:

d: Diámetro del inyector [1]

2.1.1.4 Medidas en el Plano del Álabo ($h_1 - h_2$)

$$h_1 = 0,175*d$$

$$h_1 = 0,175*16\text{mm}$$

$$h_1 = 2,8\text{mm [1]}$$

$$h_2 = 2,4 \cdot d$$

$$h_2 = 1,175 \cdot 16 \text{mm}$$

$$h_2 = 18,8 \text{mm} [1]$$

Donde:

d: Diámetro del inyector [1]

2.1.1.5 Ancho del Destalonamiento (a)

$$a = 1,2 \cdot d$$

$$a = 1,2 \cdot 13,32861 \text{mm}$$

$$a = 15,994332 \text{mm} [1]$$

Donde:

d: Diámetro del inyector [1]

2.1.1.6 Punto de Cruce de las Trayectorias de los Puntos Exteriores de dos Alabes Contiguas (K)

$$K = 0,135 \cdot D_p$$

$$K = 0,135 \cdot 160 \text{mm}$$

$$K = 21,6 \text{mm} [1]$$

Donde:

D_p: Diámetro pelton [1]

2.1.1.7 Espesor del Álabe (X)

$$X = K - t$$

$$X = 21,6 \text{mm} - 14,4 \text{mm}$$

$$X = 7,2 \text{mm} [1]$$

Donde:

t: Profundidad del álabe

K: Punto de Cruce de las Trayectorias de los Puntos Exteriores de dos Alabes Contiguas [1]

Con los cálculos anteriores se procedió a realizar el diseño de la pieza isométrica en Solid Works del álabe, donde se elaboró un plano detallado del mismo. (Anexo A, pieza 1) Con base en el plano se procedió a cotizar en diferentes empresas la elaboración del modelo del álabe que sirviera para fundir las demás cucharas o álabes.

El modelo de la cuchara se realizó en una impresora CNC 3D Dimensión Uprint de Stratasys. Perteneciente a la empresa ELECOM Ltda., ubicada en la avenida quebrada seca N° 33 – 130 (oficina 101) en la ciudad de Bucaramanga. Este modelo fue elaborado en ABS plus, debido a que es un material que favorece el proceso de fundición y además brinda una buena precisión en las medidas del álabe, este es de dimensiones pequeñas lo que requiere una elaboración detallada, que se logra con el ABS plus.

Con el modelo del álabe elaborado; se procedió a fundirlo en el taller fundiciones LARIN, ubicado en la Calle 16 N°13 – 18 en la ciudad de Bucaramanga, la fundición se llevó a cabo en arena. El material que se utilizó fue el aluminio, debido a que soporta la oxidación, es económico y tiene una gran resistencia a la corrosión, pues crea una capa de alúmina de forma natural que protege o recubre el metal impidiendo la propagación del óxido hacia el metal. Estas características se tuvieron en cuenta al momento de seleccionar el material adecuado para la fabricación de los álabes; puesto que estos estarán expuestos durante su movimiento a interactuar con agua.

Una vez fundidos los álabes se procedió a hacerle los agujeros con una fresadora convencional perteneciente al taller EL EMBRAGUE, ubicado en la carrera 13 N° 20 – 15 en la ciudad de Bucaramanga.

Finalmente, se llevó a cabo un proceso de brillado en la parte externa, para un mejor acabado de los álabes; este proceso se hizo en la empresa REMETALES, ubicada en la calle 16 N° 14 – 35 en la ciudad de Bucaramanga seccional Bucaramanga. La parte interna se pulió en el taller de la Universidad Pontificia Bolivariana, esto para mejorar la apariencia y obtener una mejor presentación en los álabes, los cuales quedaron listos para ser ensamblados en el rodete.

2.1.2 Rodete Pelton. El diseño del rodete se basó en el libro Micro turbinas Pelton [1]. Con él se realizaron los siguientes cálculos.

Los resultados se aprecian en la figura 21; unidades en metros (m).

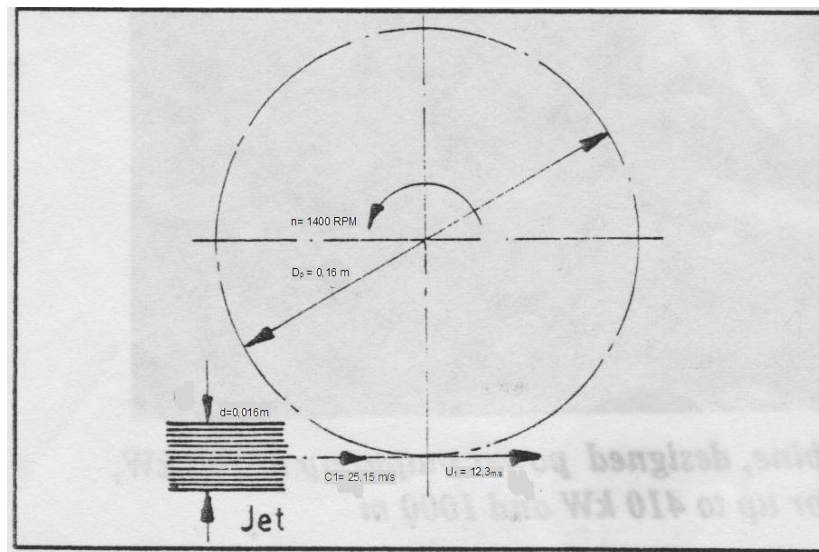


Figura 21. Fundamentos de la Turbina

Fuente [1]

2.1.2.1 Velocidad Tangencial o Periférica de un Punto de la Rueda (U_1)

$$U_1 = K_u \sqrt{2g * H_n}$$

$$U_1 = 0,47 \sqrt{2 * 9,81 \frac{m}{s^2} * 35m}$$

$$U_1 = 12,3_{m/s} [1]$$

Donde:

H_n : Cabeza estática

K_u : Coeficiente de velocidad

g : Aceleración de gravedad

El coeficiente K_u varía entre 0,45 y 0,49%. [1]

2.1.2.2 Diámetro Pelton (D_p)

$$D_p = \frac{60 * u_1}{\pi * n}$$

$$D_p = \frac{60 * 12,3 \frac{m}{s}}{3,1416 * 1400rpm}$$

$$D_p = 160mm [1]$$

Donde:

U_1 : Velocidad Tangencial

n : Velocidad de giro

π : (PI) = 3,1416 [1]

2.1.2.3 Diámetro por Fuera del Rodete (Da)

$$D_a = D_p + 1,2 \cdot h$$

$$D_a = 160 + 1,2 \cdot 38,4$$

$$D_a = 206,08 \text{ mm [1]}$$

Donde:

D_p : Diámetro pelton

h : Largo del álabe [1]

2.2.2.4 Número de Álabes (z)

$$z = \frac{D_p \cdot \pi}{2d}$$

$$z = \frac{160 \text{ mm} \cdot 3,1416}{2 \cdot 16 \text{ mm}}$$

$$Z = 16 [1]$$

Donde:

d : Diámetro del inyector

D_p : Diámetro pelton

π : (PI) = 3,1416 [1]

Teniendo en cuenta estos cálculos se procedió a realizar el diseño del rodete, donde algunas otras medidas fueron seleccionadas según el criterio de diseño, de tal forma que estas cumplan con los requisitos necesarios para el funcionamiento de la turbina, esto con el fin de elaborar la pieza isométrica en Solid Works y generar un plano detallado. (Anexo A, pieza 2)

Con base en el plano se procedió a cotizar en diferentes empresas la elaboración del modelo del rodete.

El rodete se fabricó en el taller TORNO PARTES, ubicado en la calle 20 N° 13 –30 en la ciudad de Bucaramanga. Donde realizaron el mecanizado en un torno y los agujeros en una fresadora convencional.

El rodete se elaboró en aluminio, debido a que debe soportar e fenómeno de oxidación y corrosión por que esta en permanente contacto al agua.

2.1.3 Inyector. El diseño del inyector se basó en el libro Diseño y Construcción de una Turbina Pelton para generación eléctrica [11] y el libro Micro turbinas Pelton [1]. Con él se realizaron los siguientes cálculos.

Los resultados se aprecian en la figura 22; unidades en milímetros (mm).

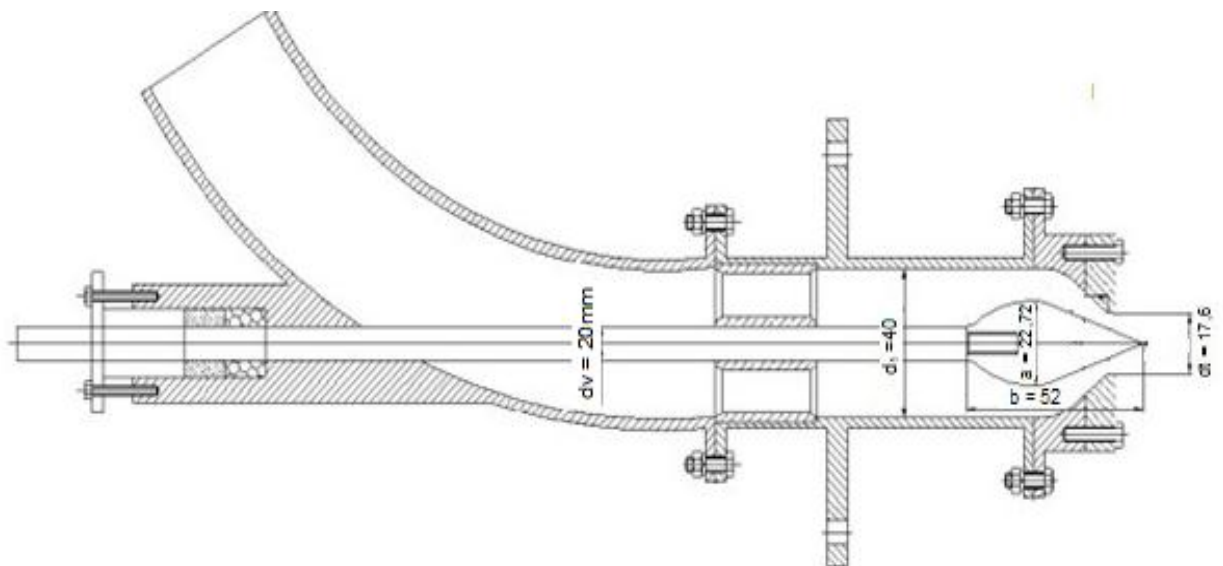


Figura 22. Plano del Inyector con los Datos del Diseño

Fuente [1]

2.1.3.1 Diámetro del Bulbo de la Aguja (a)

$$a = 1,42 \cdot d$$

$$a = 1,42 \cdot 16\text{mm}$$

$$a = 22,72\text{mm} [11]$$

Donde:

d: Diámetro del inyector [1]

2.1.3.2 Diámetro de Salida del Inyector (dt)

$$dt = 1,1 \cdot d$$

$$dt = 1,1 \cdot 16\text{mm}$$

$$dt = 17,6\text{mm} [11]$$

Donde:

d: Diámetro del inyector [1]

2.1.3.3 Diámetro de la Aguja (dv)

$$dv = 1,25 \cdot d$$

$$dv = 0,58 \cdot 16\text{mm}$$

$$dv = 20\text{mm} [11]$$

Donde:

d: Diámetro del inyector [1]

2.1.3.4 Longitud del Bulbo (b)

$$b = 3,25 \cdot d$$

$$b = 3,25 \cdot 16\text{mm}$$

$$b = 52\text{mm} [11]$$

Donde:

d: Diámetro del inyector [1]

2.1.3.5 Diámetro Interno del Inyector (d_1)

$$d_1 = 2,5 * d$$

$$d_1 = 2,5 * 16 \text{mm}$$

$$d_1 = 40 \text{mm} [11]$$

Donde:

d: Diámetro del inyector [1]

Teniendo en cuenta estos cálculos se procedió a realizar el diseño del inyector, donde algunas otras medidas fueron seleccionadas según el criterio de diseño, de tal forma que estas cumplan con los requisitos necesarios para el funcionamiento de la turbina, esto con el fin de elaborar la pieza isométrica en Solid Works y generar un plano detallado. (Anexo A, piezas 4,5 y 6)

Con base en el plano se procedió a la elaboración del modelo del inyector en el taller de laboratorio de mecanizado de la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga, donde se construyó el regulador de caudal tipo aguja y el cuerpo del inyector.

El inyector fue elaborado en aluminio; se seleccionó este material por las mismas características que se tuvieron en cuenta para los álabes y el rodete; como lo es la exposición de este al agua.

Para el regulador de caudal tipo aguja se seleccionó el bronce; pues al igual que el aluminio, es muy resistente a la corrosión y es ideal para trabajar con agua; además es adecuado para utilizarlo en piezas que están sometidas a rozamiento o fricción.

2.1.4 Carcasa. Se realizó de acuerdo a la forma de la turbina. Primero se procedió a elaborar un plano detallado de esta (Anexo A, pieza 7), para luego ser fabricada en la empresa ALUMITEX, ubicada en la carrera 17E N° 59 – 32 en la

ciudad de Bucaramanga. Esta fue elaborada en acrílico de 3mm. Este material se escogió, debido a que es de interés de los estudiantes poder visualizar el funcionamiento de la turbina.

2.1.5 Poleas y Banda. El diseño del sistema de transmisión por medio de poleas y bandas se basó en el libro Diseño de Elementos de Máquinas [25]. Con él se realizaron los siguientes cálculos.

2.1.5.1 Diámetro de la Polea del Eje (D1). Para calcular este diámetro se utilizó la fórmula de relación de velocidades, donde (i) es igual a la relación entre velocidades que será de cuatro (4), por lo tanto para calcular D1, se tiene la siguiente ecuación.

$$i = \frac{D1}{D2}$$

$$D1 = D2 \cdot i$$

$$D1 = 4 \cdot 3 \text{ pul}$$

$$D1 = 12 \text{ pul}$$

2.1.5.2 Criterios de Selección de la Banda

Datos iniciales:

Velocidad Angular: 1400 rpm

Potencia: 1 kw = 1,34 HP

Distancia entre centros (C): 30,48 cm. (asumida)

Diámetro primitivo polea eje (D1): 12 pul

Diámetro primitivo polea alternador (D2): 3 pul (Propia del alternador)

Con la velocidad angular en rpm y potencia en HP de la turbina, se utiliza la siguiente figura para la selección del tipo de correa.

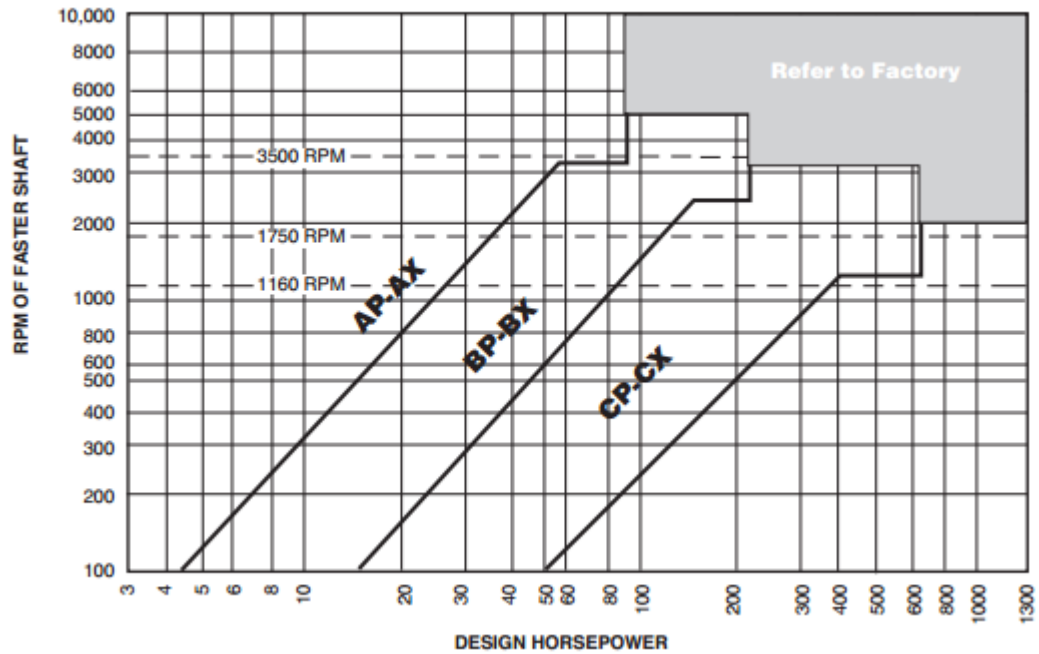


Figura 23. Diseño de la Correa
Fuente [26]

En la figura 23 se observan los rangos pertenecientes a cada tipo de correa, para nuestro caso el fabricante recomienda la correa AX (correa dentada) para potencia alta y la correa AP (correa plana) para potencia baja (ver figura 24)[26].

De acuerdo a esto se seleccionó una correa para potencia baja tipo A en V plana 4L [25].

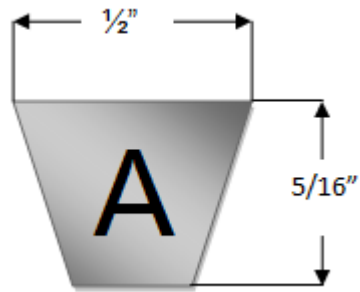


Figura 24. Tipo de Correa (Perfil)

Fuente [25]

2.1.5.3 Longitud de la Banda (L). Con la siguiente fórmula se calculo la longitud de la banda:

$$L = 2C + \frac{\pi}{2}(D2 + D1) + \frac{(D2 - D1)^2}{4C}$$

$$L = (2 * 12") + \frac{\pi}{2}(3" + 12") + \frac{(3" - 12")^2}{(4 * 12")}$$

$$L = 50 \text{ pul} = 127 \text{ cm} [25]$$

2.1.5.4 Distancia Entre Centros Corregida (C). Para recalculer la distancia entre centros se utilizó la siguiente ecuación:

$$B = 4L - 6,28(D2 + D1)$$

$$B = (4 * 50") - 6,28(3" + 12")$$

$$B = 105,8 \text{ pul}$$

$$C = \frac{B + \sqrt{(B)^2 - 32(D2 - D1)^2}}{16}$$

$$C = \frac{105,8 + \sqrt{(105,8)^2 - 32(3-12)^2}}{16}$$

$$C = 12,41 \text{ pul} = 31,52 \text{ cm} \text{ [25]}$$

2.1.5.5 Ángulo de Contacto de la Banda con la Polea Menor (θ_1). Se calcula con la siguiente ecuación:

$$\theta_1 = 180^\circ - 2 \text{sen}^{-1} \left[\frac{D_2 - D_1}{2C} \right]$$

$$\theta_1 = 180^\circ - 2 \text{sen}^{-1} \left[\frac{3" - 12"}{(2 * 12,41")}\right]$$

$$\theta_1 = 137,49^\circ \text{ [25]}$$

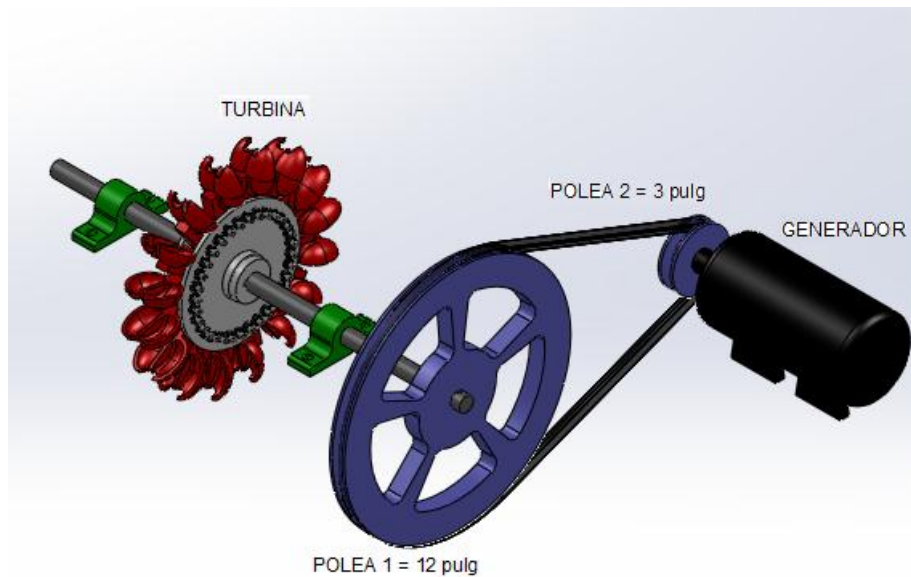


Figura 25. Sistema de transmisión
Fuente Autor

2.1.6 Eje. El diseño del eje se basó en el libro Diseño de Elementos de Máquinas [25]. Con él se realizaron los siguientes cálculos.

2.1.6.1 Caudal (Q). Se determina con la siguiente formula:

$$Q = \frac{P_{OTENCIA}}{P_{RESIÓN}}$$

$$Q = \frac{1000W}{41368,54Pa}$$

$$Q = 0,024173m^3/s [1]$$

2.1.6.2 Altura Neta (H_n). Se calcula con la siguiente ecuación:

$$H_n = \frac{P_{OTENCIA}}{\gamma * Q}$$

$$H_n = \frac{1000W}{9800N/m^3 * 0,02417m^3/s}$$

$$H_n = 4,22m [1]$$

2.1.6.3 Potencia Hidráulica (P_{hidráulica}). Se calcula con la siguiente ecuación:

$$P_{hidráulica} = Q * \rho * g * H_n$$

$$P_{hidráulica} = 0,024173m^3/s * 1000Kg/m^3 * 9,81m/s^2 * 4,22m$$

$$P_{hidráulica} = 1000,72w [1]$$

2.1.6.4 Potencia en el Eje (Potencia eje). Se calcula con la siguiente ecuación:

$$n_{\text{turbina}} = \frac{\text{Potencia}_{\text{eje}}}{\text{Potencia}_{\text{hidraulica}}} * 100$$

$$\text{Potencia}_{\text{eje}} = \frac{n_t * P}{100}$$

$$\text{Potencia}_{\text{eje}} = \frac{80 * 1000,72W}{100}$$

$$\text{Potencia}_{\text{eje}} = 800,57 \text{ w [1]}$$

2.1.6.5 Velocidad Angular del Rodete (W). Se calcula con la siguiente ecuación:

$$W = 2\pi * N$$

$$W = 2(3,1416) * 1400\text{rpm}$$

$$W = 8796,46\text{rpm}$$

$$W = 146,60\text{Hz [1]}$$

2.1.6.6 Torque en el Rodete (T_r). Se calcula con la siguiente ecuación:

$$T_r = \frac{P_{\text{eje}}}{W}$$

$$T_r = \frac{800,576W}{146,60}$$

$$T_r = 5,46 \text{ Nm [1]}$$

Luego se procede a realizar el diagrama de cargas (ver figura 26).

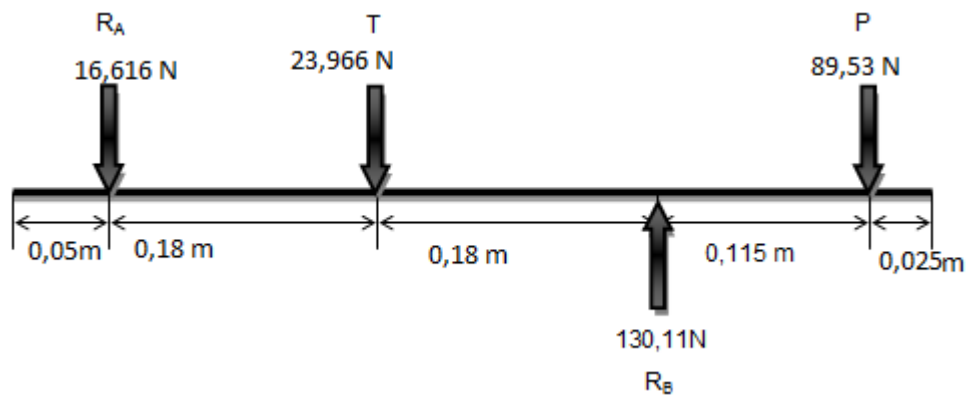


Figura 26. Diagrama de Cargas

Fuente Autor

Para calcular el momento máximo (M_x) se utilizaron las siguientes ecuaciones:

$$P = M_x \cdot W$$

$$M_x = \frac{P}{W}$$

$$M_x = \frac{1000w}{1400\text{rpm} \cdot \frac{2(3,1416)}{60}}$$

$$M_x = 6,82 \text{ Nm}$$

$$M_x = 69,55 \text{ Kg/cm}$$

$$M_x = (F \cdot r_a) - (F' \cdot r_a)$$

$$M_x = (2F' - F)r_a$$

$$F' = \frac{M_x}{r_a}$$

$$F' = \frac{69,55 \text{Kg/cm}}{15,24 \text{cm}}$$

$$F = 2F'$$

$$F = 2 * 4,56$$

$$F = 9,13 \text{ Kg}$$

$$F = 9,13 * 9,81$$

$$F = 89,56 \text{ N [25]}$$

Realizando la sumatoria de fuerzas y momentos obtenemos (R_A) y (R_B)

$$\Sigma F_y = 0$$

$$R_A - T + R_B - P = 0$$

$$R_A - 23,966 + R_B - 89,53 = 0$$

$$R_A + R_B = 113,496 \text{N}$$

$$\Sigma M_A = 0$$

$$(T * x) - (R_B * x) + (P * x) = 0$$

$$(23,966 * 0,18) - (R_B * 0,36) + (89,53 * 0,475) = 0$$

$$(4,31388) + (42,52675) = 0,36R_B$$

$$R_B = \frac{46,84063}{0,36}$$

$$R_B = 130,11 \text{N}$$

$$R_A = 113,496 \text{N} - R_B$$

$$R_A = -16,616N$$

Con estas reacciones se realizaron los diagramas de cortantes y momentos (ver figura 27).

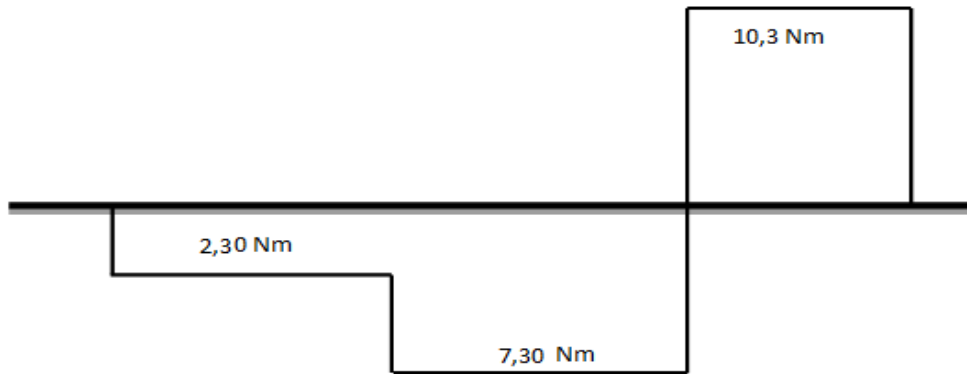


Figura 27. Diagrama de Cortante
Fuente Autor

En esta figura se puede observar que el momento máximo es de $10,294 \text{ Nm}$ y se da en la fuerza de 180 N en donde está ubicada una chumacera (ver figura 28).

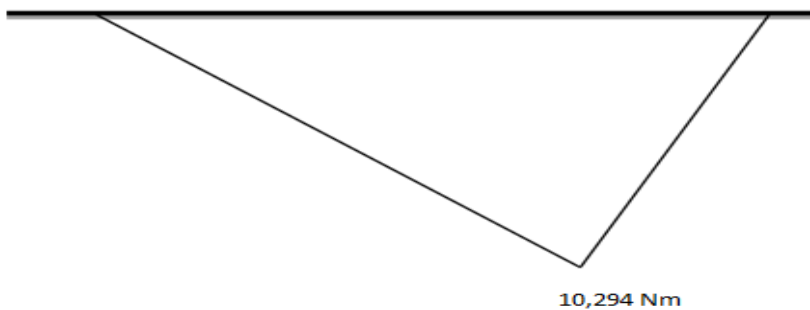


Figura 28. Diagrama de Momento
Fuente Autor

2.1.6.7 Esfuerzos Reales Independientes

Variables	D(m)	d(m)	r(m)	M(Nm)	T(Nm)	D/d	r/d	Kc (mom)	Kc (tor)
	0,022	0,019	0,001	10,294	15,801	1,158	0,053	1,64	1,27

Estos datos son utilizados para calcular los siguientes esfuerzos:

$$\sigma_{\text{prom(mom)}} = \frac{M \cdot c}{I} = \frac{32 \cdot M}{\pi \cdot d^3}$$

$$\sigma_{\text{prom(mom)}} = \frac{32 \cdot 10,294}{3,1416 \cdot 0,019^3}$$

$$\sigma_{\text{prom(mom)}} = 15287055,19$$

$$\tau_{\text{prom(tor)}} = \frac{T \cdot c}{J} = \frac{16 \cdot T}{\pi \cdot d^3}$$

$$\tau_{\text{prom(tor)}} = \frac{16 \cdot 15,801}{3,1416 \cdot 0,019^3}$$

$$\tau_{\text{prom(tor)}} = 11732599,53$$

$$\sigma_{\text{real(mom)}} = K_{c(\text{mom})} \cdot \sigma_{\text{prom(mom)}}$$

$$\sigma_{\text{real(mom)}} = 1,64 \cdot 15287055,19$$

$$\sigma_{\text{real(mom)}} = 25070770,51$$

$$\sigma_x = \sigma_{\text{real(mom)}}$$

$$\tau_{\text{real(tor)}} = K_{c(\text{tor})} * \tau_{\text{prom(tor)}}$$

$$\tau_{\text{real(tor)}} = 1,27 * 11732599,53$$

$$\tau_{\text{real(tor)}} = 14900401,4$$

$$\tau_{xy} = \tau_{\text{real(tor)}} [25]$$

2.1.6.8 Esfuerzos Principales

$$\tau_{\text{max}} = \sqrt{\left[\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \right)^2 + \tau_{xy}^2 \right]}$$

$$\tau_{\text{max}} = \sqrt{\left[\left(\frac{25070770,51 - 0}{2} \right)^2 + (14900401,4)^2 \right]}$$

$$\tau_{\text{max}} = 19471975,9$$

$$\sigma_{\text{mx}} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \tau_{\text{max}}$$

$$\sigma_{\text{mx}} = \frac{25070770,51 + 0}{2} + 19471975,9$$

$$\sigma_{\text{mx}} = 32007361,16$$

$$\sigma_{\text{min}} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \tau_{\text{max}}$$

$$\sigma_{\text{min}} = \frac{25070770,51 + 0}{2} - 19471975,9$$

$$\sigma_{\text{min}} = -6936590,642 [25]$$

2.1.6.9 Diámetro Mínimo

Para calcular el diámetro mínimo según Mott se utiliza la siguiente formula [25].

$$d_{\min} = \left[\frac{32 * n}{\pi} \sqrt{\left(\frac{K_t * M_{\max}}{S'_n} \right)^2 + \frac{3}{4} \left(\frac{T_{\max}}{S_y} \right)^2} \right]^{\frac{1}{3}}$$

Donde:

n = Factor de Seguridad = 2

$K_t = 1,5$ para $d_1 = 2$ para d_2

S_y = Resistencia a la fluencia = 42000Psi

$S'_n = S_n * C_s * C_r$

$S'_n = 28000\text{Psi} * 0,900 * 0,81$

$S'_n = 20412\text{Psi}$

$$d_{1\min} = \left[\frac{32 * 2}{3,1416} \sqrt{\left(\frac{1,5 * 91,097}{20412} \right)^2 + \frac{3}{4} \left(\frac{139,831}{42000} \right)^2} \right]^{\frac{1}{3}}$$

$d_{1\min} = 0,53\text{pul}$

$$d_{2\min} = \left[\frac{32 * 2}{\pi} \sqrt{\left(\frac{2,0 * 91,097}{20412} \right)^2 + \frac{3}{4} \left(\frac{139,831}{42000} \right)^2} \right]^{\frac{1}{3}}$$

$d_{2\min} = 0,57\text{pul}$

Luego de realizar los cálculos se procedió a elaborar la pieza isométrica en Solid Works y generar un plano detallado del eje (Anexo A, pieza 8), para luego ser fabricado en el taller de laboratorio de mecanizado de la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga. El eje fue elaborado en acero 1045, ya que este soporta las cargas a la que esta sometido; los cálculos se realizaron con este material.

2.1.7 Determinación del Número de Pruebas (n). Con los cálculos estadísticos se determina el número de pruebas para cada medición, las cuales son promediadas para obtener un porcentaje de error.

El número de pruebas se determina mediante la siguiente ecuación [27]:

$$n = \frac{s^2 * z^2}{e^2}$$

Donde:

z: Nivel de confiabilidad 95%=1,96

s : desviación estándar

e: Margen de error

2.1.7.1 Caudal Promedio (\bar{Q})

$$\bar{Q} = \frac{Q_1 + Q_2 + Q_3}{n_0}$$

Donde:

Q_1 , Q_2 y Q_3 : son los valores de caudal

n_0 : número de datos

Luego

$$\bar{Q} = \frac{2 \times 10^{-3} + 2 \times 10^{-3} + 2,16 \times 10^{-3}}{3}$$

$$\bar{Q} = 2,1 \times 10^{-3} [27]$$

2.1.7.2 Desviación

$$s = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n}}$$

Donde:

x : datos de caudal

\bar{x} : Promedio de caudal

n : numero de pruebas

Luego

$$s = \sqrt{\frac{(2 \times 10^{-3} - 0,0021)^2 + (2 \times 10^{-3} - 0,0021)^2 + (2,16 \times 10^{-3} - 0,0021)^2}{3}}$$

$$S = 0,000088 \text{ m}^3/\text{s} [27]$$

2.1.7.3 Margen de Error

e %	Porcentaje \bar{Q}	Número de Pruebas
2	$4,2 \times 10^{-5}$	$16,86 \cong 17$
3	$6,3 \times 10^{-5}$	$7,50 \cong 8$
4	$8,4 \times 10^{-5}$	$4,55 \cong 5$
5	$1,05 \times 10^{-4}$	$2,70 \cong 3$
6	$1,26 \times 10^{-4}$	$1,87 \cong 2$
7	$1,47 \times 10^{-4}$	$1,5 \cong 2$
8	$1,68 \times 10^{-4}$	$0,97 \cong 1$
9	$1,89 \times 10^{-4}$	$0,83 \cong 1$
10	$2,1 \times 10^{-4}$	$0,67 \cong 1$

Tabla 1. Número de Pruebas

Para obtener el número de pruebas se halla la desviación y el margen de error.

$$n = \frac{s^2 * z^2}{e^2}$$

$$n = \frac{(0,000088)^2 * (1,96)^2}{(1,05 \times 10^{-4})^2}$$

$$n = 2,70 \cong 3 [27]$$

Una vez calculado el número de pruebas, se procede a realizar las mediciones de caudal, rpm, torque, voltaje y corriente obteniendo los siguientes resultados.

2.1.7.4 Determinación del Margen de Error (e). Mediante las siguientes ecuaciones se determina [27]:

$$e = t \frac{s}{\sqrt{n-1}}$$

Donde:

n : número de pruebas = 3

t : numero de confianza= 3,58

s : desviación estándar

Luego

$$s = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n}}$$

$$s = \sqrt{\frac{(3,33 \times 10^{-4} - 0,00044)^2 + (5 \times 10^{-4} - 0,00044)^2 + (5 \times 10^{-4} - 0,00044)^2}{3}}$$

$$S = 0,00008 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$e = 3,58 \frac{0,00008}{\sqrt{3-1}}$$

$$e = 0,00020 \text{ m}^3/\text{s} [27]$$

Datos de caudal sin carga en la posición dos (2) de la válvula para 0 bombillos.

◆ **Potencia Hidráulica**

$$P_{\text{hidráulica}} = Q * \gamma * H_n$$

Datos del caudal para calcular la potencia hidráulica con cero (0) bombillos.

Posición	Q1 (m ³ /s)	Q2 (m ³ /s)	Q3 (m ³ /s)	Promedio (m ³ /s)	Desviación	Margen de Error
1	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
2	0,00033	0,00050	0,00050	0,00044	0,00008	0,00020
3	0,00083	0,00083	0,00083	0,00083	0,00001	0,00001
4	0,00116	0,00100	0,00133	0,00116	0,00013	0,00034
5	0,00150	0,00166	0,00166	0,00161	0,00008	0,00019
6	0,00166	0,00166	0,00200	0,00177	0,00016	0,00041
7	0,00200	0,00200	0,00216	0,00205	0,00008	0,00019
8	0,00200	0,00233	0,00233	0,00222	0,00016	0,00039
9	0,00233	0,00233	0,00233	0,00233	0,00001	0,00001
10	0,00266	0,00283	0,00283	0,00277	0,00008	0,00020

Tabla 2. Caudal para la Potencia Hidráulica

Luego la propagación del error se determina con la siguiente ecuación [27]:

$$e_{\text{pot}} = \sqrt{(K * e_Q)^2 + (E * e_{H_n})^2}$$

Donde:

$$K = \frac{\partial \text{pot}}{\partial Q} = \gamma * H_n$$

$$E = \frac{\partial \text{pot}}{\partial H_n} = 0$$

$$e_{\text{pot}} = K * e_Q = \gamma * H_n * e_Q$$

$$e_{\text{pot}} = 9800 * 4 * 0,00020$$

$$e_{\text{pot}} = 7,81[29]$$

Posición de la Válvula	$\bar{Q} \text{ (m}^3\text{/s)}$	Pot–Hidraulic (W)
	$\bar{x} \pm e_Q$	Pot = $\bar{\text{pot}} \pm e_p$
1	0,00000 ± 0,00000	0,00 ± 0,00
2	0,00044 ± 0,00020	17,42 ± 7,81
3	0,00083 ± 0,00001	32,65 ± 0,01
4	0,00116 ± 0,00034	45,60 ± 13,37
5	0,00161 ± 0,00019	62,98 ± 7,48
6	0,00177 ± 0,00041	69,51 ± 15,90
7	0,00205 ± 0,00019	80,49 ± 7,48
8	0,00222 ± 0,00039	87,02 ± 15,44
9	0,00233 ± 0,00001	91,34 ± 0,01
10	0,00277 ± 0,00020	108,71 ± 7,95

Tabla 3. Propagación de error para la Potencia Hidráulica

◆ **Potencia de Flecha**

$$P_{\text{eje}} = T * W$$

Datos del torque para calcular la potencia de flecha con cero (0) bombillos.

Posición	T1 (Nm)	T2 (Nm)	T3 (Nm)	Promedio	Desviación	Margen de Error
1	0	0	0	0,00	0,00000	0,00000
2	0,82	0,83	0,83	0,83	0,00471	0,01193
3	1,61	1,41	1,54	1,52	0,08287	0,20977
4	1,63	1,63	1,63	1,63	0,00001	0,00001
5	1,7	1,71	1,68	1,70	0,01247	0,03157
6	1,71	1,71	1,72	1,71	0,00471	0,01193
7	1,73	1,74	1,73	1,73	0,00471	0,01193
8	1,75	1,75	1,75	1,75	0,00001	0,00001
9	1,81	1,82	1,82	1,82	0,00471	0,01193
10	1,83	1,84	1,84	1,84	0,00471	0,01193

Tabla 4. Torque para la Potencia de Flecha

Datos de las RPM para calcular la potencia de flecha con cero (0) bombillos.

Posición	RPM 1	RPM 2	RPM 3	Promedio	Desviación	Margen de Error
1	0	0	0	0,00	0,00000	0,00000
2	65	64,4	68,2	65,87	1,66800	4,22244
3	190	189,6	190,4	190,00	0,32660	0,82677
4	220	219	219	219,33	0,47140	1,19333
5	302	301,5	302,6	302,03	0,44969	1,13837
6	342,1	340,2	340	340,77	0,94634	2,39560
7	430	430,6	430,5	430,37	0,26247	0,66442
8	450	449	451,3	450,10	0,94163	2,38368
9	460	462,1	460,3	460,80	0,92736	2,34756
10	504,6	505,1	504,5	504,73	0,26247	0,66442

Tabla 5. Velocidad de Giro para la Potencia de Flecha

Luego la propagación del error se determina con la siguiente ecuación [27]:

$$e_{\text{pot}} = \sqrt{(K * e_W)^2 + (E * e_T)^2}$$

Donde:

$$K = \frac{\partial \text{pot}}{\partial \text{rpm}} = \bar{T}$$

$$E = \frac{\partial \text{pot}}{\partial T} = \bar{W}$$

$$e_{\text{pot}} = \sqrt{(0,83 * 4,22)^2 + (65,87 * 0,01)^2}$$

$$e_{\text{pot}} = 3,56 [29]$$

Posición de la Válvula	\bar{W} (rpm)	\bar{T} (Nm)	$\bar{\text{Pot - Flecha}}$ (W)
	$\bar{x} \pm e_W$	$\bar{x} \pm e_T$	$\text{Pot} = \bar{\text{pot}} \pm e_p$
1	0,00 ± 0,00	0,00 ± 0,000	0,00 ± 0,00
2	65,87 ± 4,22	0,83 ± 0,012	5,70 ± 3,58
3	190,00 ± 0,83	1,52 ± 0,210	30,24 ± 39,88
4	219,33 ± 1,19	1,63 ± 0,001	37,44 ± 1,95
5	302,03 ± 1,14	1,70 ± 0,032	53,66 ± 9,73
6	340,77 ± 2,40	1,71 ± 0,012	61,14 ± 5,78
7	430,37 ± 0,66	1,73 ± 0,012	78,12 ± 5,26
8	450,10 ± 2,38	1,75 ± 0,001	82,49 ± 4,17
9	460,80 ± 2,35	1,82 ± 0,012	87,66 ± 6,96
10	504,73 ± 0,66	1,84 ± 0,012	97,08 ± 6,15

Tabla 6. Propagación del Error para la Potencia de Flecha

◆ **Potencia Eléctrica**

$$P_e = V * I$$

Datos de voltaje para calcular la potencia de eléctrica con cuatro (4) bombillos.

Posición	V1(v)	V2(v)	V3(v)	Promedio (v)	Desviación	Margen de Error
1	0	0	0	0,00	0,00000	0,00000
2	35	27	27	29,67	3,77124	9,54667
3	40	41	34,8	38,60	2,71784	6,88006
4	46	43	47	45,33	1,69967	4,30262
5	46	46	45	45,67	0,47140	1,19333
6	56	55	55	55,33	0,47140	1,19333
7	58	57	58	57,67	0,47140	1,19333
8	60	58	58,8	58,93	0,82192	2,08065
9	61	61,3	61	61,10	0,14142	0,35800
10	62	70	60	64,00	4,32049	10,93708

Tabla 7. Voltaje para la Potencia Eléctrica con cuatro Bombillos

Datos de corriente para calcular la potencia de eléctrica con 4 bombillos.

Posición	I1 (Amp)	I2 (Amp)	I3 (Amp)	Promedio (Amp)	Desviación	Margen de Error
1	0	0	0	0,00	0,00000	0,00000
2	0	0,1	0	0,03	0,04714	0,11933
3	0,26	0,12	0,19	0,19	0,05715	0,14468
4	0,31	0,18	0,19	0,23	0,05907	0,14952
5	0,25	0,25	0,25	0,25	0,00001	0,00001
6	0,23	0,23	0,23	0,23	0,00001	0,00001
7	0,23	0,23	0,23	0,23	0,00001	0,00001
8	0,23	0,23	0,23	0,23	0,00001	0,00001
9	0,23	0,23	0,23	0,23	0,00001	0,00001
10	0,22	0,22	0,22	0,22	0,00001	0,00001

Tabla 8. Corriente para la Potencia Eléctrica con cuatro Bombillos

Luego la propagación del error se determina con la siguiente ecuación [27]:

$$e_{\text{pot}} = \sqrt{(K * e_v)^2 + (E * e_i)^2}$$

Donde:

$$K = \frac{\partial \text{pot}}{\partial V} = i$$

$$E = \frac{\partial \text{pot}}{\partial I} = \bar{V}$$

$$e_{\text{pot}} = \sqrt{(0,03 * 9,55)^2 + (29,67 * 0,12)^2}$$

$$e_{\text{pot}} = 3,55$$

Posición de la Válvula	\bar{V} (v)	\bar{i} (Amp)	$\bar{\text{Pot}} - \text{eléctrica}$ (W)
	$\bar{x} \pm e_v$	$\bar{x} \pm e_i$	$\text{Pot} = \bar{\text{pot}} \pm e_p$
1	0,00±0,00	0,00±0,000	0,00±0,00
2	29,67±9,55	0,03±0,119	0,99±3,55
3	38,60±6,88	0,19±0,144	7,33±5,74
4	45,33±4,30	0,23±0,150	10,28±6,85
5	45,67±1,19	0,25±0,001	11,42±0,30
6	55,33±1,19	0,23±0,001	12,73±0,27
7	57,67±1,19	0,23±0,001	13,26±0,27
8	58,93±2,08	0,23±0,001	13,55±0,48
9	61,10±0,36	0,23±0,001	14,05±0,08
10	64,00±10,94	0,22±0,001	14,08±2,41

Tabla 9. Propagación de Error de la Potencia Eléctrica con cuatro Bombillos

2.2 ENSAMBLE DE LA TURBINA PELTON ANTES DE INSTALARLA EN EL BANCO DE PRUEBAS

Teniendo fabricados y comprados todos los elementos de la turbina de impulso, se procedió a realizar el ensamble en el taller de laboratorio de mecanizado de la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga; de la siguiente forma:

1. Se calibró cada uno de los álabes para la respectiva ubicación en el rodete, por que el peso debe ser el mismo para evitar que se provoque un desbalanceo. Seguidamente se ensamblaron los álabes al rodete, mediante dos tornillos Bristol con tuerca por cada álabe.
2. Se acopló el rodete con el eje mediante cuatro prisioneros y una cuña, se instalaron dos chumaceras ubicadas cada una en los extremos del eje, también se situó una polea la cual hace parte del sistema de transmisión diseñado para la entrega de potencia al generador.
3. Se verificó que todos los tornillos que hacen parte de la turbina tuvieran el ajuste necesario para su correcto funcionamiento; este se comprobó de forma manual.

2.3 IMPLEMENTACIÓN DE LA TURBINA AL BANCO DE PRUEBAS

Con la turbina ensamblada se llevó a cabo su montaje, al banco de turbinas del laboratorio de máquinas hidráulicas del a Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga, de la siguiente forma:

1. Se instaló la placa base en la cual se soporta: la carcasa, el inyector, la turbina, el eje y las chumaceras.

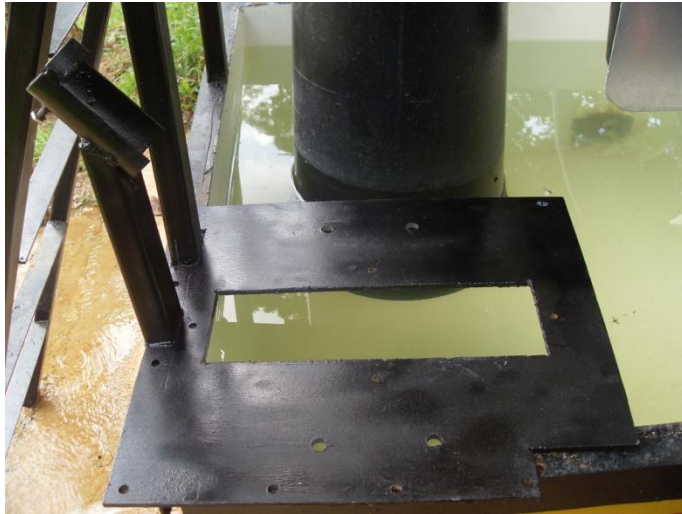


Figura 29. Placa Base

Fuente. Autor

2. Se ubicó el inyector en el soporte que tiene la placa base y se ajustó con un tonillo.
3. Se situó la carcasa en la placa base y se realizó el ajuste de ésta mediante cuatro tornillos con arandela y tuerca. También se selló completamente la carcasa a la placa base para evitar grandes fugas de agua mientras se está operando la turbina.
4. Una vez instalado el inyector y la carcasa en la placa base, se procedió a ubicar el conjunto del eje, turbina y chumaceras, colocando en estas cuatro tornillos, cada uno con su respectiva arandela y tuerca a los cuales se les hizo su debido ajuste.
5. Se verificó la tornillería de todo el sistema y se realizó el sello exterior de la carcasa, con silicona líquida para evitar que se produjeran fugas del fluido y de esta forma obtener mejores resultados en la operación de la turbina de impulso.

6. Se puso la placa base del generador, con la tornillería y se dio el ajuste necesario para ubicar el generador.
7. Al eje de la turbina se le aplico el sistema de transmisión de potencia (poleas y banda) que llega al generador.
8. Se puso a funcionar la turbina para verificar que no presentara ningún tipo de fugas y tenga buen funcionamiento.

2.4 REALIZACIÓN DE LAS PRUEBAS

Se plantearon formatos para las tablas, con base a las medidas y el número de pruebas que se iban a realizar.

- ◆ Para medir el caudal se utilizó el método aforo volumétrico que consiste en medir el tiempo que gasta el agua en llenar un recipiente de volumen conocido para lo cual el caudal se halla con la ecuación: $Q = \dot{v}/t$. El número de mediciones de tiempo de llenado para cada apertura de la llave fue de tres (3) veces; con esto se realizó el promedio para cada apertura obteniendo un valor por cada posición.
- ◆ Las medidas de RPM se obtuvo por medio del tacómetro de contacto y para la potencia eléctrica se utilizó un multímetro. Por cada apertura de la llave, se encendía los cuatro (4) bombillos y por cada bombillo encendido se toman los valores de voltaje, corriente y rpm; cada medición se realizó tres (3) veces, para calcular un promedio.

- ◆ La potencia a la salida del eje o potencia de flecha, se realizó con un instrumento fabricado en el laboratorio de procesos de la Universidad Pontificia Bolivariana.



Figura 30. Medición del Torque

Fuente Autor

El procedimiento consistió en colocar en el eje de salida de la turbina dicho instrumento de tal forma que impidiera o disminuyera el movimiento del eje; este a su vez está sostenido sobre una balanza en la cual se obtuvo una medida en kilogramos que al multiplicarla por la gravedad dio una fuerza; esta última se multiplicó por el radio del instrumento y de allí se obtuvo finalmente un torque que es el que se calcula la potencia, que es igual a la velocidad angular medida con el tacómetro de contacto multiplicado por el torque. Para cada apertura de la llave se tomaron los datos de peso y rpm cada medición se realizó tres (3) veces.

3. RESULTADOS

Con las pruebas de operación y medición de potencia, caudal y revoluciones por minuto se obtuvieron las graficas que están conformadas por las tablas y curvas del desempeño y que se enumeran a continuación.

3.1 PRUEBAS DE CAUDAL VS VELOCIDAD DE GIRO (SIN CARGA)

Al colocar el regulador de la turbina en diferentes posiciones se obtuvieron las medidas de velocidad de giro y el caudal respectivo. Como resultados obtenidos se elaboro la tabla diez que relaciona el caudal con la velocidad de giro.

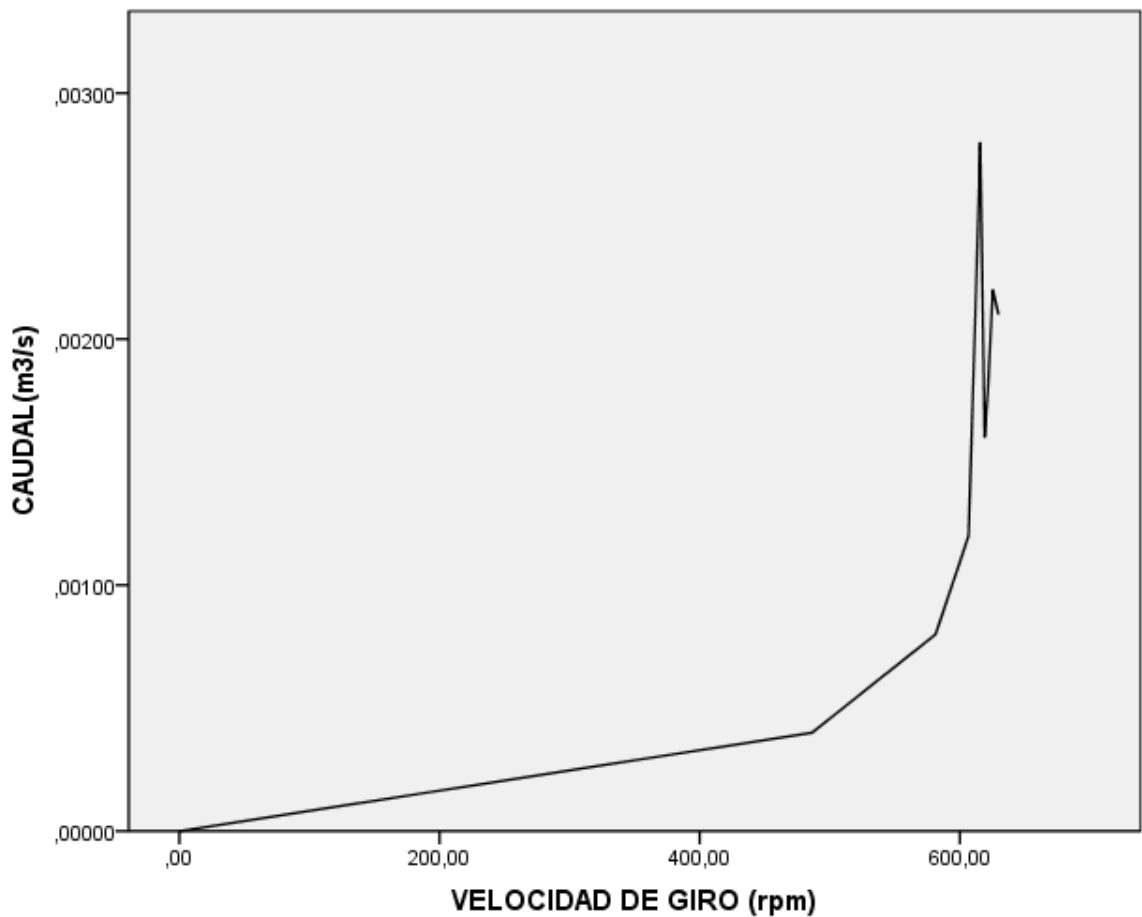
3.1.1 Tabla de Caudal vs Velocidad de Giro

Posición de la Válvula	Velocidad de Giro (rpm)	Caudal (m³/s)
1	0	0,0000
2	486,33	0,0004
3	581,33	0,0008
4	606,66	0,0012
5	619	0,0016
6	621,66	0,0018
7	629,66	0,0021
8	625,33	0,0022
9	613	0,0023
10	615,66	0,0028

Tabla 10. Caudal vs Velocidad de Giro

3.1.2 Grafica de Caudal vs Velocidad de Giro. A medida que se abre la válvula aumentan los valores tanto del caudal como de la velocidad de giro, esto ocurre desde la posición uno a la siete. En las posiciones ocho y nueve el caudal sigue aumentando, pero la velocidad de giro disminuye. En la posición diez de nuevo incrementa tanto el caudal como la velocidad de giro. Esta caída de caudal se puede presentar por un margen de error que se obtiene en la toma de datos.

- ◆ Con los datos de la tabla diez se obtiene la curva representativa de la relación entre el caudal y la velocidad de giro.



Grafica 1. Caudal vs Velocidad de Giro

3.2 PRUEBAS DE POTENCIA DE FLECHA VS VELOCIDAD DE GIRO

Con estas pruebas se obtuvieron las mediciones tanto del torque como la velocidad de giro en las diferentes posiciones del regulador.

3.2.1 Tabla de Potencia de Flecha vs Velocidad de Giro

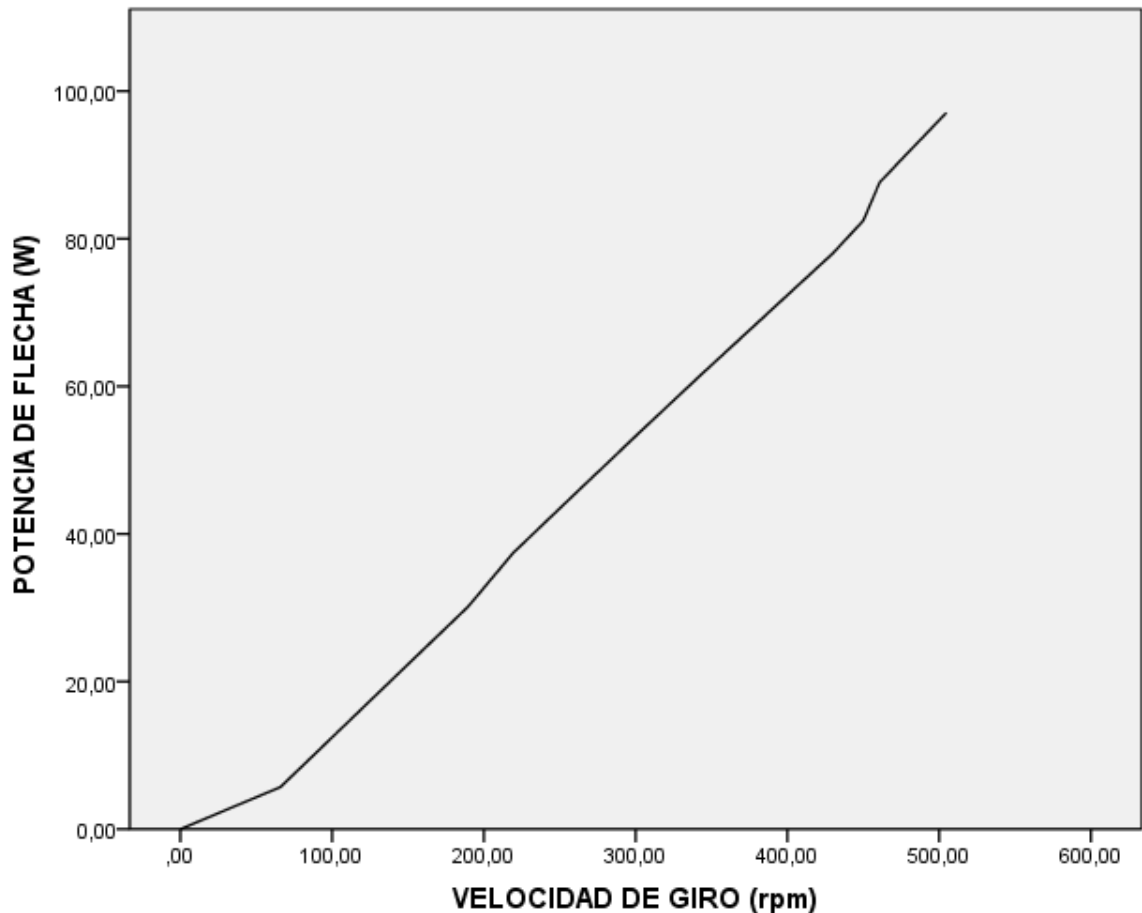
$$P_{\text{eje}} = T * W$$

Posición de la Válvula	Torque (Nm)	Velocidad de Giro (rpm)	Potencia de Flecha (W)
1	0,00	0	0,00
2	0,83	65,87	5,70
3	1,52	190	30,24
4	1,63	219,33	37,44
5	1,70	302,03	53,66
6	1,71	340,77	61,14
7	1,73	430,37	78,12
8	1,75	450,10	82,49
9	1,82	460,80	87,66
10	1,84	504,73	97,08

Tabla 11. Potencia de Flecha vs Velocidad de Giro

3.2.2 Grafica de Potencia de Flecha vs Velocidad de Giro. Se observo que tanto el torque como la velocidad de giro incrementan sus valores a medida que se daba apertura de la válvula.

- ◆ La potencia de flecha se obtuvo utilizando la ecuación $P_{\text{eje}} = T * W$ con los valores obtenidos en cada posición de la válvula, estos valores se encuentran en la tabla once.
- ◆ Al representar gráficamente los valores de potencia de flecha vs velocidad de giro se obtiene la curva que indica el comportamiento de la potencia a determinada velocidad y viceversa.
- ◆ Todos los valores obtenidos de la potencia de flecha son menores que los correspondientes a la potencia hidráulica, por lo tanto se considera dentro de los valores aceptados como normales para toda turbina Pelton.



Grafica 2. Potencia de Flecha vs Velocidad de Giro

3.3 PRUEBAS DE POTENCIA ELÉCTRICA VS VELOCIDAD DE GIRO

Con estas pruebas se obtuvieron las mediciones de voltaje, corriente y velocidad de giro en las diferentes posiciones del regulador. Para relacionar los valores entre potencia eléctrica y la velocidad de giro.

3.3.1 Tabla de Potencia Eléctrica vs Velocidad de Giro

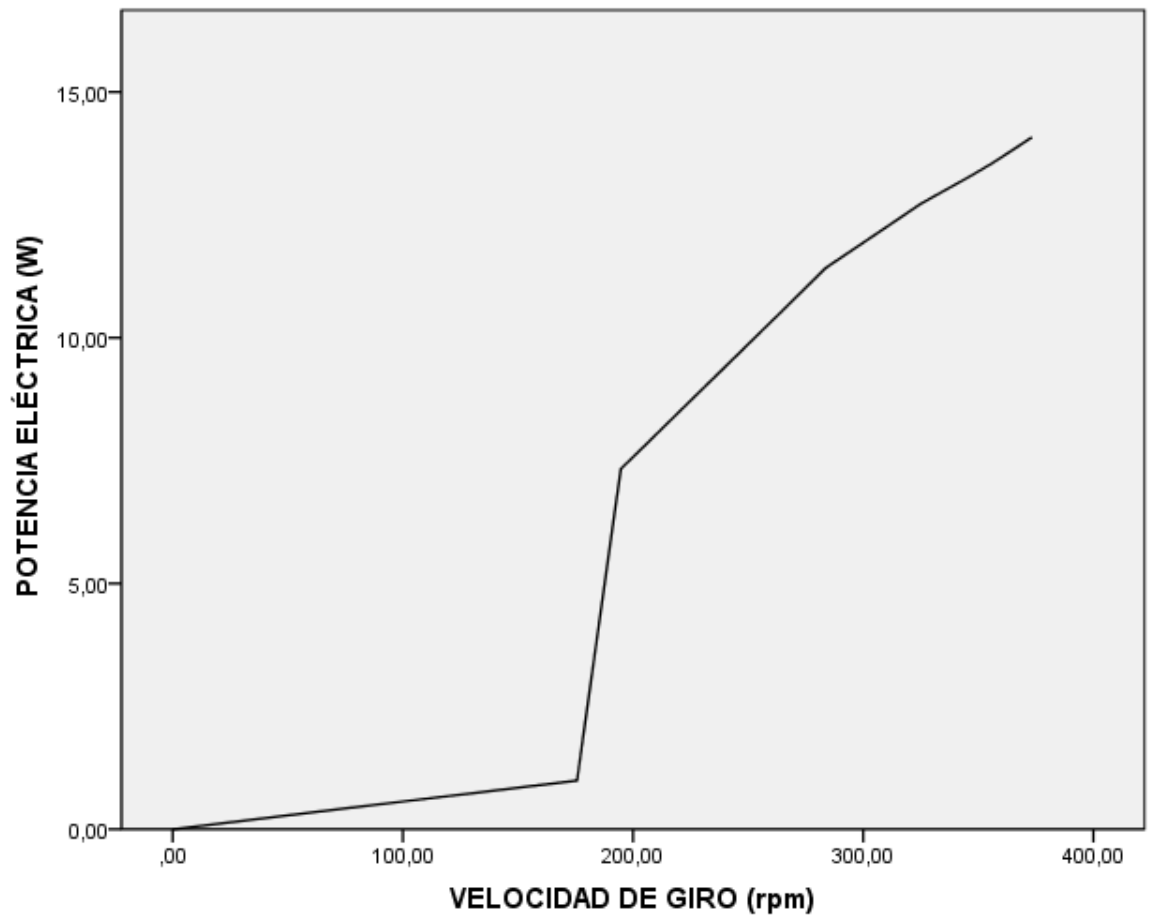
$$P_e = V * I$$

Posición de la Válvula	Velocidad de Giro (rpm)	Voltaje (V)	Corriente (I)	Potencia Eléctrica (W)
1	0	0,00	0,00	0
2	175,66	29,67	0,03	0,99
3	194,66	38,60	0,19	7,33
4	259	45,33	0,23	10,28
5	283,66	45,67	0,25	11,42
6	325,13	55,33	0,23	12,73
7	345,4	57,67	0,23	13,26
8	356	58,93	0,23	13,55
9	372,33	61,10	0,23	14,05
10	373,33	64,00	0,22	14,08

Tabla 12. Potencia Eléctrica vs Velocidad de Giro

3.3.2 Grafica de Potencia Eléctrica vs Velocidad de Giro. Se observa en dicha grafica que la potencia eléctrica varía directamente proporcional con la velocidad de giro. Cuando la válvula está completamente abierta (posición diez) se obtiene una potencia eléctrica de 14,08 watt.

- ◆ La potencia eléctrica que se obtiene, es de valores bajos comparados con los de potencia de flecha y más aun con los de potencia hidráulica; lo que es normal debido a las pérdidas en el transcurso del proceso de generación eléctrica.



Grafica 3. Potencia Eléctrica vs Velocidad de Giro

3.4 PRUEBAS DE EFICIENCIA DE LA TURBINA VS VELOCIDAD DE GIRO

Para obtener los valores de eficiencia de la turbina se calcula la potencia de flecha y la potencia eléctrica y se utiliza la siguiente ecuación:

$$\eta = \frac{\text{Pot}_{\text{Flecha}}}{\text{Pot}_h}$$

Donde:

Pot_{Flecha}: potencia de flecha.

Pot_h: potencia hidráulica.

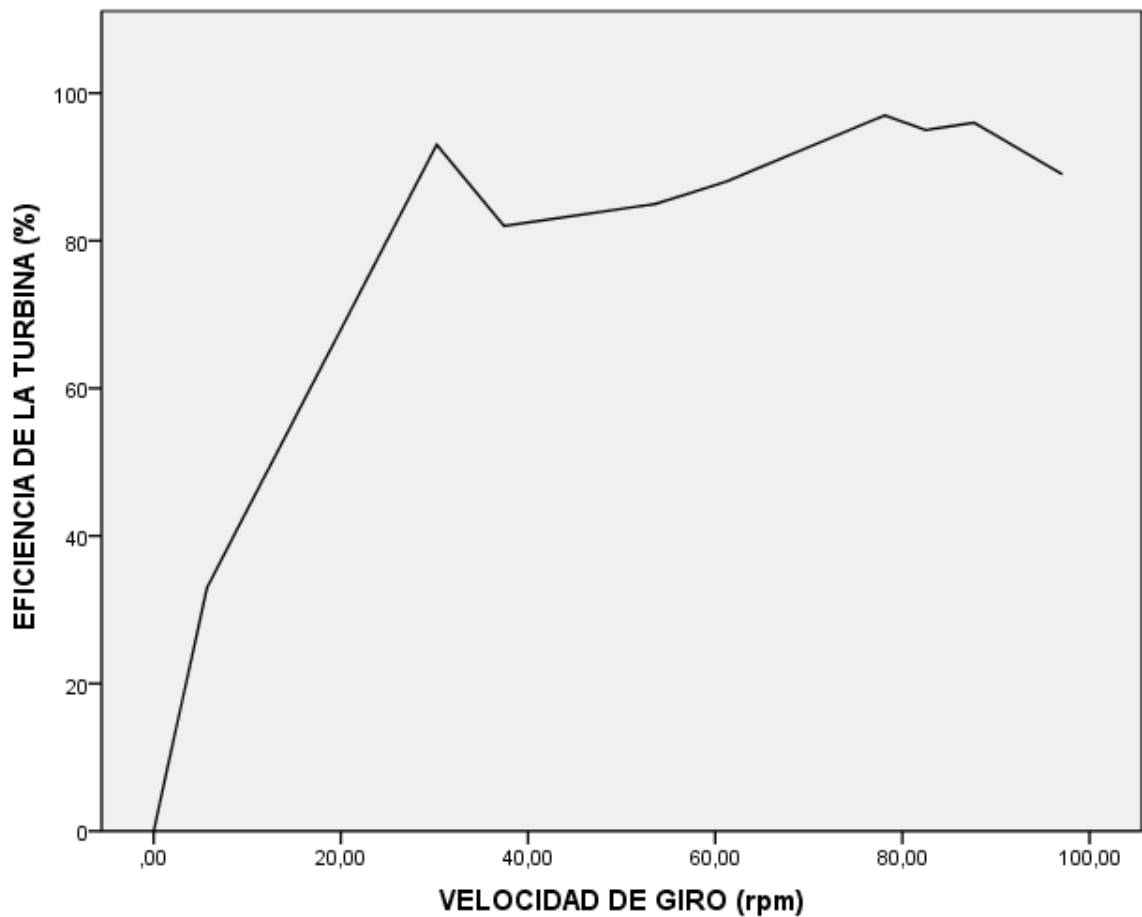
3.4.1 Tabla de Eficiencia de la turbina vs Velocidad de Giro

Posición de la Válvula	Velocidad de Giro (rpm)	Eficiencia de la Turbina
1	0	0
2	65,87	0,33
3	190	0,93
4	219,33	0,82
5	302,03	0,85
6	340,77	0,88
7	430,37	0,97
8	450,10	0,95
9	460,80	0,96
10	504,73	0,89

Tabla 13. Eficiencia de la Turbina vs Velocidad de Giro

3.4.2 Grafica de Eficiencia de la Turbina vs Velocidad de Giro. Al relacionar eficiencia de la turbina vs velocidad de giro se observan varias fluctuaciones, debido a que los valores calculados no producen una curva homogénea como lo indica la teoría, ya que no se poseía los instrumentos adecuados para la medición.

- ◆ La En la posición seis de la válvula se obtiene la mayor eficiencia con un valor de 97% a una velocidad de giro de 340,77 rpm



Grafica 4. Eficiencia de la Turbina vs Velocidad de Giro

3.5 PRUEBAS DE EFICIENCIA TOTAL VS VELOCIDAD DE GIRO

En esta prueba se determinó la relación existente entre la eficiencia total y la velocidad de giro.

La eficiencia total se determina con la siguiente fórmula:

$$\eta = \frac{\text{Pot}_{\text{Elect}}}{\text{Pot}_h}$$

Donde:

Pot_{Elect}: potencia eléctrica.

Pot_h: potencia hidráulica.

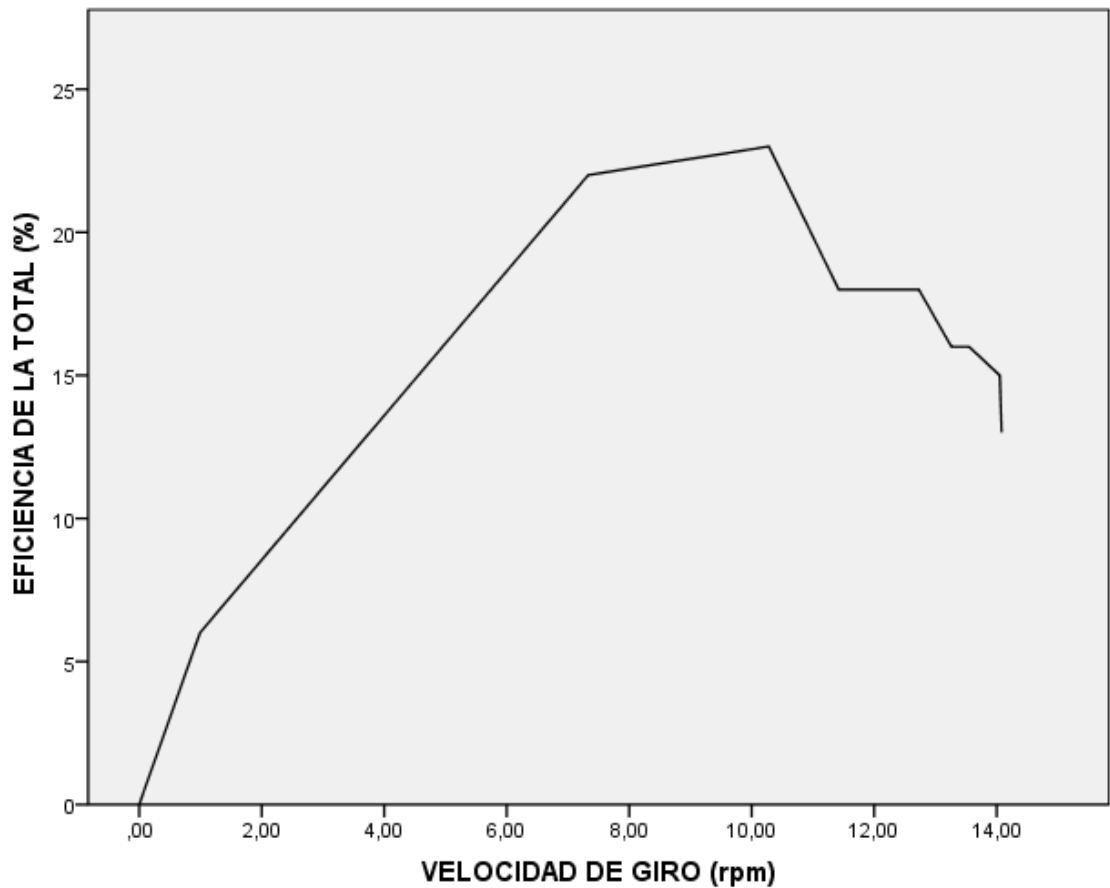
3.5.1 Tabla de Eficiencia Total vs Velocidad de Giro

Posición de la Válvula	Velocidad de Giro (rpm)	Eficiencia Total
1	0	0
2	175,66	0,06
3	194,66	0,22
4	259	0,23
5	283,66	0,18
6	325,13	0,18
7	345,4	0,16
8	356	0,16
9	372,33	0,15
10	373,33	0,13

Tabla 14. Eficiencia Total vs Velocidad de Giro

3.5.2 Grafica de Eficiencia Total vs Velocidad de Giro. Con los anteriores datos se grafico velocidad de giro vs eficiencia total para hallar la curva que indica la relación entre estas dos variables.

- ◆ En la grafica se observa que la eficiencia total alcanza un valor máximo de 23% para una velocidad de giro de 194,66 rpm.
- ◆ En la grafica de la relación eficiencia total vs velocidad de giro, la corriente en la posición dos fue muy baja comparada con las demás posiciones, la potencia eléctrica tuvo un valor menor que la unidad lo que se traduce en un valor de eficiencia muy bajo, el cual no se debe tomar en cuenta ya que esto se puede tomar estadísticamente como un dato perdido.



Grafica 5. Eficiencia Total vs Velocidad de Giro

3.6 COMPARACIÓN DE RESULTADOS CON OTRAS CURVAS DE RENDIMIENTO

Con las pruebas de medición de caudal, torque y revoluciones por minuto se obtienen las graficas de desempeño de la turbina construida las cuales van a ser comparadas con otras turbinas Pelton que se muestran a continuación.

3.6.1 Grafica de Caudal. Al comparar los resultados de las turbinas Pelton con la turbina de impulso construida se muestra las curvas de caudal ($Q = f(n, X)$) para salto constante, son rectas horizontales que depende de la velocidad de la turbina.

3.6.1.1 Figura de la Grafica Teórica de Caudal vs Velocidad de Giro

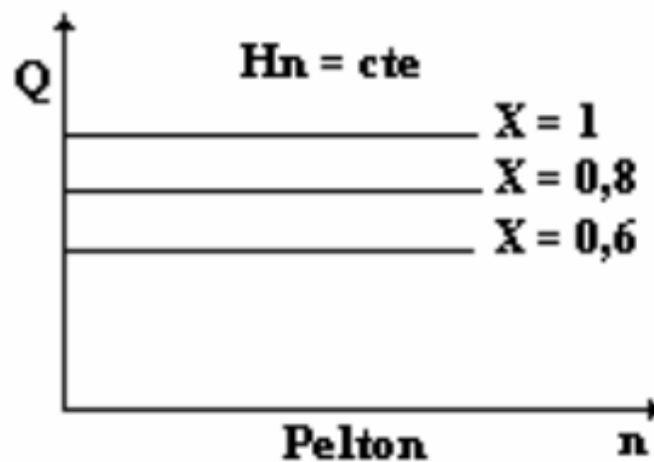
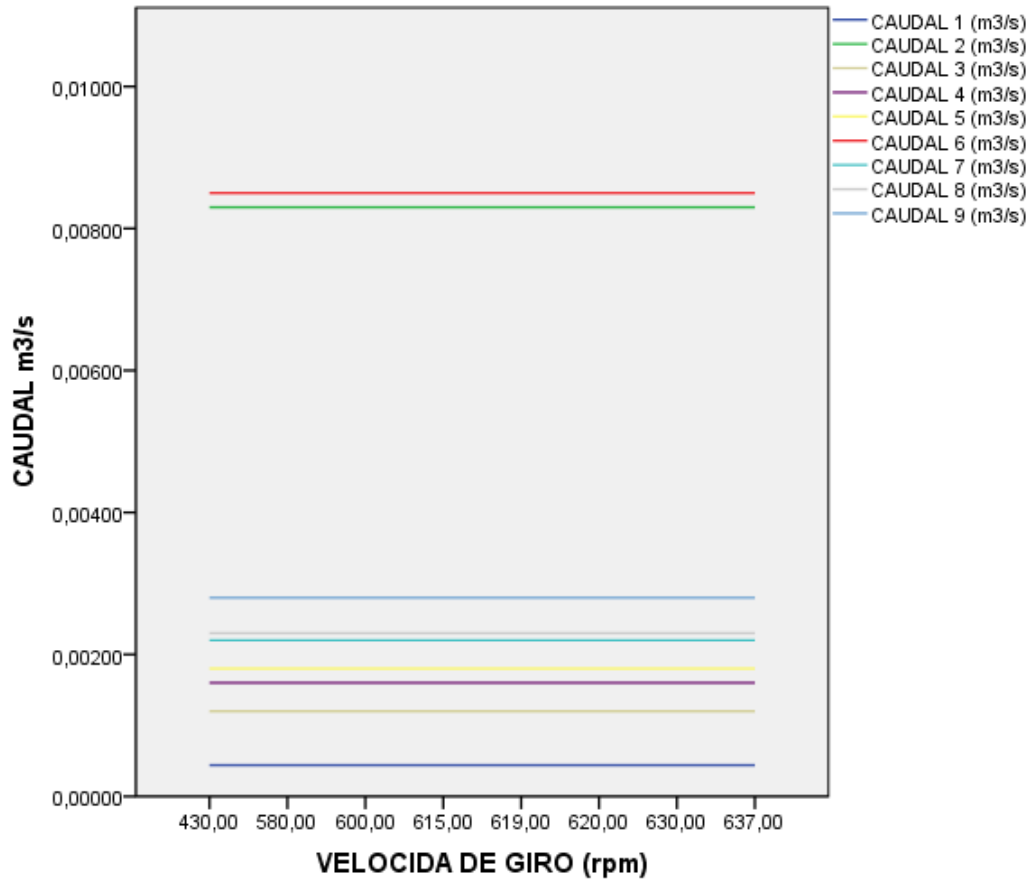


Figura 31. Curvas $Q(n)$ para diversos grados de apertura

3.6.1.2 Grafica de Caudal vs Velocidad de Giro de la Turbina Construida



Grafica 6. Caudal vs Velocidad de giro, para diversas aperturas de la válvula.

3.6.2 Grafica de Torque. Las curvas de par motor ($M = f(n, X)$) para salto contante; son rectas, siendo la ordenada en el origen el par de arranque y la abscisa de ordenada nula la velocidad de embalamiento. El par de arranque en las turbinas es del orden del doble que el de régimen nominal, lo que permite el arranque en carga.

3.6.2.1 Figura de la Grafica Teórica de Torque vs Velocidad de Giro

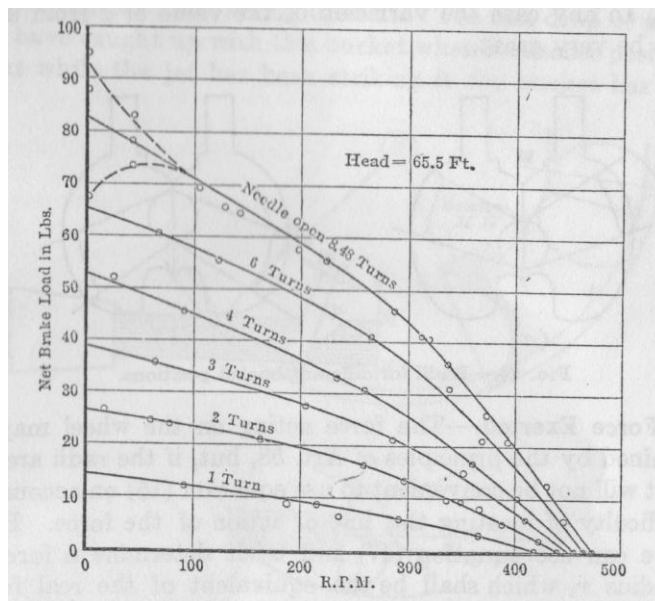
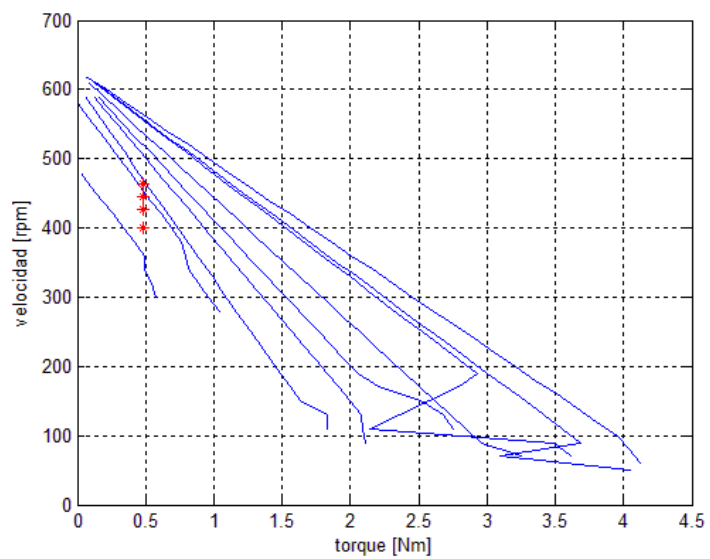


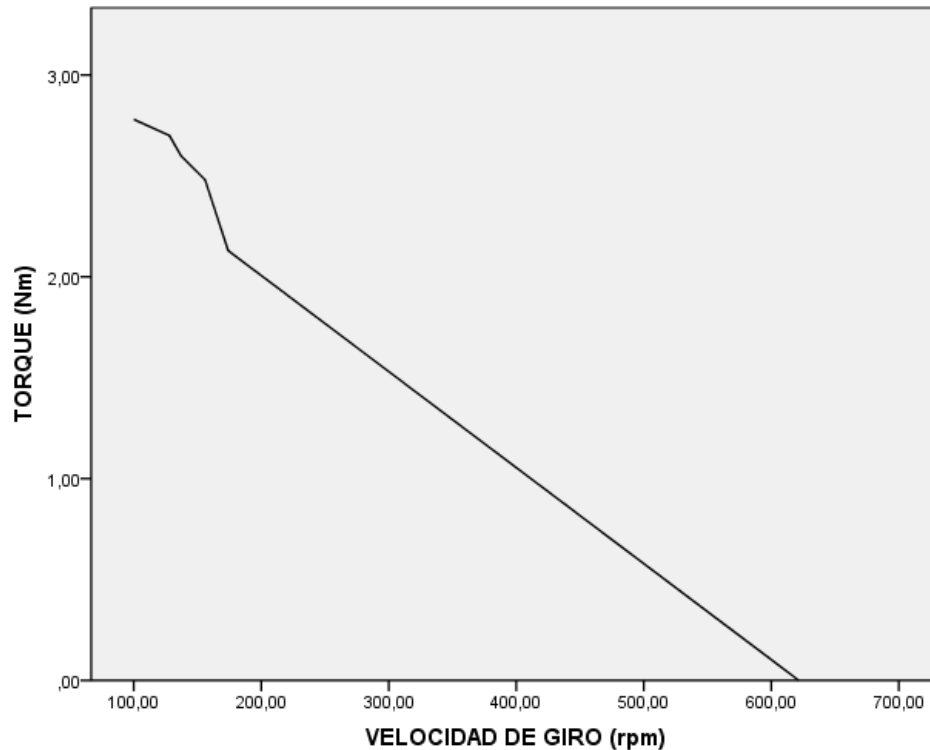
Figura 32. Curva de Par Motor

3.6.2.2 Grafica de Velocidad de Giro vs Torque de la Turbina Construida, en Varias Posiciones de la válvula



Grafica 7. Velocidad de Giro vs Torque

3.6.2.3 Grafica de Torque vs Velocidad de Giro de la Turbina Construida, en una Posición de la válvula



Grafica 8. Torque vs Velocidad de Giro

Con la comparación entre las graficas teóricamente aceptadas y las realizadas en el sistema se llego a la conclusión:

- ◆ Para las pruebas de caudal, la altura neta y la velocidad del chorro son constante en cada apertura de la válvula; como se observa en la grafica seis, se tiene un comportamiento característico de las turbinas Pelton.
- ◆ Al comparar las curvas características ideales de la turbina Pelton, con las graficas obtenidas, se observa que su comportamiento es similar. Por lo tanto se concluye que la turbina tiene un óptimo desempeño.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIONES

- ◆
- ◆ El mayor valor de la eficiencia total es de 23% con una velocidad de giro de 259 rpm.
- ◆ Se construyó la turbina de impulso, la rueda pelton y los álabes con aluminio y la válvula de regulación tipo aguja con bronce debido a sus propiedades anticorrosivas, obteniendo mejores resultados debido el lugar donde esta en funcionamiento.
- ◆ Al efectuar las medidas se muestra un aprovechamiento del 97% con una velocidad de giro de 430,37 rpm.

4.2 RECOMENDACIONES

- ◆ Realizar mantenimiento mensual a los sellos de la carcasa de la turbina para evitar fugas.
- ◆ Instalar un caudalímetro para obtener mejores resultados.
- ◆ Antes de cada prueba revisar que los equipos se encuentren en buen estado.
- ◆ Se debe utilizar bombillos de 8 watt para realizar las pruebas.
- ◆ Realizar mantenimiento mensual al sistema de transmisión y chumaceras.

BIBLIOGRAFIA

[1] EISERING, MARKUS. Micro Pelton Turbines. Switzerland. 1991. Cuarta Edición Capitulo1-2-3

[2] ENCINAS, Manuel. Turbomaquinas Hidraulicas. Tercera Edición, Editorial Limusa. Capitulo 4

[3] Boris Kalmar Alvarado. Thermodynamic [En línea] Disponible en:<http://www.aiu.edu/publications/student/spanish/180207/THERMODYNAMIC.html>(consultado el 28 de febrero 2012).

[4] MATAIX, Claudio. Mecánica de Fluidos y Maquinas Hidráulicas. Segunda Edición, Editorial Alfaomega. Capitulo 22.

[5] Universidad de Castilla la Mancha. La traducción inversa de Textos técnicos sobre centrales hidroeléctricas y contaminación medioambiental [En línea]

Disponible en:

http://usuarios.multimania.es/jrcuenca/Spanish/Turbinas/turbinas_hidraulicas.htm
(consultado el 28 de febrero 2012)

[6] Agapito Tito, Luis Alberto. Turbina. [En línea] Disponible en:

<http://mcatronicaunifim.htmlplanet.com/Hidraulica/pelton.htm>(consultado el 28 de febrero 2012).

[7] Turbina Pelton [En línea] Disponible

en:<http://es.scribd.com/doc/28818058/MAQUINAS-HIDRAULICAS>(consultado el 28 de febrero 2012).

[8] Cesar Sanabria. Turbinas Pelton [En línea] Disponible en:
http://www.ing.una.py/DIREC_PPAL/ACADEMICO/APOYO/Maquinas_Hidraulicas/PDF/MAQ%20HIDRAULICAS%20TURBINAS%20PELTON.pdf(consultado el 28 de febrero 2012).

[9] Solener. Soluciones Energéticas S.A [En línea] Disponible en:
<http://www.solener.com>(consultado el 29 de febrero 2012).

[10] Hidráulica [En línea] Disponible en:

[http://fain.uncoma.edu.ar/La.M.Hi/textos/Maquinas%20hidraulicas/CAVITACION%20\(v%201.2\).pdf](http://fain.uncoma.edu.ar/La.M.Hi/textos/Maquinas%20hidraulicas/CAVITACION%20(v%201.2).pdf)(consultado el 29 de febrero 2012).

[11] Bustamante, Edwin. Arias, Cristian. Turbina Pelton para Generación Eléctrica, Diseño y Construcción. Trabajo de grado. (Ingenieros mecánicos). Universidad Politécnica Salesiana. Facultad de Ingeniería.

[12] Iban, M. El principio de un Prototipo: El Fichero. STL [En línea] Disponible en:
<http://prototipos-rapidos.blogspot.com/2010/08/el-principio-de-un-prototipo-el-fichero.html>(consultado el 04 de marzo del 2012).

[13] Asometal. Fundición [En línea] Disponible en:
<http://www.asometal.org/?p=169>(consultado el 04 de marzo del 2012).

[14] KRAR, Steve F. Tecnología de las Máquinas Herramientas. Quinta Edición, Editorial Alfaomega. Capitulo 10-11

[15] Obtesol. Aluminio y sus Aleaciones [En línea] Disponible en:
http://www.obtesol.es/index.php?option=com_content&task=category§ionid=4&id=35&Itemid=30(consultado el 04 de marzo del 2012).

[16] Fortus. ABSplus [En línea] Disponible en:
<http://www.fortus.com/Products/~~/media/41E2E4486D5F4BCB8B530B8790484542.ashx>(consultado el 04 de marzo del 2012).

- [17]** Ferrocortes. Metales no Ferrosos. [En línea] Disponible en:
<http://www.ferrocortes.com.co/metales-no-ferrosos.html>(consultado el 04 de marzo del 2012).
- [18]** Aceros-israel.Acero de Calidad 1045 [En línea] Disponible en:
<http://www.aceros-israel.com>(consultado el 04 de marzo del 2012).
- [19]** A,Monica. Generador [En línea] Disponible en:
<http://moniicaalba.blogspot.com/2009/06/por-que-funciona-un-generador.htm>
(consultado el 10 de marzo del 2012).
- [20]** Villamizar R., Juan Carlos. Máquinas Eléctricas. (Sic)Editorial Ltda. Capitulo 3
- [21]** González Viñas, José Luis. Sistema de poleas y correas [En línea] Disponible en:
<http://almez.pntic.mec.es/jgonza86/Sistemas%20de%20poleas%20y%20correass.htm>(consultado el 12 de marzo del 2012).
- [22]** International Energy Agency (IEA). Key world energy statistics [En línea] Disponible en: <http://www.iea.org/>(consultado el 05 de febrero del 2012).
- [23]** D.AGAR, M. RASI. The use of a laboratory-scale Pelton wheel water turbine in renewable energy education. [En línea] Disponible en: <http://www.scienceDirect>.
(Consultado el 04 de febrero del 2012)
- [24]** Energias-renovables.Luis Merino [En línea] Disponible en:
<http://www.energias-renovables.com>(consultado el 12 de marzo del 2012).
- [25]** Mott, Robert L. Diseño de Elementos de Maquinas. Cuarta Edición, Editorial Pearson, Capitulo 07
- [26]** Tbwwoods.V-belt Unidades [En línea] Disponible en: <http://www.tbwoods.com>
(consultado el 25 de abril del 2012).

[27] HERNANDEZ ARROYO, Emil. Manual de Estadística. 1 Ed. Bogotá, Colombia: Editorial Universidad Cooperativa de Colombia (Educc), 2006.

ANEXO B

Fotografías del Proceso de Construcción

A continuación se muestran algunas evidencias fotográficas del proceso de construcción de la turbina pelton.

B1. Modelo del Álabes



Figura 33. Modelo del Álabes



Figura 34. Modelo del Álabes Vista Perfil



Figura 35. Modelo del Álabes Vista Superior

B2. Fundición del Ábabe



Figura 36. Arena de Fundición



Figura 37. Proceso de Compactar la Arena



Figura 38. Molde de Fundición



Figura 39. Horno



Figura 40. Ábabe Fundido



Figura 41. Álabe Fundido Vista Perfil



Figura 42. Álabe Fundido Vista Frente



Figura 43. Álabe Fundido Vista Superior

B3. Maquinado de los Álabes



Figura 44. Álabes en la Fresadora



Figura 45. Resultado de los agujeros

B4. Pulido del Álab



Figura 46. Brillado del Álab



Figura 47. Pulido del Álab

B5. Resultado Final del Álabe



Figura 48. Resultado Final del Álabe

B6. Rodete



Figura 49. Rodete



Figura 50. Rodete Vista Perfil

B7. Carcasa del Inyector



Figura 51. Proceso de Torneado del Inyector



Figura 52. Primera Parte del Inyector

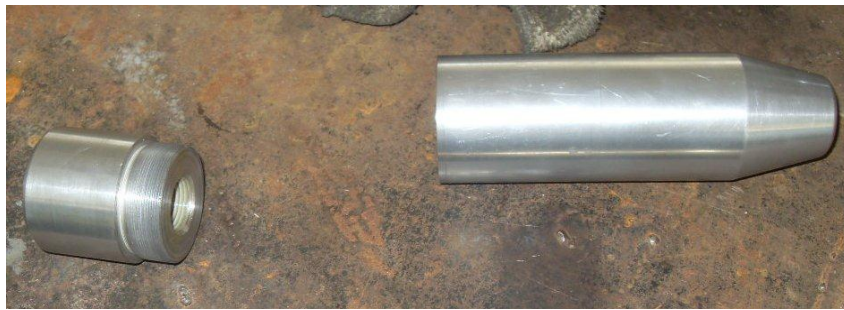


Figura 53. Inyector Dividido



Figura 54. Inyector

B8. Válvula Reguladora de Caudal



Figura 55. Bulbo de la Aguja



Figura 56. Aguja del Regulador

B9. Montaje de la Turbina



Figura 57. Turbina Pelton



Figura 58. Montaje Turbina Pelton Vista Perfil

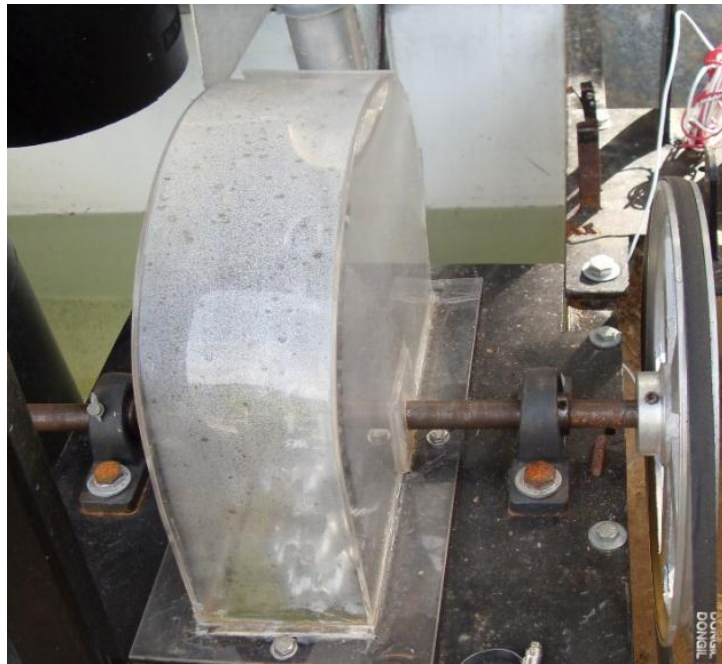


Figura 59. Montaje Turbina Pelton Vista Superior

