

**ESCUELA POLITECNICA DEL EJÉRCITO
SEDE LATACUNGA**

Facultad de Ingeniería en Electromecánica

“TESIS DE GRADO”

**“Diseño e Implementación de un Prototipo de
una Picocentral Hidráulica para uso Rural”**

NÉSTOR GERMÁN TENORIO ZURITA

LATACUNGA - ECUADOR

DICIEMBRE - 2005

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente proyecto ha desarrollado el Sr. Néstor Germán Tenorio Zurita, bajo nuestra dirección.

ING. MIGUEL CARVAJAL
DIRECTOR

ING. MIGUEL LUCIO
CODIRECTOR

DEDICATORIA

A MIS PADRES

“Quienes con su constante esfuerzo y sacrificio han logrado despertar en mi el anhelo de superación. Gracias a su apoyo incondicional ha sido la posible culminación de esta ansiada meta”

AGRADECIMIENTO

“Mi eterna gratitud para todas las personas que me apoyaron en todo momento, de manera especial al Ing. Miguel Lucio, Ing. Miguel Carvajal, Ing. Pacífico Riofrío, Ing. Patricio Pérez, Ing. José Pérez, por ser quienes me brindaron todo el apoyo necesario para la finalización de tan anhelado proyecto”

Néstor

INDICE

CAPITULO I: INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1.- INTRODUCCIÓN.....	1
1.2.- ANTECEDENTES	1
1.3.- JUSTIFICACIÓN	3
1.4.- OBJETIVOS.....	4
1.5.- ALCANCE DE TRABAJO.....	5

CAPITULO II: MARCO TEÓRICO

2.1.- ENERGÍA POTENCIAL DEL AGUA	8
2.2.- CONVERTOR DE ENERGÍA POTENCIAL ELÉCTRICA	8
2.3.- PRINCIPALES MÁQUINAS PRIMARIOS	10
2.3.2.- Turbinas de Reacción.....	14
2.3.2.1.- Turbinas Francis.....	14
2.3.2.2.- Turbinas Kaplan y de hélice	15
2.4.- TIPOS DE CENTRALES HIDROELÉCTRICAS	16
2.4.1.- Centrales de Alta Presión.....	16
2.4.2.- Centrales de Media Presión.....	17
2.4.3.- Centrales de Baja Presión	17
2.4.4.- Centrales de Agua Corriente	17
2.4.5.- Centrales de Agua Embalsada.....	17

2.4.6.- Centrales de Regulación.....	18
2.4.7.- Centrales de Bombeo.....	18
2.5.- PEQUEÑAS CENTRALES HIDROELÉCTRICAS.....	18
2.5.1.- Clasificación de los Sistemas en Picohidráulica:.....	19
2.5.2.- Tipos de sistema empleado en la captación de agua.....	19
2.5.3.- Partes Principales de una Picocentral hidro.....	20
2.6.- EL GENERADOR.....	22
2.6.1.- Tipos de Generadores empleados en Sistemas de Picogeneración...22	
2.6.1.1.- Generador Síncrono.....	22
2.6.1.2.- Generadores de Inducción o asincrónico.....	24
2.6.1.3.- Principio de funcionamiento del Alternador DC.....	24
2.6.1.4.- Ventajas y desventajas entre alternador AC y alternador automotriz DC.....	28

CAPITULO III SELECCIÓN Y DISEÑO

3.1.- DATOS TÉCNICOS.....	31
3.1.1.- Altura Bruta.....	31
3.1.2.- Caudal Disponible.....	32
3.1.3.- Altura Neta.....	35
3.1.4.- Potencia Neta.....	41
3.1.5.- Número de Revoluciones.....	41
3.2.- JUSTIFICACIÓN DE SELECCIÓN.....	42
3.2.1.- Rango de operación.....	42
3.2.2.- Rendimiento estable.....	44
3.2.3.- Facilidad constructiva y otros factores.....	45
3.2.4.- Números Característicos de Revoluciones de caudal N_q y de potencia N_s	46
3.2.5.- Selección Final de Turbina.....	49

<i>Rango de Operación</i>	49
<i>Rendimiento estable</i>	50
<i>Facilidad constructiva y otros factores</i>	50
<i>Números característicos de revoluciones de caudal N_q y de potencia N_s</i>	50
3.3.- DISEÑO HIDRÁULICO DE LA TURBINA	51
3.3.1.- <i>Velocidad óptima (C_1)</i>	51
3.3.2.- <i>Valor de diámetro</i>	52
3.3.3.- <i>Sección transversal del Chorro</i>	54
3.3.4.- <i>Análisis de velocidades en las palas o cucharas</i>	54
3.3.4.1.- <i>Polígono de Velocidades</i>	56
3.3.5.- <i>Cálculo de la altura teórica</i>	58
3.3.6.- <i>Dimensionamiento de cucharas pelton en función del diámetro del chorro</i>	59
3.3.7.- <i>Determinación del número de álabes</i>	63
3.3.8.- <i>Carcaza</i>	64
3.3.9.- <i>Dimensionamiento del Inyector en función del diámetro del chorro</i>	64
3.3.9.1.- <i>Tobera y Aguja</i>	66
3.4.- DIMENSIONAMIENTO DE COMPONENTES MECÁNICOS DE LA PICOCENTRAL HIDRO	68
3.4.1.- <i>Diseño a Fatiga de los Álabes</i>	68
3.4.2.- <i>Cálculo del Área Transversal</i>	69
3.4.3.- <i>Cálculo del Momento de Inercia</i>	72
3.4.4.- <i>Cálculo del esfuerzo de flexión producido en la cuchara</i>	77
3.4.5.- <i>Cálculo del Esfuerzo Cortante</i>	78
3.4.6.- <i>Diseño Mecánico del Eje</i>	81
3.4.7.- <i>Diseño de los Chaveteros</i>	89
3.4.8.- <i>Selección de Chumaceras y Rodamientos</i>	91
3.4.9.- <i>Diseño del sistema de transmisión</i>	95
3.5.- JUSTIFICACIÓN TÉCNICA ECONÓMICA DE LA TURBINA	99

CAPITULO IV: DIMENSIONAMIENTO ELÉCTRICO

4.1.- JUSTIFICACIÓN DE SELECCIÓN.....	103
4.2.- CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL EQUIPO.....	105
4.3.- SEÑAL OBTENIDA	106

CAPITULO V: IMPLEMENTACIÓN DE LA PICOCENTRAL HIDRÁULICA

5.1.- PLANOS DE CONSTRUCCIÓN	107
5.2.- MONTAJE DE LA PICOCENTRAL HIDROELÉCTRICA:	108
5.3.- CIMENTACIÓN Y ANCLAJE	108
5.4. - NIVELADO.....	109
5.5.- ACOUPLE TURBINA – TUBERÍA DE PRESIÓN Y VÁLVULAS DE PROTECCIÓN.....	110
5.6.- INSTALACIÓN DE RODETE Y ACCESORIOS EN LOS APOYOS	112
5.7.- ACOPLAMIENTO ALTERNADOR TURBINA	113
5.8.- TEMPLADO DE BANDAS.....	114
5.9.- PUESTA EN MARCHA DE ALTERNADOR Y COMPONENTES ADICIONALES.....	114
5.10.- PRUEBAS ANTES DE LA PUESTA EN MARCHA.....	114
5.11.- RESULTADOS OBTENIDOS.....	116

5.11.1.- Variación Caudal - Torque.....	117
5.11.2.- Variación Caudal - Potencia de Salida.....	118
5.11.3.- Variación Caudal - RPM.....	119
5.11.4.- Variación Caudal - Voltaje Generado	120
5.11.5.- Análisis de Resultados.....	121
5.12.- MANUAL DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO	121

CAPITULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1.- CONCLUSIONES.....	133
6.2.- RECOMENDACIONES.....	135
BIBLIOGRAFIA Y PAGINAS ELECTRONICAS	137

INDICE DE TABLAS

TABLA		PÁGINA
3	Mediciones del caudal de aforo durante un Año.	34
3.1	Rangos de alturas de turbinas	43
3.2	Relación de Altura y Caudal para pico Turbinas.	44
3.3	Rendimiento teórico de los diferentes tipos de turbinas	45
3.4	Cuadro comparativo de las Turbinas en relación varios factores	46
3.5	Límites de Velocidad específica en función de la carga en (m) para turbinas Pelton Francis, Kaplan.	48
3.6	Números característicos para varias turbinas	49
3.7	Comparación de rangos de Dp para microgeneración.	53
3.8	Proporciones de las cucharas Pelton en función del diámetro del chorro	61
3.9	Datos calculados para la cuchara de la turbina Pelton	62
3.10	Proporciones de la Tobera en función del diámetro del chorro	66
3.11	Datos calculados para la cuchara de la turbina Pelton	68
3.12	Costos de Construcción de Pico central Hidro	99
3.13	Lista de precios de algunos fabricantes de sistemas pico hidro	101
5.14	Variación Caudal - Torque	116
5.15	Variación Caudal - Potencia de Salida	117
5.16	Variación Caudal - RPM..	118
5.17	Variación Caudal - Voltaje Generado	119
5.18	Paralización de PCH por mantenimiento	127
Anxo 1.1	Coeficiente de resistencia por válvulas	
Anxo 1.2	Propiedades Del Agua	
Anxo 1.3	CARACTERISTICAS TÉCNICAS TUBERIA POLIETILENO PLASTIGAMA	
Anxo 2	DIAGRAMA DE MOODY	
Anxo. 3	Tabla de Valores Aproximados de Factor de servicio	
Anxo. 4	Tabla de Longitudes normalizadas de correas trapezoidales norteamericanas. Constantes de potencia	
Anxo 5	Tabla Coeficiente de Diámetro pequeño Kd	
Anxo 6	Tabla Coeficiente de arco de contacto K _?	
Anxo 7	Tabla Factores de Corrección de Longitud K _L	
Anxo 8	PROGRAMA DE MANTENIMIENTO SEGÚN SU PERIODICIDAD	

INDICE DE FIGURAS

FIGURA		PAGINA
2.1	Convertor de Energía potencial Eléctrica	8
2.2	Turbina Pelton	12
2.3	Turbina Turgo	13
2.4	Turbina Michel Banki	14
2.5	Turbina Francis	15
2.6	Turbina Hélice y Kaplan	17
2.7	Microcentral de derivación	19
2.8	Microcentral de embalse	20
2.9	Partes Principales de una Pico central Hidro	21
2.10	Pico central Hidroeléctrica	22
2.11	Generador Síncrono	23
2.12	Principio de funcionamiento de un alternador	25
2.13	Partes de un alternador automotriz	26
2.14	Bobina fija del alternador	26
2.15	Regulador de carga	27
2.16	Diodo rectificadores	27
3.17	Medida del caudal usando un Barril de capacidad conocida	34
3.18	Altura neta aprovechada en la turbina	35
3.20	Entrada del chorro de agua y ángulos que forma a su salida de la pala	54
3.21	Salida del agua de la pala y relación con la Pala	55
3.22	Polígono de velocidades del chorro a la entrada y salida de la cuchara	56
3.23	Partes de una Cuchara Pelton	60
3.24	Forma y dimensiones de los álabes de la turbina Pelton	60
3.25	Inyector de una Turbina Pelton	64
3.26	Dimensiones de la Tobera y aguja	65
3.27	Corte de un álabe en sección transversal crítica	69
3.28	Representación gráfica del área de un semieipsoide	69
3.29	Representación en dos dimensiones de un solo semielipsoide	70
3.30	Representación en dos dimensiones de un solo semielipsoide	75
3.31	Representación de los esfuerzos fluctuantes que se producen en la cuchara	78
3.32	Representación de las fuerzas producidas sobre el eje de la turbina	81
3.33	Dimensiones del disco del rodete	83

3.34	Diagrama de Corte y momento producido en el eje	85
3.35	Chavetero	89
5.36	Cimentación de Patas de Pico central	109
5.37	Método empleado en la nivelación del proyecto	110
5.38	Conjunto Inyector (Boquilla aguja)	111
5.39	Turbina – Inyector	111
5.40	Turbina – Tubería de Presión y válvulas de protección	112
5.41	Instalación de Rodete y Accesorios en los Apoyos	113
5.42	Acoplamiento alternador turbina	114
5.43	Pruebas antes de la puesta en marcha	115

CAPITULO I: INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1.- Introducción

La energía hidráulica ha sido aprovechada con la caída de agua desde cierta altura, en donde la energía potencial por efecto de la acción de la gravedad se convierte en energía cinética. El agua pasa por las turbinas a gran velocidad, provocando un movimiento de rotación que finalmente, se transforma en energía eléctrica por medio de un generador.

El Ecuador, por su posición geoespacial, presenta potenciales de recursos energéticos renovables y alternativos, como: el sol, viento, pequeñas centrales hidroeléctricas, biomasa, energía de los océanos y geotermia.

La producción de energía eléctrica a través del aprovechamiento de la fuerza del agua forma parte de nuestra cultura como un medio normal de producir energía, pero que no logra en la actualidad llegar a ciertos lugares alejados, los cuales poseen necesidades energéticas, pero que si tienen recursos hídricos aprovechables, que permiten la puesta en marcha de pico centrales hidro para cubrir la carencia de electricidad a estos lugares.

Este proyecto está contemplado en el diseño de una turbina y selección de los diversos componentes de una picocentral hidroeléctrica, hasta lograr efectuar su respectivo montaje.

Por tanto la factibilidad de los proyectos enmarcados en la microgeneración eléctrica, contribuirá a la integración de las zonas más aisladas y transformándolas en importante aporte para el desarrollo del Ecuador.

1.2.- Antecedentes

La hidroelectricidad tuvo mucha importancia durante la revolución industrial, ya que impulsó las industrias textiles y del cuero.

La primera central hidroeléctrica se constituyó en 1880 en Northumberland, Gran Bretaña.

El renacimiento de la energía hídrica se produjo del desarrollo del generador eléctrico, seguido de la turbina hidráulica y debido al aumento de la demanda de la electricidad a principios del siglo XX. En 1920 las centrales hidroeléctricas generaban ya una parte de la producción total de la electricidad.

A principios del siglo XX, se desarrolló y perfeccionó las turbinas modernas tipo Pelton, Francis, Kaplan, Banki, y Turgo, las mismas que fueron proliferadas en Europa; siendo principalmente las centrales hidroeléctricas “pequeñas” con capacidades instaladas de varias decenas o centenas de kW.

Las aplicaciones hidráulicas en miniatura son muy comunes en todo el mundo; siendo los más destacados en: China, Nepal y Sri Lanka, Indonesia etc. A partir del siglo XXI se inicio investigaciones en los países tercer mundistas, prevaleciendo Cuba, México y en Latinoamérica Colombia, Perú, Chile.

La energía hidráulica es el segundo recurso renovable más utilizado en el mundo. El Ecuador, debido a su situación privilegiada desde el punto de vista hidrológico, tiene un gran potencial para desarrollar proyectos que impliquen aprovechamientos hidráulicos.

El ex Instituto Ecuatoriano de Electrificación — INECEL, encargado de la planificación y desarrollo del sector eléctrico del país, hasta marzo de 1999, estudió el potencial hídrico de un elevado porcentaje de las cuencas hidrográficas del país y la posibilidad de aprovechamiento de esta energía renovable, mediante la instalación de centrales hidroeléctricas de pico, mini, pequeña, mediana y gran capacidad. Estos estudios se concretaron en la edición de un Catálogo de proyectos hidroeléctricos a ejecutarse en el corto, mediano y largo plazo.

Por lo tanto en nuestro país por medio del Ministerio de Energía y Minas se arrancó el Proyecto **ESMAP**, considerado como el primer paso fundamental para estimular la investigación, experimentación y creación de centrales pico hidroeléctricas, dicho proyecto ha sido financiado por la cooperación técnica del Banco Mundial, a través de la consultora ITPOWER.

Actualmente se han instalado 28 centrales pico hidro con una turbina híbrida de tecnología asiática (Vietnam), la misma que se encuentran en una etapa de análisis de funcionamiento, y por ende tratando de estudiar sus parámetros técnicos y el poder determinar la factibilidad técnica económica de su uso en zonas rurales del país.

Pero de acuerdo a informaciones de la empresa INELMO (Empresa privada encargada en la construcción de transformadores y elementos de potencia) a quién el MEM dio la potestad de realizar dichas pruebas, INELMO ha informado acerca de los resultados completamente en contra del proyecto ESMAP⁽¹⁾.

El Ministerio de Energía y Minas del Ecuador (MEM) en la actualidad esta plenamente interesado en que se investigue acerca de los proyectos hidráulicos conceptualizados como energías renovables. Dicha entidad ha logrado establecer convenios con las Universidades más importantes del país (ESPE, EPN, ESPOL). En donde han logrado difundir claramente las fuentes inagotables, como el sol, viento, biomasa, geotermia, agua.

La Empresa ELEPCO posee la Central de Generación Hidráulica Illuchi la cual esta dividida en Central Illuchi 1. Teniendo como precedente de esta Central inicial, que el agua turbinada en cierto volumen es captada para la Central Illuchi 2, para efectos de refrigeración de los cojinetes de la Central Illuchi 2., sitio en donde se ubicará el embalse de agua para la picocentral hidro.

⁽¹⁾ MINISTERIO DE ENERGIA Y MINAS REPÚBLICA DEL ECUADOR www.menergia.gov.ec

Existen sectores rurales como (Sigchos – Cotopaxi) y una infinidad de lugares alejados en el Ecuador, que no poseen suministro de energía, por la difícil ejecución de proyectos eléctricos de distribución por el alto costo que el mismo representaría. Pero estas lejanías si tienen causas de agua en donde se podría ubicar las pico hidro de costo módico.

1.3.- Justificación

El Ministerio de Energía y Minas ha considerado como política fundamental, fomentar el desarrollo y uso de los recursos hidroenergéticos del país, así como mejorar las condiciones de vida de la población rural alejada de los principales centros poblados. Ha previsto desarrollar un plan de instalación de Picocentrales Hidroeléctricas, a ser construidas y explotadas por el sector privado, facilitando el acceso a la energía eléctrica de bajo costo, utilizando los recursos naturales hidroeléctricos.

Se puede definir claramente que en nuestro país en la actualidad la implementación de centrales pico hidro se considera como un tema de vital importancia por ser el agua una de las fuentes inagotables de energía. Es así que el Ministerio de Energía y Minas en conjunto con el WWF (World Wildlife Found) y la Fundación Natura, han emprendido una campaña de divulgación acerca de estas fuentes inagotables.

La energía hidráulica es el segundo recurso renovable más utilizado en el mundo. Ecuador, debido a su situación privilegiada desde el punto de vista hidrológico, tiene un gran potencial para desarrollar proyectos que impliquen aprovechamientos hidráulicos y básicamente optimizando todos los recursos por más pequeños que estos resulten.

De implantarse las picocentrales en el Ecuador de una forma real es probable que muchas de las turbinas, generadores y equipos auxiliares se puedan fabricar localmente a través de convenios de transferencia de tecnología con diversos fabricantes en el extranjero.

Este prototipo puede ser un referente claro de una picocentral hidro la cual puede ser montada en cualquier parte que se tenga causas de agua.

Actualmente en las zonas rurales alejadas existen pequeñas agrupaciones y en el mayor de los casos viviendas aisladas que no poseen suministro de energía eléctrica por no ser posible económicamente su interconexión con el SNI (Sistema Nacional Interconectado) y con las minicentrales hidroeléctricas, debido a la lejanía con relación a éstas y las difíciles condiciones geográficas en que habitan estas familias, pues en el mayor de los casos esta problemática se centra en la montaña. Por consiguiente las Centrales Pico Hidro podrían cubrir estas zonas que carecen de fluido eléctrico.

Las picoturbinas hidráulicas no afecta a nadie, por considerase energía limpia y relativamente silenciosa y por ende no contamina el medio ambiente.

1.4.- Objetivos

1.4.1.- Objetivo General del Proyecto

- Diseñar e implementar un prototipo de picocentral hidráulica para uso rural

1.4.2.- Objetivos Específicos del Proyecto

- Aprovechar los recursos renovables, como causas pequeños de agua que posee el Ecuador por medio de una picocentral hidráulica.
- Realizar la pico hidro con alternativas de costo módico para que sea factible su respectivo montaje en determinada población.

- Conocer claramente todos los parámetros de diseño de la turbina y selección de todos los demás componentes de una pico hidro para posteriormente poderlos aplicar con todos los datos técnicos adquiridos.
- Generar por medio de un alternador DC, una señal de carácter constante, para no tener inconvenientes de control de frecuencia y velocidad.
- Consolidar el aprovechamiento de fuentes locales de energía como una alternativa viable para la electrificación rural de sitios aislados y dispersos.

1.5.- Alcance de Trabajo

Para alcanzar los objetivos y las metas propuestas en este proyecto se ha visto conveniente dividir en los siguientes capítulos, los mismos que tendrán el siguiente alcance:

Capítulo I: INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

En este capítulo inicial se da a conocer la introducción y en los antecedentes referentes a los inicios y situación actual de una picocentral hidroeléctrica. Posteriormente por medio de la justificación se especifica claramente cuales son los puntos más importantes para una buena aceptación de estos proyectos. Finalmente se ha establecido los objetivos y alcance de trabajo.

Capítulo II: MARCO TEÓRICO

Detalla toda la parte teoría, desde la determinación de energía, conversor de energía, definición de máquinas primarias de acción y reacción con sus respectivas partes y funcionamiento. También se explica los tipos de centrales hidroeléctricas, tipos de generadores y principalmente el alternador automotriz, y concluyendo con ventajas y desventajas entre generadores de AC y DC.

Capítulo III: SELECCIÓN Y DISEÑO

Inicialmente se describe y determina en el sector de ILLUCHI los parámetros de diseño que son empleados para realizar la correcta selección de turbina con condiciones de altura, caudal, rendimiento, facilidad de construcción y números característico de revolución de potencia y caudal. Una vez ya seleccionada la turbina adecuada, se efectúa el diseño hidráulico, logrando determinar velocidades, eficiencias, geometría de la turbina. Adicionalmente se dimensiona los componentes mecánicos con el diseño respectivo, y por motivos de comprobación se ha visto la necesidad de efectuar el diseño a la fatiga de los álabes. Finaliza este capítulo con una pequeña justificación técnica económica de la turbina

Capítulo IV: DIMENSIONAMIENTO ELÉCTRICO

Muestra la selección del alternador a utilizar, considerando sus características de funcionamiento, rendimiento y señal obtenida.

Capítulo V: IMPLEMENTACIÓN DE LA PICOCENTRAL HIDRÁULICA

En esta parte del proyecto se presenta los planos de construcción de la turbina y componentes de la picocentral hidroeléctrica. Además se indica el

montaje de turbina, alternador, ubicación de válvulas de protección en el sistema.

Con los resultados obtenidos del proyecto en marcha se determina las características adquiridas de la pico hidro.

Se muestra finalmente un manual de operación y mantenimiento .

Capitulo VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

Del diseño e implementación finiquitada se resumen las principales consideraciones a tomarse en futuros proyectos del aprovechamiento de energías renovables

CAPITULO II: MARCO TEÓRICO

2.1.- Energía potencial del Agua

El agua que se encuentre suspendida con cierta altura es transformada a energía cinética el momento que el agua deja de estar suspendida y es transportada por medio de un canal o tubería, lo cual permite que el agua impacte en la turbina y que produzca energía mecánica motriz.

La existencia de esta energía potencial se debe a la gravitación (fuerza de gravedad), su nombre más completo es energía potencial gravitatoria.

2.2.- Conversor de Energía potencial Eléctrica

Un hidrosistema requiere de un caudal de agua y una diferencia de altura conocida como “salto” para producir potencia útil. Se trata de un sistema de conversión de energía, es decir, se toma energía en forma de caudal y salto y se entrega energía mecánica en el eje para transformarla en electricidad.

Ningún sistema de conversión puede entregar la misma cantidad de energía útil, pues una parte de la energía se pierde en el sistema mismo en forma de fricción, calor, ruido, etc.

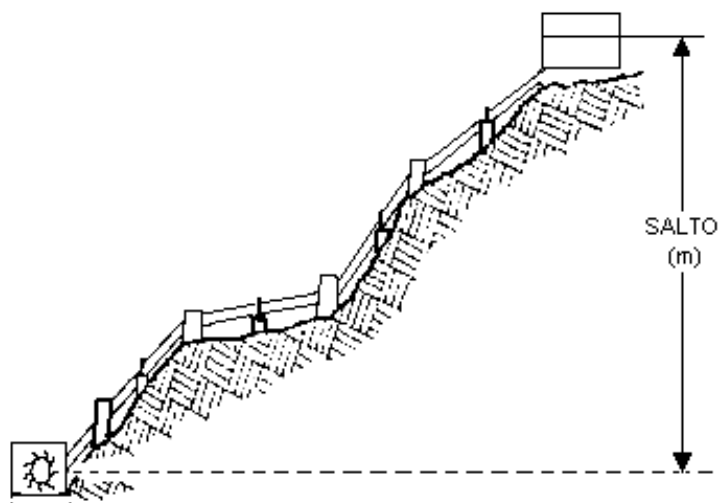


Figura # 2.1

La Ecuación de Conversión es:

$$\text{Potencia de entrada} = \text{Potencia de salida} + \text{pérdidas} \quad (1)$$

O también:

$$\text{Potencia de salida} = \text{Potencia de entrada} * \text{eficiencia de conversión} \quad (2)$$

La ecuación (2) se expresa por lo general de una manera diferente, en la que interviene la potencia de entrada o potencia disponible, la potencia útil o potencia neta y la eficiencia total del sistema por lo que ⁽²⁾:

$$P_{\text{neta}} = P_{\text{disp}} * h \quad (3)$$

La potencia disponible es igual al salto disponible multiplicado por el caudal y también multiplicado por un factor de 10, obteniéndose la ecuación fundamental de potencia hidráulica, por lo tanto se tiene la siguiente expresión:

$$P_{\text{disp}} = g * h_{\text{disp}} * Q \quad (4)$$

Entonces:

$$P_{\text{neta estimada}} = 9.8 * h_{\text{disp}} * Q * ? \quad (5)$$

Donde:

P = potencia expresada en Kw.

$?$ = rendimiento global del sistema %

g = aceleración de gravedad expresada en m/s^2 , $9,8 m/s^2$

Q = caudal de agua expresada en m^3/s

h_{disp} = salto o desnivel expresado en m

⁽²⁾ INTERMEDIATE TECHNOLOGY DEVELOPMENT GROUP ITDG PERÚ – OLADE. Manual de Mini y Microcentrales Hidráulicas (Guía para desarrollo y proyectos), Pág. 4.

2.3.- Principales Máquinas Primarias

En el proceso de transformación de la energía potencial de un fluido en energía cinética o viceversa, se emplean diferentes tipos de máquinas, que pueden clasificarse de la siguiente manera:

Las **máquinas Gravimétricas** utilizan la variación de la energía geodésica o altura bruta del fluido. A ellas pertenecen, por ejemplo, las ruedas hidráulicas.

A esta altura se la conoce como altura bruta o altura geodesia

Las **máquinas hidrostáticas**, también llamadas de desplazamiento positivo o volumétricas, aprovechan fundamentalmente las variaciones de la energía de presión del fluido. Se construyen de variantes: recíprocas y rotativas. A este tipo pertenecen, las máquinas de vapor, los motores de combustión interna, las bombas de émbolos y bombas de engranajes

A diferencia de los dos grupos anteriores, las **máquinas rotodinámicas o turbomáquinas** aprovechan las variaciones de la energía cinética que el fluido experimenta a su paso por la máquina.

Por lo tanto una turbina hidráulica es una turbomáquina hidráulica, en la cual el trabajo mecánico proviene de la variación de la cantidad de movimiento del agua al fluir a través de un sistema de álabes rotativos. En este sistema, denominado rodete, puede ocurrir una simple desviación del flujo de agua o, en otros casos una desviación y una aceleración de este flujo.

Partes de una turbina hidráulica:

Una parte fija llamada distribuidor con la función mecánica de dirección y regulación del caudal que llega al rodete, y la función hidráulica de transformación de la energía potencial de agua en energía cinética.

Una parte móvil denominada rodete puesto en movimiento por el agua que sale del distribuidor con la función de comunicar energía mecánica al eje en el que está montada.

En relación a sus características dinámicas, las turbinas se pueden clasificar de la siguiente manera:

La energía potencial se transforma en energía cinética, mediante un chorro de gran velocidad, que es proyectado contra unas cucharas, fijas en la periferia de un disco. A este tipo de turbinas se las conoce como **turbinas de acción**.

La presión del agua actúa directamente sobre los álabes del rodete, disminuyendo de valor a medida que avanza en su recorrido. A este tipo de turbinas se las conoce como **turbinas de reacción**. Al estar el rodete completamente sumergido y sometido a la presión del agua.

2.3.1- Turbinas de Acción.

2.3.1.1.- Turbinas Pelton

Fue inventada por Lester A. Pelton (EEUU, 1829 - 1908) y patentada en 1880 (Figura # 2.2a).

Es de flujo tangencial y admisión parcial, consta de un disco provisto de una serie de cucharas montadas en la periferia. Las cucharas pueden estar empernadas al disco, unidas por soldadura o fundidas en una sola pieza con el disco. Este tipo de turbina puede instalarse en eje horizontal con 1 o 2 inyectores y con el eje vertical con 3 o 6 inyectores. Se emplea en pequeñas y grandes centrales.

Un inyector consta por lo general de una tobera de sección circular provista de una aguja de regulación que se mueve axialmente, variando

la sección del flujo. Para interrumpir el flujo se tiene una placa deflectora, e incluso para reducir los golpes de ariete. (Figura #2.2b).

En las turbinas pequeñas que se utilizan en las micro, picocentrales se puede prescindir de la aguja y operar con una o más toberas con caudal constante, manteniéndose en algunos casos la placa deflectora ⁽³⁾.

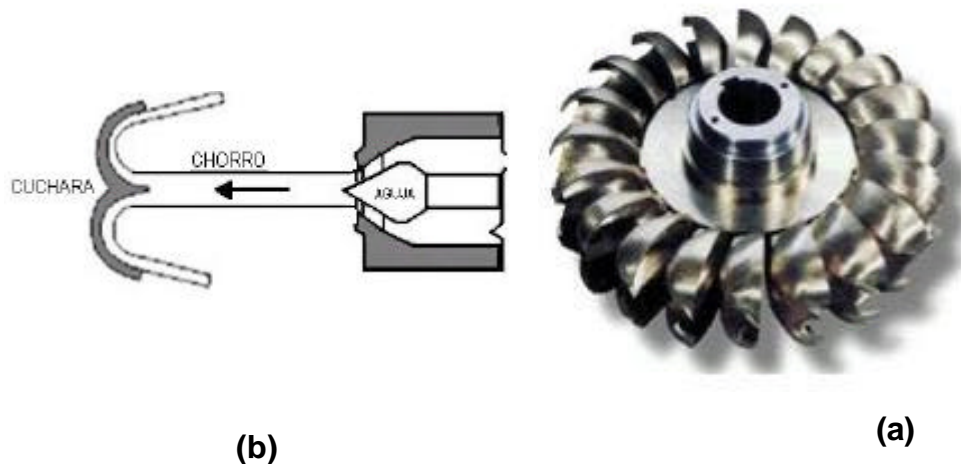


Figura # 2.2

2.3.1.2.- Turbinas Turgo

Esta turbina fue diseñada por Eric Croudson (Gran Bretaña) y patentada en 1920. Posteriormente fue perfeccionada por E. Jackson (Gran Bretaña) en 1936 – 1968. (Figura # 2.3b)

Turbina de tipo axial y de admisión parcial, se asemeja a un medio rodete pelton, como si a este se le hubiese dividido en la mitad por medio de un plano que pase por las aristas de las cucharas y sea perpendicular al eje. Esta turbina puede ser montada en forma horizontal o vertical

Consiste básicamente de un inyector del tipo pelton que proyecta un chorro de agua inclinado respecto al rodete, en un ángulo de 20°, entrando por un lado del disco y saliendo por el otro, (Figura #2.3) ⁽⁴⁾.

⁽³⁾ **INTERMEDIATE TECHNOLOGY DEVELOPMENT GROUP ITDG PERÚ – OLADE.** Manual de Mini y Microcentrales Hidráulicas (Guía para desarrollo y proyectos), Pág. 128

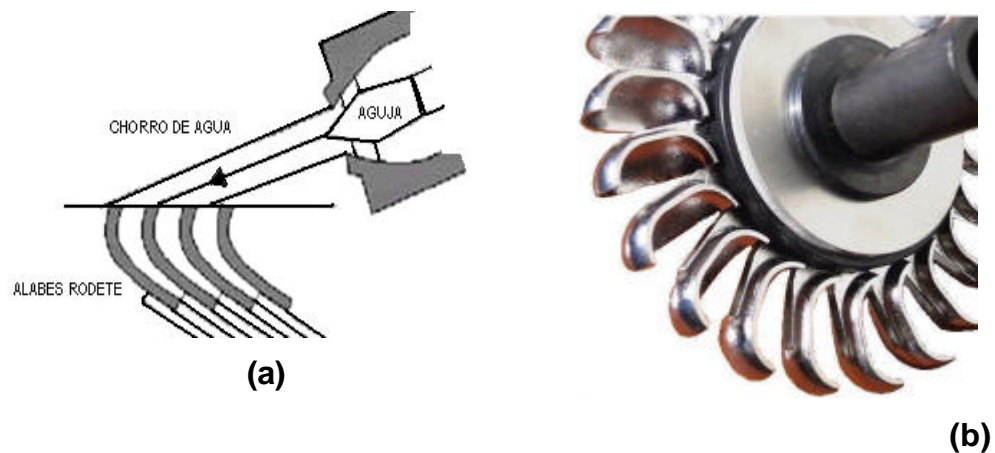


Figura # 2.3

2.3.1.3.- Turbinas de flujo cruzado Michell-Banki

Fue inventada por A. G. Michell (Australia) y patentada en 1903. Posteriormente Donat Banki (Hungría), 1917 y 1919 fue estudiada (Figura # 2.4a).

Turbina de acción, de flujo radial centrípeto – centrífugo, de flujo transversal, de doble paso de admisión parcial. Aunque se dice que tiene cierto grado de reacción en el primer paso, a causa de una presión ligeramente superior a la atmosférica, debido a la cercanía del inyector al rodete (Figura # 2.4b).

Consiste en una tobera de sección rectangular que abarca el rodete en un cierto ángulo de admisión parcial. Esta dotado de una paleta directriz para la regulación del caudal. Se puede operar manual o automáticamente.

El rodete consta de dos o más discos paralelos, entre los que se montan, cerca del borde, unas láminas curvadas que hacen el papel de álabes.

⁽⁴⁾ **INTERMEDIATE TECHNOLOGY DEVELOPMENT GROUP ITDG PERÚ – OLADE.** Manual de Mini y Microcentrales Hidráulicas (Guía para desarrollo y proyectos), Pág. 129

Estos rodetes se prestan a una construcción artesanal en países en vía de desarrollo.

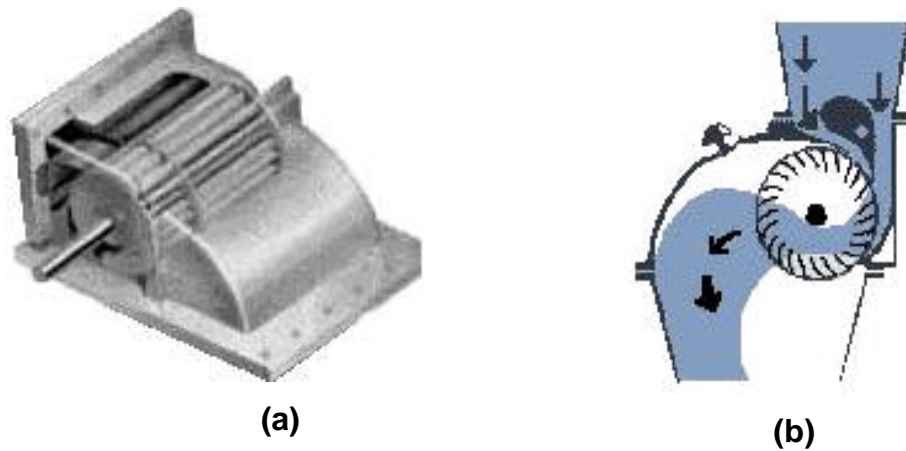


Figura # 2.4

2.3.2.- Turbinas de Reacción

2.3.2.1.- Turbinas Francis

Inventada por Samuel Hows (EEUU) y posteriormente perfeccionada por James B Francis (gran Bretaña, 1815 – 1892, hacia 1948) (Figura # 2.5b)

Son turbinas de reacción de flujo mixto, centrípeto y admisión total. Consta de una serie de álabes colocados entre un disco y una corona exterior; por lo general poseen doble curvatura. El agua ingresa radialmente por periferia externa y abandona el rodete en dirección axial para dirigirse hacia el tubo de aspiración.

El distribuidor consta de una serie de álabes de posición variable, conformando conductos convergentes del tipo tobera. De este modo el flujo del agua se acelera y orienta hacia el rodete bajo diferentes

ángulos de inclinación y permite una regulación del caudal (Figura # 2.5 a) ⁽⁵⁾.



Figura # 2.5

2.3.2.2.- Turbinas Kaplan y de hélice

Turbina desarrollada por Víctor Kaplan (Austria 1876 - 1934) en la Universidad de Burno y patentada en 1912 (Figura # 2.6a).

Son turbinas de reacción de flujo axial y de admisión total. La principal característica consiste en que el rodete tiene álabes del perfil de avión orientables mediante mecanismos situados en el interior del cubo.

La turbina de hélice es una variante de la turbina Kaplan, pues posee un rodete con los álabes fijos. Con ello se abarata el rodete (Figura # 2.6b). Esta turbina se caracteriza porque tanto los álabes del rodete como los del distribuidor son fijos, por lo que solo se utilizan cuando el caudal y el salto son prácticamente constantes.

⁽⁵⁾ **INTERMEDIATE TECHNOLOGY DEVELOPMENT GROUP ITDG PERÚ – OLADE.** Manual de Mini y Microcentrales Hidráulicas (Guía para desarrollo y proyectos), Pág. 131

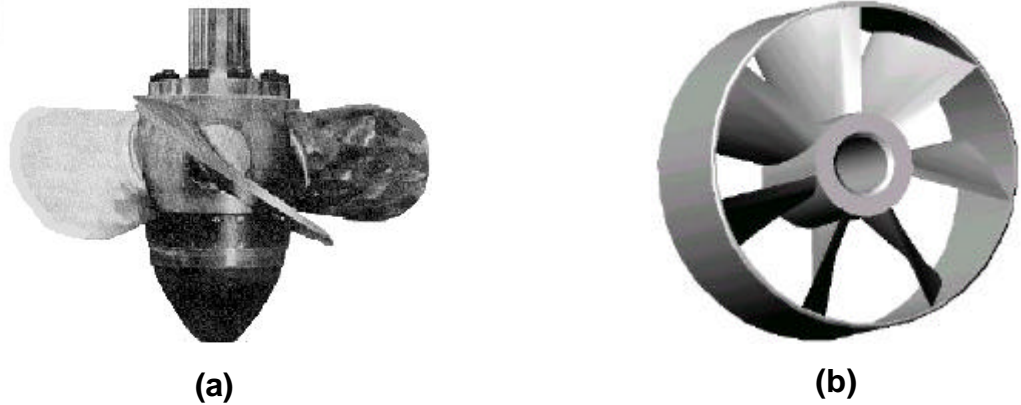


Figura # 2.6

2.4.- Tipos de Centrales Hidroeléctricas ⁽⁶⁾

Se pueden clasificar según varios argumentos, como características técnicas, peculiaridades del asentamiento y condiciones de funcionamiento.

Inicialmente hay que distinguir las que utilizan el agua según discurre normalmente por el cauce de un río, y aquellas otras a las que ésta llega, convenientemente regulada, desde un lago o pantano; por lo tanto las centrales hidráulicas se pueden clasificar en:

Según la altura del salto de agua o desnivel existente:

2.4.1.- Centrales de Alta Presión

Aquí se incluyen aquellas centrales en las que el salto hidráulico es superior a los 200 metros de altura. Los caudales desalojados son relativamente pequeños hasta 20 m³/s por máquina.

Se encuentran situadas en zonas de alta montaña, y aprovechan el agua de torrentes, por medio de conducciones de gran longitud. Utilizan turbinas Pelton y Francis.

⁽⁶⁾ COLECCIÓN CEAC Centrales Hidroeléctricas, Pág. 321

2.4.2.- Centrales de Media Presión

Son aquellas que poseen saltos hidráulicos de 20 y 200 m aproximadamente. Utilizan caudales de 200 m³/s por turbina, generalmente están situadas en valles de media montaña y dependen de embalses.

Las turbinas son Francis y Kaplan, y en ocasiones Pelton para saltos grandes.

2.4.3.- Centrales de Baja Presión

Sus saltos hidráulicos son inferiores a 20 m. Cada máquina se alimenta de un caudal que puede superar los 300 m³/s. Además las turbinas utilizadas son de tipo Francis y especialmente Kaplan.

2.4.4.- Centrales de Agua Corriente

Se construyen en los lugares en que la energía hidráulica debe ser utilizada en el instante en que se dispone de ella, para accionar las turbinas hidráulicas. No cuentan prácticamente con reserva de agua, oscilando el caudal suministrado según las estaciones del año.

2.4.5.- Centrales de Agua Embalsada

Se alimenta del agua de grandes lagos o de pantanos artificiales, conseguidos mediante la construcción de presas. El embalse es capaz de almacenar los caudales de los ríos afluentes. Esta agua es utilizada según la demanda, a través de conductos que la encauzan hacia las turbinas.

2.4.6.- Centrales de Regulación

Tienen la posibilidad de almacenar volúmenes de agua en el embalse, que representan periodos más o menos prolongados de aportes de caudales medios anuales.

Prestan un gran servicio en situaciones de bajos caudales, ya que el almacenamiento es continuo, regulando de modo conveniente para la producción.

2.4.7.- Centrales de Bombeo

Acumulan caudal mediante bombeo, con lo que su actuación consiste en acumular energía potencial. Pueden ser de dos tipos, de turbina y bomba, o de turbina reversible.

2.5.- Pequeñas centrales Hidroeléctricas

Los sistemas de microgeneración son una pequeña contribución en el suministro a la red, particularmente en el rango de 300 KW a 10 MW [2]. Algunas veces los valores extremos de este rango suelen recibir el nombre de generación a pequeña escala. Los sistemas de picogeneración no suministran energía eléctrica a las redes nacionales. Se usan en áreas apartadas, en algunos casos dan energía a ciertas industrias alejadas. Su rango de potencia varía desde 200 W, suficiente para la provisión de iluminación doméstica o un grupo de casas mediante un sistema de carga de baterías, hasta 300 KW; éste último se usa en pequeños talleres y para el abastecimiento de una mini red de energía.

Una Picocentral está dentro de las tecnologías alternativas de generación eléctrica ya que su diseño y construcción ocasionan bajos impactos ambientales.

2.5.1.- Clasificación de los Sistemas en Picohidráulica:

Minicentrales: $300 \text{ kW} < X < 10 \text{ MW}$

Microcentrales: $30 \text{ kW} < X < 300 \text{ kW}$

Picocentrales: $200 \text{ W} < X < 30 \text{ kW}$

2.5.2.- Tipos de sistema empleado en la captación de agua

2.5.2.1.- Derivación ⁽⁷⁾

- No detiene al caudal del río
- Desvía parte del caudal a un canal y una tubería
- La gran mayoría de los sistemas son de este tipo

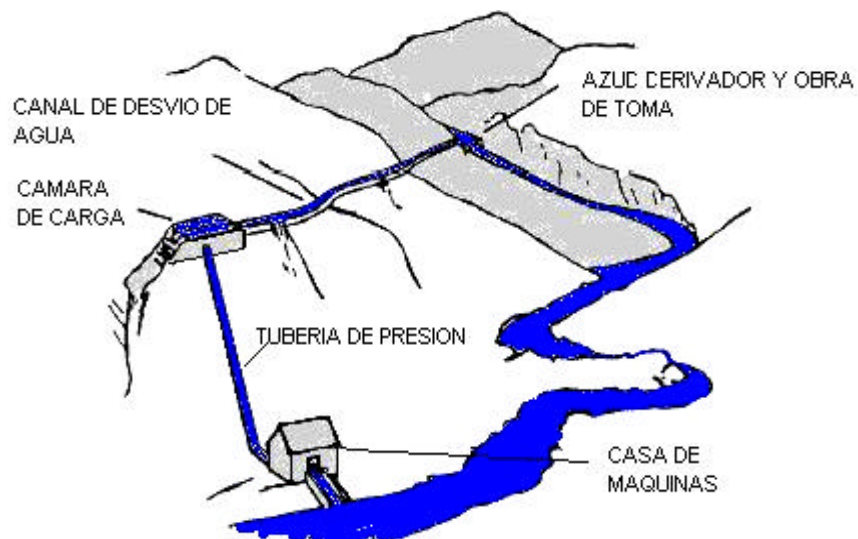


Figura # 2.7 Microcentral de derivación

2.5.2.2.- De Embalse

- Hace uso de un dique para detener el caudal del río, formándose un reservorio.

⁽⁷⁾ INTERMEDIATE TECHNOLOGY DEVELOPMENT GROUP ITDG PERÚ – OLADE. Manual de Mini y Microcentrales Hidráulicas (Guía para desarrollo y proyectos) Pág. 56

- A partir del reservorio toma el agua hacia la turbina.



Figura # 2.8 Microcentral de embalse

2.5.3.- Partes Principales de una Picocentral hidro

La **Figura # 2.9** nos muestra los componentes principales de un sistema típico de microgeneración:

Toma: abertura al costado del río.

Azud: Desvía el caudal de agua.

Desarenador: Separa las partículas de arena del agua.

Canal: Trayectoria forzada del río, que sigue los contornos del cerro con el fin de mantener la elevación del agua derivada.

Cámara de carga: Depósito donde ingresa el agua para ser acumulada.

Tubería presión: Conducto por donde fluye el agua a presión desde la cámara de carga a la turbina

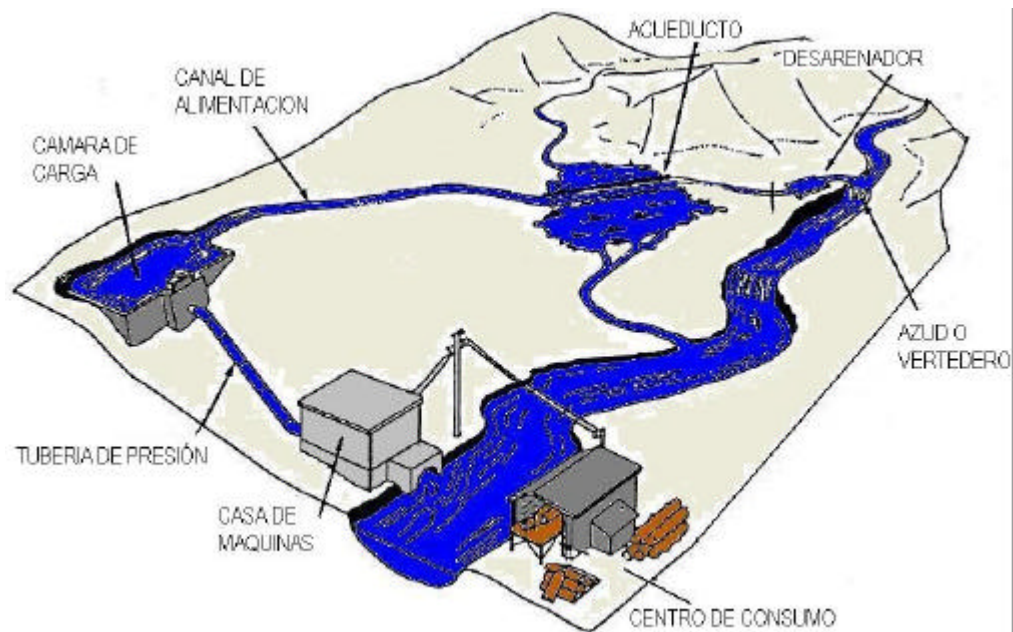


Figura # 2.9

Casa de máquinas: se encuentra conformada por: (Ver Figura # 2.10)

Turbina: Motor hidráulico que convierte la energía del agua (salto y caudal) en energía mecánica.

Regulador de velocidad: Servomecanismo que mantiene constante la velocidad de giro de la turbina y consecuentemente la frecuencia de la energía eléctrica generada.

Generador: Máquina eléctrica que convierte la energía mecánica en el eje en energía eléctrica.

Regulador de voltaje: Sistema electrónico que mantiene el voltaje generado a un nivel constante.

Transformador: Equipo eléctrico utilizado para voltaje que permite el transporte de energía a distancias requeridas.

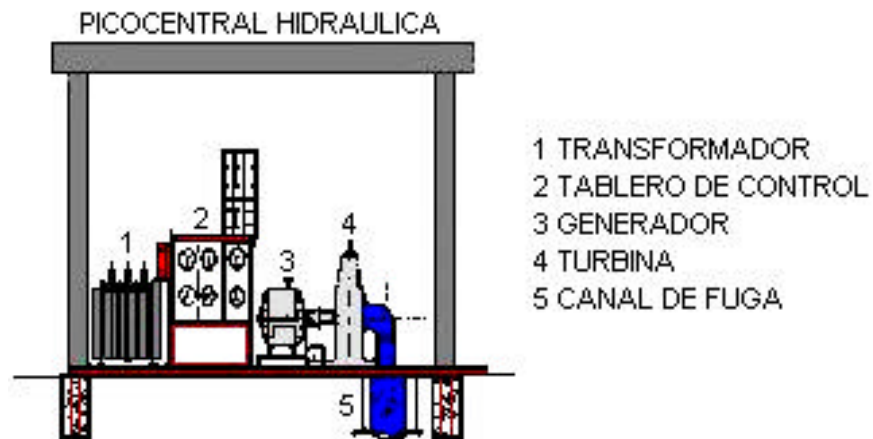


Figura # 2.10

2.6.- El Generador

La potencia mecánica proveniente de la turbina es trasladada al generador por medio de algún acoplamiento directo o indirecto y así conjuntamente, producen energía eléctrica.

2.6.1.- Tipos de Generadores empleados en Sistemas de Picogeneración

Dentro de la Picogeneración hidráulica existen los siguientes tipos de generadores:

- Generadores Síncrono, 2f, 3f, 60 Hz, CA, 110V / 220 V
- Generadores de Inducción o asíncronico, 2f, 3f, 60 Hz , CA, 110V / 220 V
- Generador Automotriz CC 12V / 24 V / 48V.

2.6.1.1.- Generador Síncrono

El generador síncrono es la máquina de uso prioritario en las unidades de generación. Con el tiempo ha tenido una gran evolución en su análisis, magnitud de potencia, y métodos de enfriamiento; sin embargo

la estructura básica sigue siendo la misma que fue introducida en el siglo pasado ⁽⁸⁾

El generador síncrono tiene el bobinado de campo excitado por corriente CD y la tensión desarrollada de la armadura es alterna, de ahí que también se denomina alternador. (Figura # 2.11)

La frecuencia de la tensión de salida es la sincrónica, la forma de onda puede tomarse como senoidal y por acomodo de las bobinas de armadura dará lugar a una o más fases.

La velocidad de giro de la máquina, permanece invariable y origina en la corriente alterna la frecuencia síncrona normalizada. Las frecuencias normalizadas son 50 Hz y 60 Hz., las velocidades sincrónicas deducibles de la frecuencia f y el número de polos p de la máquina.

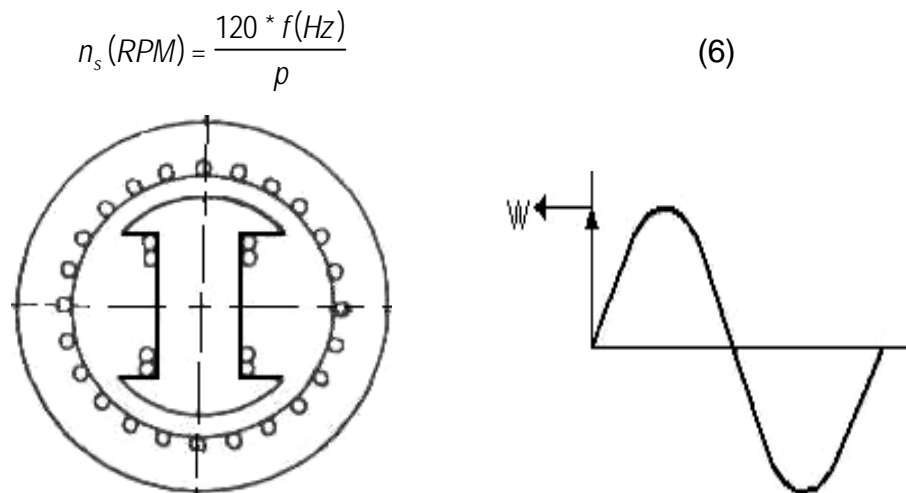


Figura # 2.11

⁽⁸⁾ **INTERMEDIATE TECHNOLOGY DEVELOPMENT GROUP ITDG PERÚ – OLADE.** Manual de Mini y Microcentrales Hidráulicas (Guía para desarrollo y proyectos) Pág. 185 – 190 - 197

2.6.1.2.- Generadores de Inducción o asincrónico

El generador de inducción es conocido desde los años 20, cuando se observó que estos permanecían con tensión de bornes (generando) después de cortarles la alimentación y continuar girando. Este tipo de generador ha venido a constituir una buena alternativa para pequeños aprovechamientos, no solo hidráulicos.

El motor de inducción se convierte en generador cuando el deslizamiento se hace negativo, es decir, cuando a la máquina se le acopla un elemento motriz como una turbina hidráulica que gire a una velocidad ligeramente mayor que la sincrónica. Eso causa que la potencia mecánica se convierta en potencia eléctrica activa que fluirá de retorno a la red alimentadora.

Esta conformada por la armadura, que es el estator semejante al de un alternador. También tenía rotor, en el cual el bobinado está formado por barras de cobre o aluminio cortocircuitadas entre sí.

2.6.1.3.- Principio de funcionamiento del Alternador DC

El generador de CA es esencialmente una espira que gira dentro de un campo magnético. Al ser cortado el campo magnético por la espira, se genera en ella una tensión alterna (Figura # 2.12a), ⁽⁹⁾

El alternador funciona conforme al principio de que se genera corriente eléctrica en un alambre, siempre que este cruza un campo magnético. El alternador tiene como campo un electroimán, excitado por una pequeña cantidad de corriente del acumulador batería, la cual llega al electro imán por medio de los anillos colectores, situados en la flecha del alternador. Cuando el motor hace girar el electroimán, se intercepta

⁽⁹⁾ PÁGINA ELECTRÓNICA AUTOMECANICO.COM www.automecanico.com

el campo con el cuadro externo de alambre, y la corriente circula por éste, primero en un sentido y luego en el otro, tal como se observa en la (Figura # 2.12b)

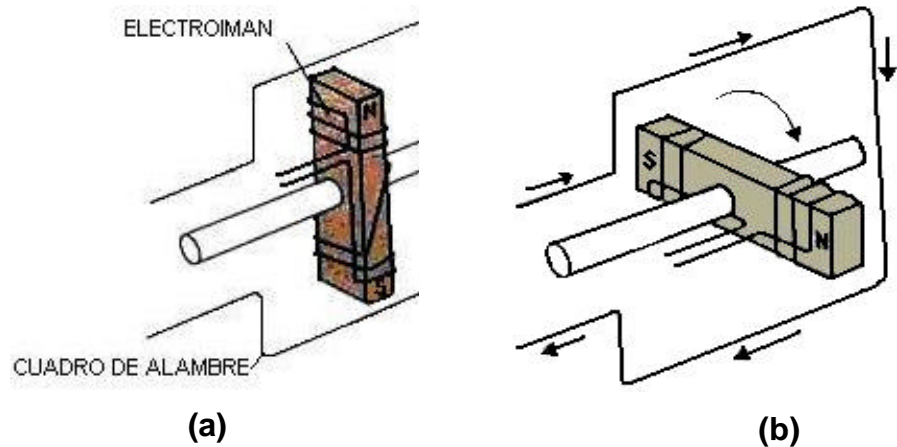


Figura # 2.12

Partes de un Alternador Automotriz

(Ver Figura # 2.13)

- 1.- Los diodos, convierten la CA en CD
- 2.- Bobinas del estator, donde se origina la corriente
- 3.- Núcleo del estator
- 4.- Bobinado del rotor
- 5.- Rotor (campo magnético)
- 6.- Polea impulsada por el motor con una banda y ventilador para enfriar el alternador
- 7.- Estructura
- 8.- Anillos colectores, transmiten la corriente al embobinado, del rotor, para mantenerlo magnetizado
- 9.- Escobillas, [carbones, brochas cepillos]; abastecen de corriente a los anillos colectores

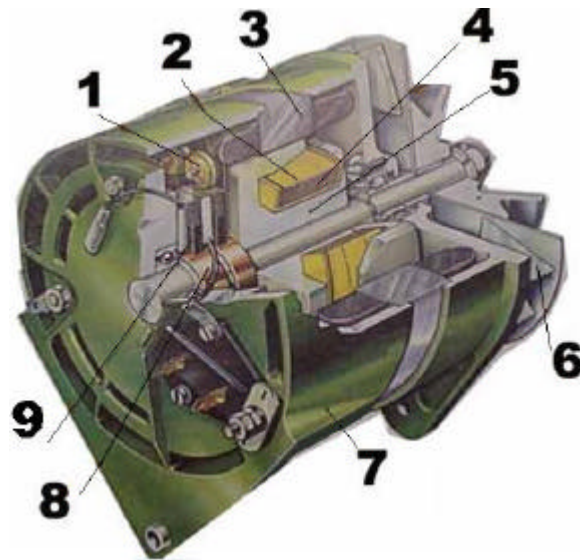


Figura # 2.13

Bobina fija del alternador (Figura # 2.14), llamada estator interceptan el campo magnético rotatorio, generado por el rotor, esta intercepción, se intensifica con un núcleo cilíndrico de hierro dulce laminado.

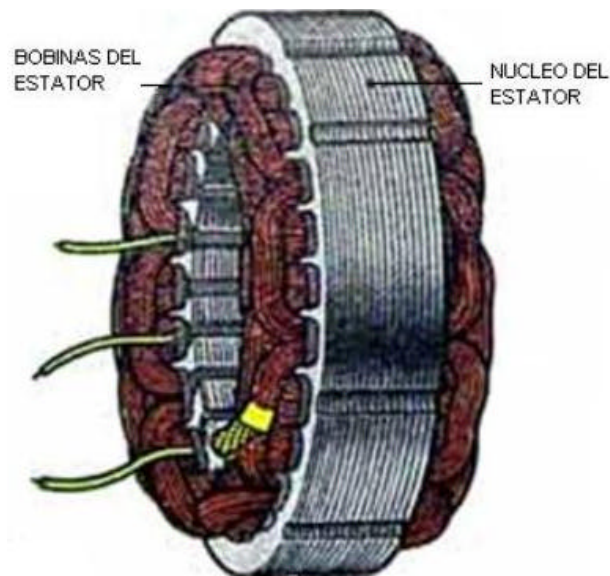


Figura # 2.14

Regulador

El alternador genera corriente, pero si debe tomar en cuenta, que las revoluciones del motor suben y bajan. A más revoluciones de motor se

eleva la corriente, por esta razón un alternador debe tener un sistema que lo estabilice, a esto se le llama regulador. Existen alternadores con regulador incorporado, y otros con el regulador aparte, ver Figura #2.15.

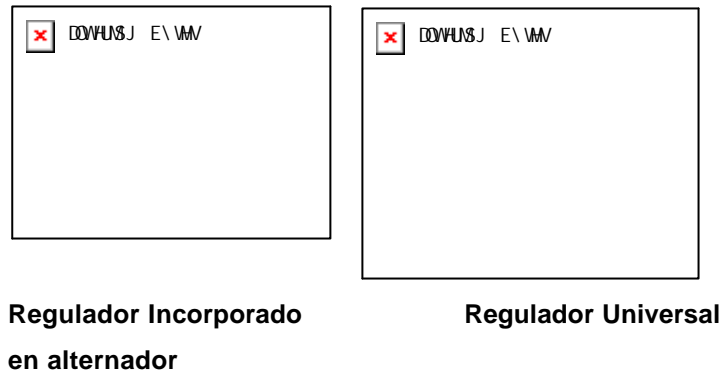


Figura # 2.15

Diodo Rectificador

El nombre de alterna le viene debido a que fluye alternativamente en ambos sentidos; pero debido a que no se necesita este tipo de corriente CA, se debe convertir a corriente directa, mediante diodos semiconductores hechos de silicio, y colocados dentro de la cubierta del alternador, ver Figura # 2.16.

Pero el puente rectificador es el más empleado por tener 6 diodos, este diseño simplifica la operación de cambiar diodos, y la forma de evitar el calentamiento de estos.

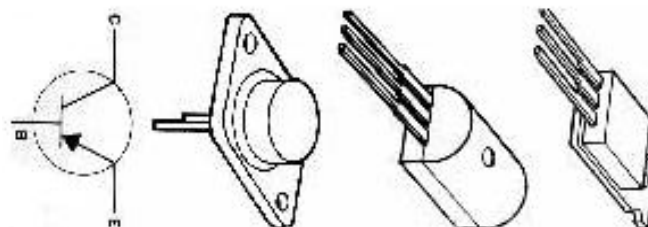


Figura # 2.16

2.6.1.4.- Ventajas y desventajas entre alternador AC y alternador automotriz DC

Alternador Automotriz DC

Ventajas ⁽¹⁰⁾:

- Sus costos son relativamente bajos.
- Se consiguen fácilmente.
- Buena eficiencia a baja velocidad.
- No se tiene en este tipo de alternador el problema del control de la frecuencia, como en los de CA.
- Se considera sistemas sencillos que no requieren mucho mantenimiento.
- Se suprime la parte más compleja del control de la frecuencia, por medio de servomotores o de control por medio de elementos mecánicos.
- La energía puede ser acumulada en baterías y entonces con el inversor se puede usar una potencia mayor que de la turbina. En éste caso se usa la potencia de la turbina, más la potencia de las baterías. La potencia máxima es la del inversor, obviamente no se genera más energía con el sistema continuo, pero se presta más servicio, porque se puede atender mayores picos de consumo.
 - El impacto ambiental es menor, porque se instala una turbina más pequeña, que "consume" menos agua.
 - La regulación y mantenimiento por lo general son más fáciles.
 - El costo del sistema es muchas veces menor que el de una microcentral con generación alterna.
 - Se puede conectar el generador en forma directa, sin pérdidas de transmisión mecánica.

⁽¹⁰⁾ PÁGINA ELECTRÓNICA www.codeso.com/mche1.html

Desventajas

- Poca potencia de generación
- Mínima cantidad de suministro de energía, solo para ciertas horas de uso.
- Las microcentrales con generación de corriente continua DC deben tener una red pública o privada de corriente alterna AC, un inversor en la potencia máxima del consumo y muchas veces necesitan también un banco de baterías como carga y respaldo.
- El manejo de corrientes mayores de 500 VA DC necesita tecnología avanzada.

Alternadores AC

Ventajas ⁽¹¹⁾:

- Grandes potencias de generación
- Largas horas de funcionamiento
- Mayor cantidad de suministro de energía a las viviendas
- Existen alternadores de tres fases con grandes eficiencias y aprovechan mejor el espacio disponible.
- Los alternadores pueden ser modificados para generar electricidad a menores velocidades de rotación rebobinando las bobinas con más vueltas y un alambre más delgado.
- Pueden generar la energía directamente apta para la conexión a redes públicas.
- Trabajan directamente con transformadores en redes públicas o redes privadas (tipo isla).

⁽¹¹⁾ PÁGINA ELECTRÓNICA www.codeso.com/mche1.html

Desventajas:

- Con generación de corriente alterna se debe tener una regulación exacta, para cumplir con la frecuencia y otros aspectos técnicos de la red.
- En instalaciones privadas tienen que generar una potencia mayor que el consumo máximo previsto.
- Son generalmente más grandes y costosos.

CAPITULO III SELECCIÓN Y DISEÑO

3.1.- Datos Técnicos

3.1.1.- Altura Bruta

El aprovechamiento de los saltos o caídas de las masas de agua, producidas por los desniveles existentes en los cauces por donde aquellas discurren, tiene lugar, no por la velocidad de esta, sino por la presión que puede obtenerse al descender las mismas para obtener de esta manera en su caída el trabajo aprovechable. A esta altura se la conoce como altura bruta o altura geodesia (H_b) y puede ser determinada de varias formas.

Por lo general el desnivel requerido para un proyecto pico hidro debe ser por lo menos 20 metros de desnivel en adelante. Los métodos que presentan mayor precisión en la medida del salto son:

- **Método del Altimetro**
- **Método del GPS**

Método del Altimetro.- el altímetro mide la presión atmosférica, la cual está directamente relacionada con la altura sobre el nivel del mar, aunque varía ligeramente debido al clima, la temperatura y la humedad relativa.

El altímetro es un barómetro que, como tal, es sensible a las variaciones de presión atmosférica; en vez de graduarlo en mm de mercurio, Hg, se lo gradúa en metros o pies de columna de agua.

Como estas variaciones pueden ser muy significativas para la evaluación del salto, a fin de obtener resultados aceptables es necesario tomar varias lecturas durante el día y luego estimar el valor final.

El altímetro fue el primer instrumento empleado para medir la altura y el que se disponía tenía una escala de variación de algunos metros, se realizó algunas mediciones durante el día y los resultados presentados por este fueron algunos.

Método del GPS.- el GPS es un instrumento de medida mediante el cual se puede saber la ubicación exacta en la tierra de algún sitio o persona, mediante la triangulación de los satélites.

Realizando un promedio entre la medición obtenida por el altímetro con la del GPS, el resultado fue de 20 m y será este, el valor de altura bruta que se utilizará para el diseño de la turbina y demás parámetros de diseño.

3.1.2.- Caudal Disponible

La precisión con la cual se debe medir el caudal, depende del proyecto y los estimados del desnivel disponible en el sitio, ayudan a determinar el caudal requerido. En muchos casos, el caudal disponible será más que suficiente para el proyecto, visto que los caudales requeridos para las pico hidro son pequeños. El tiempo más crítico del año es hacia finales de la temporada seca, cuando no haya caído lluvia. Este es el mejor momento para medir el caudal. La gente del lugar puede decir si el nivel del agua en el arroyo es típico para esa temporada del año, y pueden ayudar a quien esté realizando el levantamiento del sitio en estimar los caudales en otras temporadas del año. Más adelante se mencionará tres métodos de medición de caudal apropiados para medir caudales pequeños (menores de 50 litros por segundo).

En razón de que el caudal de los ríos varía a lo largo del año, y no se tiene información hidrológica del lugar, se ha visto forzado que para el proyecto se debe recolectar datos propios a partir de mediciones instantáneas del caudal.

El caudal disponible para la selección de la turbina proviene del agua turbinada que viene de la Central Illuchi 1, la cual es desviada del tanque de presión de la Central Illuchi 2 para servicio de la comunidad de la cual se absorbe cierta cantidad de agua para posteriormente ser acumulada en un pequeño tanque de presión para efectos de refrigeración de la Central Illuchi 2. En este último tanque se tiene un vertedero de donde cae una cantidad de agua que es finalmente utilizada en este proyecto.

Existen algunos métodos para determinar el caudal como son:

- Método del vertedero
- Método del flotador
- Método del caudal de aforo.

Dadas las condiciones del lugar en donde se instalará la turbina a construir, resulta prácticamente imposible instalar un instrumento de flotador y el caudal disponible es tan pequeño que con un vertedero no se podría apreciar la diferencia de altura que se produce en el mismo, se ha empleado el método del caudal de aforo (Ver Figura # 3.17) el cual resulta muy práctico para estas condiciones, este consiste en desviar todo el caudal existente hacia un recipiente de capacidad conocida que puede ser un balde o un barril y por medio de un cronómetro se observa y se anota el tiempo que toma en llenarlo,⁽¹²⁾.

Como la capacidad del recipiente se conoce, el caudal se obtiene simplemente dividiendo este volumen por el tiempo de llenado. La desventaja de éste método es que todo el caudal debe ser canalizado o entubado al envase.

⁽¹²⁾ **PÁGINA ELECTRONICA** Esquemas para PICO HIDRO Colombia archivo PDF

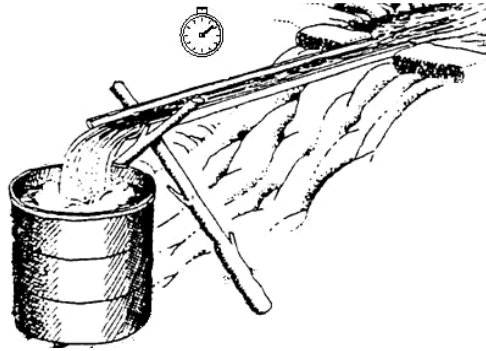


Figura # 3.17 Medida del caudal usando un Barril de capacidad conocida.

Estos resultados se presentan en la tabla:

Tabla # 3 Mediciones del caudal de aforo durante un año

Mes	Caudal (lt/Sg)
Febrero/2004	8,19
Marzo/2004	8,17
Abril/2004	8,18
Mayo /2004	8,15
Junio/2004	8,14
Julio/2004	8,16
Agosto/2004	8,14
Septiembre/ 2004	8,16
Octubre/2004	8,14
Noviembre / 2004	8,15
Diciembre / 2004	8,17
Enero/2005	8,19

Se puede observar las variaciones del caudal de las vertientes en el año que es poco significativo para la operación de la turbina, lo cual proporciona seguridad del recurso hídrico para la generación eléctrica. El caudal que se tomará para el diseño de la turbina Pelton será el caudal mínimo, en este caso 8,14 lt/Sg.

3.1.3.- Altura Neta.

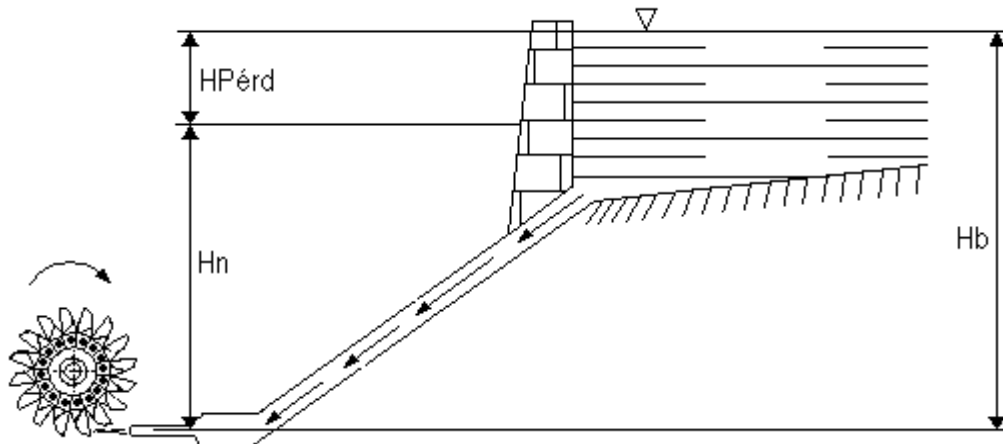


Figura # 3.18 Altura neta aprovechada en la turbina.

La altura neta (H_n) es aquella energía aprovechada en forma de presión y resulta del cálculo entre la altura bruta menos las pérdidas ($H_{pérd}$) que se producen en la tubería de presión y demás accesorios.

Para el cálculo de la altura neta utilizamos la siguiente ecuación:

$$H_n = H_b - H_{pérd} \quad (6)$$

Donde:

H_b = Altura bruta o disponible (20 metros).

$H_{pérd}$ = Término que incluye a las pérdidas principales y secundarias.

$$H_{pérd} = H_P + H_S \quad (7)$$

H_P = Pérdidas principales ocurridas en la tubería (m).

H_S = Pérdidas secundarias ocurridas por los accesorios en la tubería (m).

La longitud de la tubería medida desde el punto más alto hasta donde será instalada la turbina es de 50 metros, esto se realizó por medio de un

camino por donde irá instalada la misma y tomando la medida con el GPS.

El diámetro aproximado de la tubería de presión que se utilizará, se calcula con la siguiente expresión ⁽¹³⁾:

$$D = 0,35 \sqrt[5]{\frac{Q^2 L}{H_b}} \quad (8)$$

D = diámetro de la tubería de presión (m)

Q = caudal (m³/ Sg)

L = longitud de tubería en (m)

H_b = Altura bruta (m)

Al reemplazar los datos técnicos en la ecuación anterior (8), tenemos los siguientes resultados:

$$D = 0,35 \sqrt[5]{\frac{(6,4 \times 10^{-3})^2 50m}{20m}} = 0,047 \sim 5cm$$

Con este valor se escoge la tubería comercial de tubería de 2 pulgadas para el cálculo de la altura neta.

Las pérdidas primarias se calculan con la ecuación de DARCY – WESIBACH ⁽¹⁴⁾:

$$H_p = ? \frac{L * V^2}{2Dg} \quad (9)$$

Donde:

? = Coeficiente de pérdida primaria

L = longitud de tubería (m)

⁽¹³⁾ KIDDER – PARKER Manual del arquitecto y del constructor. Editorial Hispanoamericana. Decimoctava edición, México, 1998, Pág. 112

⁽¹⁴⁾ Mecánica de Fluidos de MOTT Cuarta edición México – Editorial Prentice Hall, 1996.

V = velocidad del agua en la tubería (m/Sg)

D = Diámetro de la tubería (m)

g = gravedad de la tierra (9,81 m/Sg)

Las pérdidas secundarias se calculan de la siguiente manera utilizando la ecuación:

$$H_s = K * \frac{V^2}{2g} \quad (10)$$

K = Coeficiente de perdida secundaria

Estas pérdidas se producen en los siguientes accesorios indicándose en cada uno su coeficiente de pérdida ⁽¹⁵⁾:

Dos válvulas de compuerta $K_1 = 0,15$ (Ver Anexo 1.1)

Reemplazando las ecuaciones (9) y (10) en la ecuación (7) se tiene:

$$H_{pérd} = \left[? * \frac{L}{D} + ? * K_n \right] \frac{V^2}{2g} \quad (11)$$

De la ecuación de continuidad de tiene:

$$Q = A * V \quad (12)$$

A = Área de la sección transversal de la tubería

Para una tubería de sección trasversal circular el área está dada por ecuación:

$$A = p \frac{D^2}{4} \quad (13)$$

⁽¹⁵⁾ Catalogo de la Goulds – GPM 6

Reemplazando (13) en la ecuación (12) y despejando la velocidad se tiene lo siguiente:

$$V = 4 * \frac{Q}{\rho D^2} \quad (14)$$

Por lo tanto la ecuación de Altura neta queda de la siguiente manera, reemplazando en (6):

$$H_n = H_b - \left[f * \frac{L}{D} + \sum_1^n K_n \right] \frac{V^2}{2g} \quad (15)$$

Para poder calcular la altura neta con la ecuación (15) es necesario calcular el factor de pérdida primaria f el cual su valor se lee en el diagrama de MOODY mediante el número de REYNOLDS.

El número de REYNOLDS (R_e) se calcula con la siguiente ecuación ⁽¹⁶⁾:

$$R_e = V * \frac{D}{\nu} \quad (16)$$

ν = viscosidad cinemática del agua

La temperatura del agua en Illuchi se midió con un termómetro y la misma se mantenía en un promedio de 5 °C, de modo que el valor de la viscosidad cinemática y para esta temperatura es de $1,52 \times 10^{-6}$, (Ver Anexo 1.2)

Con todo lo determinado se tiene los siguientes datos técnicos:

$H_b = 20$ m

⁽¹⁶⁾ C MATAIX. Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas. ED Castillo, Madrid, 1970, Pág. 465 – 471.

$L = 50 \text{ m}$ (Longitud de tubería en la pendiente)

$Q = 8 \text{ lt /Sg}$ se toma solo el 80 % de el caudal siendo 6.4 lt /Sg

$g = 9,81 \text{ m/Sg}^2$

$K_{vcomp} = 0,15$ (son 2 válvulas de compuerta = $0,30$ (Ver Anexo 1.1)

Temperatura del agua de $5 \text{ }^\circ\text{C}$, por lo tanto la viscosidad es $\nu = 1,52 \times 10^{-6}$ (Ver Anexo 1.2)

Tubería de presión de 2 pulgadas (manguera Flexible) (Ver Anexo 1.3, características de manguera plastigama)

$D_{\text{exter}} = 2 \text{ ''}$

$D_i = 52,5 \text{ mm}$

$e = 9,56 \text{ mm}$

Presión de Trabajo = 64 PSI

Presión de Rotura 3,36 la presión de trabajo

Reemplazando los datos técnicos en la ecuación (14), se tiene

$$V = 4 * \frac{Q}{\rho D^2}$$

$$V = 4 * \frac{6,4 \times 10^{-3} \text{ m}^3 / \text{S}}{\rho (0,0525)^2 \text{ m}} = 2,956 \text{ m / s}$$

$$V = 2,956 \text{ m / s}$$

En la ecuación (16) se encuentra el número de REYNOLDS para posteriormente en el diagrama de MOODY determinar el valor de ?.

$$R_e = V * \frac{D}{\nu}$$

$$R_e = 2,956 * \frac{0,0525 \text{ m} / \text{s}}{1,52 \times 10^{-6} \text{ m}^2 / \text{s}} = 1,02098 \times 10^5$$

Con este valor en el Diagrama de MOODY, se selecciona la condición de tubería lisa con el R_e , para de esta forma encontrar el valor de $f = 0,0175$, (ver Anexo 2).

Para encontrar el valor de altura neta se reemplaza los datos en la ecuación (15):

$$H_n = 20 - \left[0,0175 * \frac{50m}{0,0525m} + 0,30 \right] \frac{2,956^2 (m/s)^2}{2g * 9,81(m/s^2)} = 20 - 7,53 = 12,44m$$

Ubicando la tubería de 2 pulgadas se observa que se pierde mucha altura de presión para vencer las pérdidas en la tubería y accesorios, entonces se realizó un segundo intento para el cálculo de la altura neta utilizando dos mangueras de 2 pulgadas de lo cual arroja los siguientes resultados:

Todos los demás parámetros se mantienen a excepción de lo siguiente:

$$Q = 6.4 \text{ lt /Sg se divide para dos el caudal} = 3,2 \text{ lt /Sg}$$

Reemplazando los datos técnicos en la ecuación (14), se tiene

$$V = 4 * \frac{Q}{\rho D^2}$$

$$V = 4 * \frac{3,2 \times 10^{-3} m^3 / S}{\rho (0,0525)^2 m} = 1,47 m / s$$

$$V = 1,47 \text{ m / s}$$

$$R_e = V * \frac{D}{\nu}$$

$$R_e = 1,47 * \frac{0,0525 m^2 / s}{1,52 \times 10^{-6} m^2 / s} = 5,0773 \times 10^4$$

Por lo tanto $\lambda = 0,0205$ (Ver anexo 2).

Para encontrar el valor de altura neta se reemplaza los datos en la ecuación (15):

$$H_n = 20 - \left[0,0205 * \frac{50m}{0,0525m} + 0,30 \right] \frac{1,47^2 (m/s)^2}{2 * 9,81 (m/s^2)} = 20 - 4,36 = 15,64m$$

Finalmente este será el valor de altura neta a considerar y también el diámetro de la tubería para el diseño del proyecto

3.1.4.- Potencia Neta ⁽¹⁷⁾

P_n es el valor máximo de potencia hidráulica que se dispone para que funcione la turbina. Para determinar este valor se emplea la ecuación (5):

$$P_{neta\ estimada} = \frac{9.8 * h_n * Q * ?}{102}$$

Dando como respuesta lo siguiente:

$$P_{neta\ estimada} = \frac{9.8 * 15,64 * 6,4 * 10^{-3} * 0,7}{102} = 0,68Kw$$

Considerando que se toma un 70 % de eficiencia por razones de construcción.

3.1.5.- Número de Revoluciones

Por lo general las turbinas están conectadas a generadores de CA. La velocidad de la turbina debe concordar con una de las velocidades sincrónicas requeridas por la frecuencia del sistema cuando se halla conectada directamente con el generador, es decir cuando se utiliza sistemas de transmisión, pero esto no tiene ningún inconveniente porque el proyecto estará montado con un alternador automotriz, conociendo que el mismo entregará corriente continua luego de un rectificación.

⁽¹⁷⁾ **INTERMEDIATE TECHNOLOGY DEVELOPMENT GROUP ITDG PERÚ – OLADE.** Manual de Mini y Microcentrales Hidráulicas (Guía para desarrollo y proyectos) Pág. 4 – 5.

El alternador automotriz disponible tiene una velocidad nominal de 1800 RPM y será conectado a la turbina por medio de un sistema de transmisión de bandas, para lo cual se toma una relación de transmisión de 3, de tal manera que la velocidad (N) a la que girará la turbina será:

$$N = \frac{1800}{3} = 600 r.p.m$$

Este valor de velocidad a la cual va girar la turbina se lo ha seleccionado debido a que se acopla y facilita el diseño de la turbina.

3.2.- Justificación de Selección

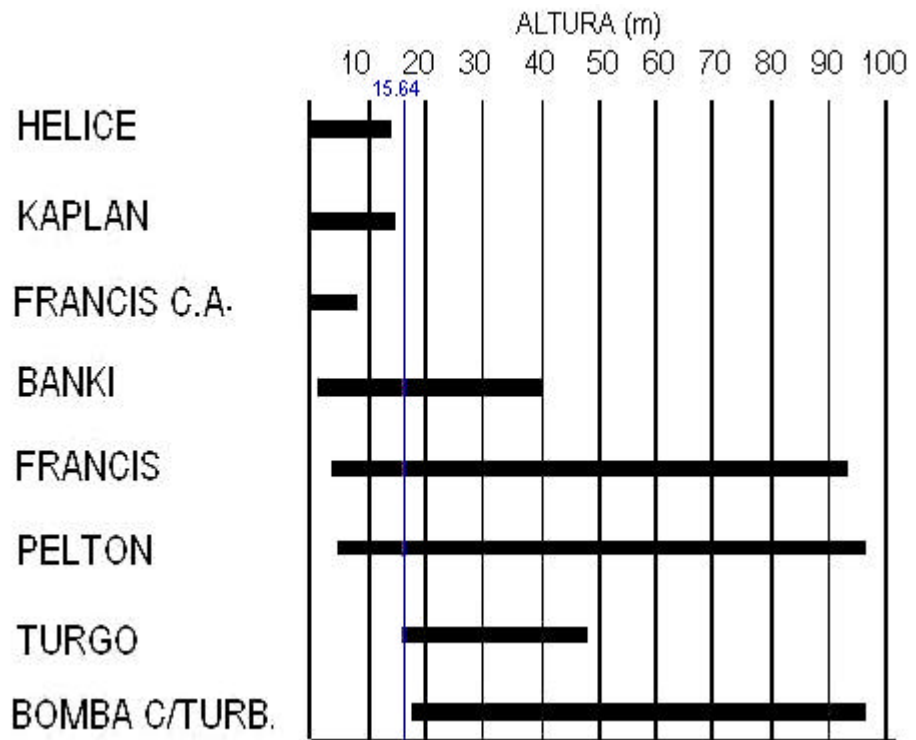
Se pueden establecer como criterios de selección de la turbina hidráulica las siguientes características deseables:

3.2.1.- Rango de operación

Este dato nos da la posibilidad de comparar valores de altura, potencia, caudal, para poder escoger una o más turbinas inicialmente.

La Tabla # 3.1 nos da los rangos de altura en los cuales pueden trabajar las turbinas hidráulicas, en base de los mismos se puede establecer la más adecuada para un proyecto.

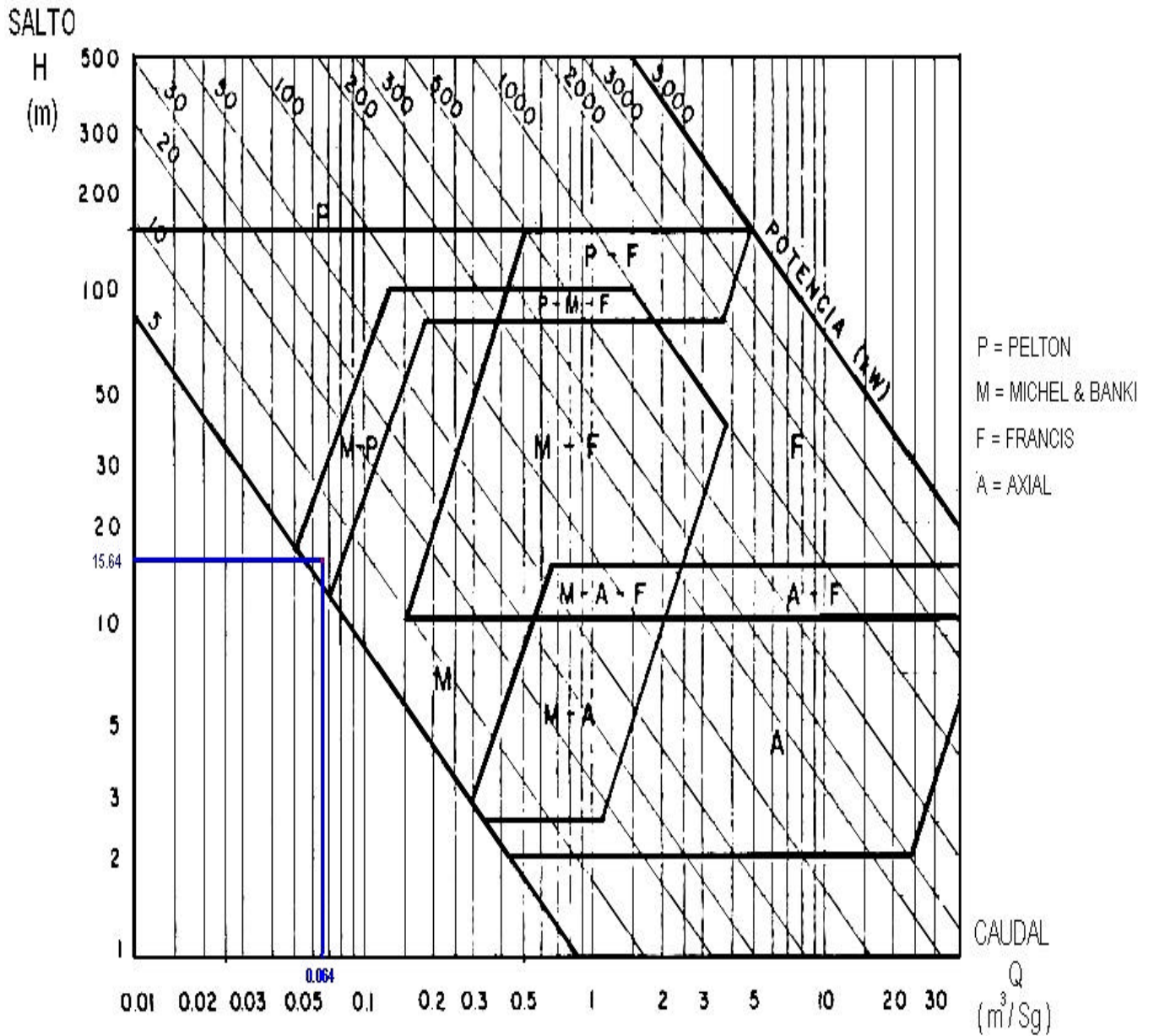
Tabla # 3.1 Rangos de alturas de turbinas



(Fuente de Curso de pequeñas centrales hidroeléctricas L.A.M.H.I) [5-4]

La Tabla # 3.2 muestra el rango de aplicación de las diferentes turbinas considerando datos de caudal y altura en metros, dando como resultado tres tipos de turbinas a utilizar.

Tabla # 3.2 Relación de Altura y Caudal para pico Turbinas

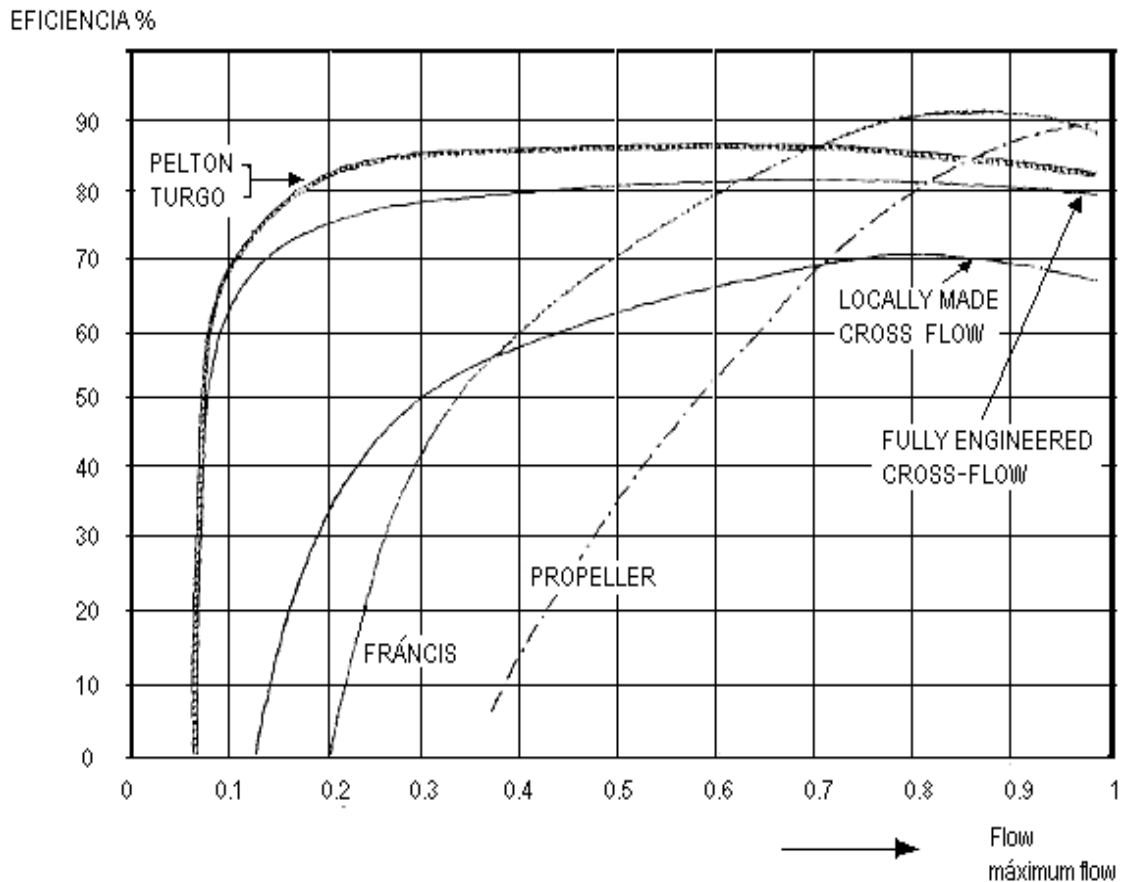


Fuente: Manual de diseño y estandarización del OLADE

3.2.2.- Rendimiento estable

El rendimiento se define como la relación entre la potencia mecánica transmitida al eje de la turbina y la potencia hidráulica correspondiente al caudal y salto nominal.

Tabla # 3.3 Rendimiento teórico de los diferentes tipos de turbinas



Fuente Manual de diseño y estandarización del OLADE [9]

3.2.3 - Facilidad constructiva y otros factores

Desde el punto de vista de requerimiento tecnológico la fabricación en medios locales de las turbinas de acción para rangos de grandes centrales hidroeléctricas son muy costosas y difíciles de fabricar, pero para proyectos de micro y picogeneración se pueden considerar de costo bajo. Las turbinas de reacción general tienen una complejidad grande en la construcción y particularmente un elevado costo.

A continuación se presenta en el siguiente cuadro otras características a considerar en el escogitamiento de turbinas.

Tabla # 3.4 Cuadro comparativo de las Turbinas en relación varios factores

Nombre de turbina	Rango de Desnivel	Costo por 5Kw	Mantenimiento	Daño por partículas en el agua
Pelton	Mediano y alto	Bajo	Sencilla y robusta por ende poco mantenimiento	Poco afectado por partículas de agua
Flujo Cruzado Michel Banki	Mediano y bajo	Bajo / Mediano	Requiere más mantenimiento que la Pelton	Poco afectado por partículas de agua
Turgo	Mediano y alto	Mediano – más complejo que la Pelton	Requiere poco mantenimiento	Poco afectado por partículas de agua
Bomba como Turbina	Mediano y bajo	Bajo	Requiere más mantenimiento que la Pelton	Más afectado por partículas en el agua
Francis	Mediano	Antieconómico para 5 Kw	Mantenimiento más complicado	Inepto para uso con aguas que llevan sedimentos

Fuente Guía para el equipamiento electromecánico de pequeñas instalaciones hidroeléctricas. ICONTEC, [5-1]

3.2.4.- Números Característicos de Revoluciones de caudal N_q y de potencia N_s

Las relaciones entre modelos y el prototipo requieren del establecimiento de las leyes de semejanza (geometría, cinemática y dinámica) de cuyo análisis se obtienen una serie de cifras características. Entre ellas, los llamados números de revoluciones característicos son los que mejor expresan la semejanza entre un modelo y un prototipo:

Estos números son los siguientes:

El número específico de revoluciones de potencia o número de Cramer N_s ⁽¹⁸⁾:

⁽¹⁸⁾ **INTERMEDIATE TECHNOLOGY DEVELOPMENT GROUP ITDG PERÚ – OLADE.** Manual de Mini y Microcentrales Hidráulicas (Guía para desarrollo y proyectos) Pág. 136 - 137

$$N_s = \frac{N\sqrt{P}}{H^{5/4}} \quad (6)$$

Los fabricantes de equipos anuncian el valor N_s de sus turbinas. Gran número de estudios estadísticos sobre aprovechamientos muy diversos, han permitido correlacionar, para cada tipo de turbina, la velocidad específica con la altura de salto neto. Por lo tanto en la Tabla # 3.5 se puede ver la comparación del N_s y altura, expuesta por un fabricante de Suiza.

El número específico de revoluciones de caudal o número de Brauer N_q
(18)

$$N_q = \frac{N\sqrt{Q}}{H^{5/4}} \quad (7)$$

$N_s N_q$ = Número Característico de revoluciones, RPM

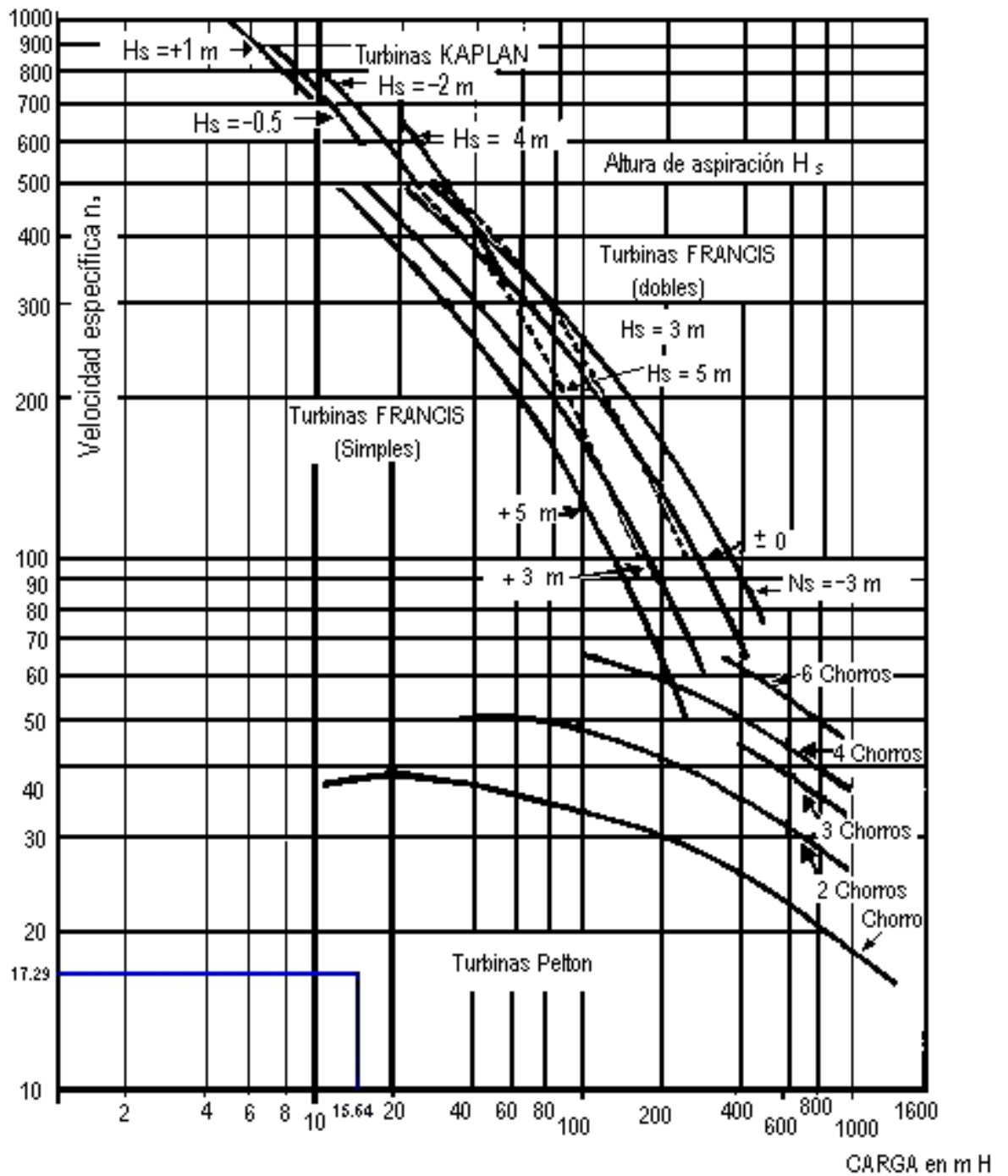
N = Velocidad de rotación de la turbina, RPM

Q = Caudal de la turbina, m^3/Sg

H = Salto neto, M

P = Potencia al eje de la turbina, HP, o KW

Tabla # 3.5 Límites de Velocidad específica (métrico) en función de la carga en m para turbinas Pelton Francis, Kaplan



Fuente: Según Th. Bell. Kriens Lucema, Suiza Lucien Vivier [10]

En pequeñas turbinas el rango de velocidad específica para cada tipo de máquinas se puede tomar como sigue a continuación:

Tabla # 3.6 Números característicos para varias turbinas

TIPO DE TURBINA	N_s	N_q
PELTON DE UN JET	10 a 29	3 a 9
PELTON MULTI JET	29 a 59	9 a 18
BANKI	29 a 220	9 a 68
FRNCIS LENTA	59 a 124	18 a 38
FRANCIS NORMAL	124 a 220	38 a 68
FRANCIS RÁPIDA	220 a 440	68 a 134
HELICE Y KAPLAN	342 a 980	105 a 300

Fuente: Manual del OLADE [9]

3.2.5.- Selección Final de Turbina

Los datos técnicos recopilados en el sector de Illuchi arrojan los siguientes resultados:

$H_b = 20$ m

$Q = 8$ lt /Sg se toma solo el 80 % de el caudal siendo 6.4 lt /Sg

$H_n = 15,64$ m

$N = 600$ RPM

Rango de Operación

De acuerdo a los datos determinados para este proyecto se procede analizar la Tabla #3.1, en donde se puede observar que varias turbinas están en el rango. Ingresando en este grupo:

Francis, Pelton, Turgo, y Michel Banki

Seguidamente se puede comparar en la Tabla # 3.2 la relación de Caudal, altura, en donde se aprecia que son dos las turbinas indicadas en estos valores de altura y caudal; siendo las turbinas Pelton y Michel Banki.

Rendimiento estable

Un punto importante a notar en la Tabla # 3.3 es que las turbinas Pelton Turgo y Banki conservan un buen rendimiento cuando funcionan por debajo del caudal nominal; en contraste la turbina Francis cae en su rendimiento, y las turbinas hélice fijas también tienen bajo rendimiento

Facilidad constructiva y otros factores

La turbina Michel Banki es más fácil fabricar que la Pelton, pero la turbina de doble cuchara es más accesible su construcción respecto a las demás. Según la Tabla # 3.4 se puede ver que el mantenimiento, costo por Kw y daño por partículas en el agua de la turbina Pelton es menor que de la Michel Banki y turbinas de reacción, las mismas que fueron explicadas en el capítulo II.

Números característicos de revoluciones de caudal N_q y de potencia N_s

Los números característicos se determinan aplicando la ecuación 6 y 7 y de lo cual se tiene los siguientes resultados:

$$N_s = \frac{N\sqrt{P}}{H^{5/4}} = \frac{600\sqrt{0,8042}}{15,64^{1,25}} = 17,29$$
$$N_q = \frac{N\sqrt{Q}}{H^{3/4}} = \frac{600\sqrt{6,4 * 10^{-3}}}{15,64^{0,75}} = 6.010$$

Comparando los datos de altura y del N_s en la Tabla # 3.5 se puede decir que la turbina indicada es la pelton de un chorro. Pero para poder dar mayor amplitud a lo especificado se puede comparar con la Tabla # 3.6 con los dos números característicos, dando como resultado turbina Pelton de un Chorro.

Con todo este análisis se puede concluir que la turbina seleccionada ha sido la **Pelton de un Chorro**, por las siguientes características:

- Rango de operación adecuado, ya que las otras turbinas cumplen ciertos datos pero con otros factores se salen de los límites establecidos para su correcto funcionamiento.
- Comparando con la Michel Banki de un rendimiento elevado del 80 %
- La facilidad en la construcción es el único parámetro desfavorable en relación a la Michel Banki pero es superable, por ciertas alternativas de fabricación que sí logran acoplarse a los diseños.
- Siendo los números característicos los más determinantes para la selección y diseño, se puede decir que está dentro del rango de aplicación de la turbina Pelton de un chorro.

3.3.- DISEÑO HIDRÁULICO DE LA TURBINA

El diseño hidráulico se referirá a la geometría y dimensiones que deben tener los elementos de la turbina Pelton, detallándose a continuación cada uno de ellos:

3.3.1.- Velocidad óptima (C_1)

Esta velocidad se refiere a la del chorro del agua a la salida del inyector y a la entrada de la cuchara y está determinada por la fórmula⁽¹⁹⁾:

$$C_1 = K_c \sqrt{2 \cdot g \cdot H_n} \quad (17)$$

K_c = Coeficiente de velocidad el cual puede estar entre 0,97 y 0,98

Reemplazando los datos en la ecuación (17) se tiene:

⁽¹⁹⁾ APUNTES PARA UN MANUAL DE DISEÑO ESTANDARIZACIÓN Y FABRICACIÓN DE EQUIPOS PARA PEQUEÑAS CENTRALES HIDROELECTRICAS – OLADE Volumen II Turbinas Pelton, Pág. 12.

$$C_1 = 0,97 \sqrt{2 * 9,81 * 15,64} = 16,984 \frac{m}{s}$$

En la salida de la cuchara se forma un diagrama de velocidades donde la velocidad tangencial $U_1 = U_2 = U$. (Ver Figura # 3.21 triángulo de velocidades), por lo tanto el valor de U_1 se calcula por medio de la siguiente expresión:

$$U_1 = K_u * C_2 \quad (18)$$

Donde:

K_u = Coeficiente de la velocidad tangencial y su valor varia entre 0,44 y 0,48

C_2 = Es la velocidad absoluta a la entrada de la cuchara y es igual a la velocidad del chorro a la salida del inyector.

Por lo tanto el valor de U_1 se lo calcula con la formula (18).

$$U_1 = 0,48 * 16,984 = 8,152 m/s$$

3.3.2.- Valor de diámetro

Diámetro Primitivo de la turbina

El diámetro primitivo es un valor referencial de diseño el cual es calculado como se indica en la siguiente expresión:

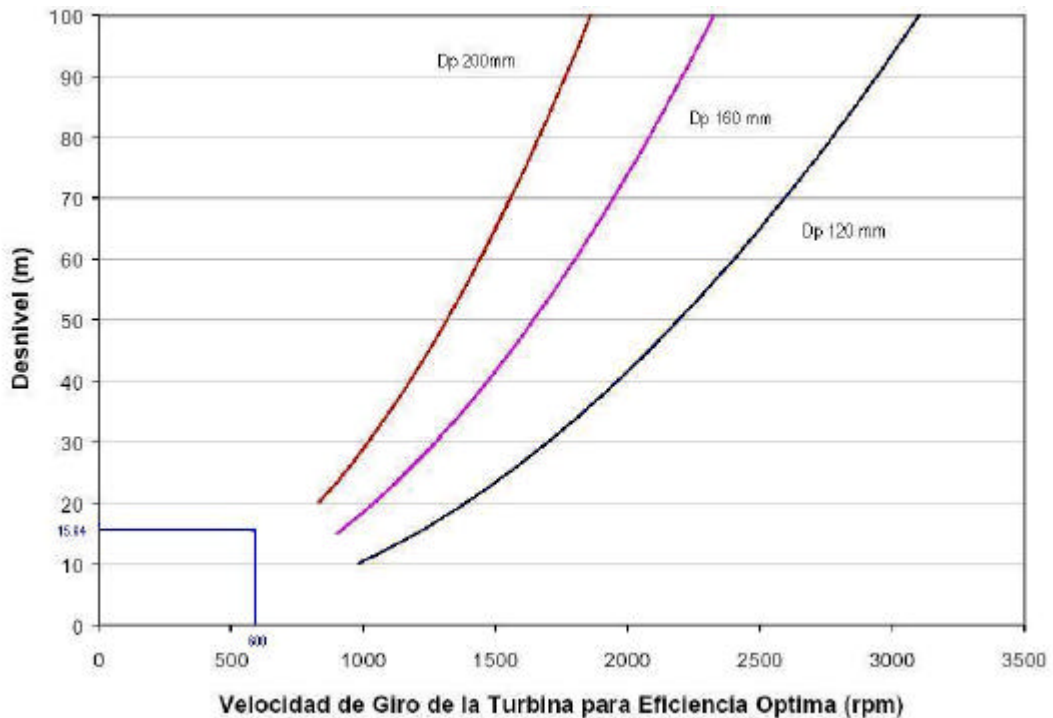
$$D_p = \frac{60 * U_1}{\rho * N} \quad (19)$$

Por lo tanto el diámetro primitivo será calculado por la ecuación (19) con $N = 600$ RPM.

$$D_p = \frac{60 * 8,152}{\rho * 600} = 0,2594m$$

$$D_p = 25,948cm$$

Tabla # 3.7 Comparación de rangos de Dp para microgeneración



Fuente pagina electrónica manual colombiano [5-2]

El tamaño del rodete de la turbina para un sistema pico hidro usualmente es igual o menor de 200mm Dp. Esta distancia se utiliza porque es el punto donde el chorro impacta en las cucharas, y de ella depende la rapidez de giro del rodete. Entre más pequeño el rodete, más rápido va a girar. De acuerdo a la Tabla # 3.7 se puede asegurar con certeza que el valor calculado de D_p está dentro de los rangos permitidos de una pico hidro.

3.3.3.- Sección transversal del Chorro

El calculo de la sección transversal del chorro o la sección de salida en el inyector queda determinada mediante la siguiente ecuación⁽¹⁹⁾:

$$d = \sqrt{\frac{4 * Q}{\rho * C_1}} \quad (20)$$

Por lo tanto quedará calculado el diámetro del chorro en la ecuación (20):

$$d = \sqrt{\frac{4 * 6,4 \times 10^{-3} (m^3 / s)}{\rho * 16,984 (m / s)}} =$$
$$d = 0,0219 m = 21,90 mm$$

El diámetro del chorro quedará establecido en un valor de 22 mm, esto es más que todo para facilidad en el momento de que construya.

3.3.4.- Análisis de velocidades en las palas o cucharas

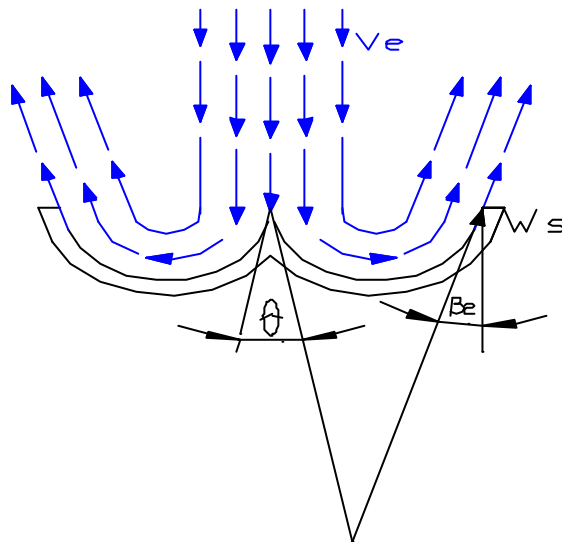


Figura # 3.19 Entrada del chorro de agua y ángulos que forma a su salida de la pala

⁽¹⁹⁾ APUNTES PARA UN MANUAL DE DISEÑO ESTANDARIZACIÓN Y FABRICACIÓN DE EQUIPOS PARA PEQUEÑAS CENTRALES HIDROELECTRICAS – OLADE Volumen II Turbinas Pelton, Pág. 15.

La velocidad periférica y velocidad del chorro tienen la misma dirección. El ángulo de ataque α de la pala oscila entre 16° y 24° , para este diseño se selecciona 18° ⁽²⁰⁾.

El ángulo de descarga β_2 , permite tener una desviación de la vena de agua y evitar que choque con estriados del álabe, lo cual produciría un freno de agua y disminuirá su rendimiento.

El valor de β_2 está entre 12° y 15°

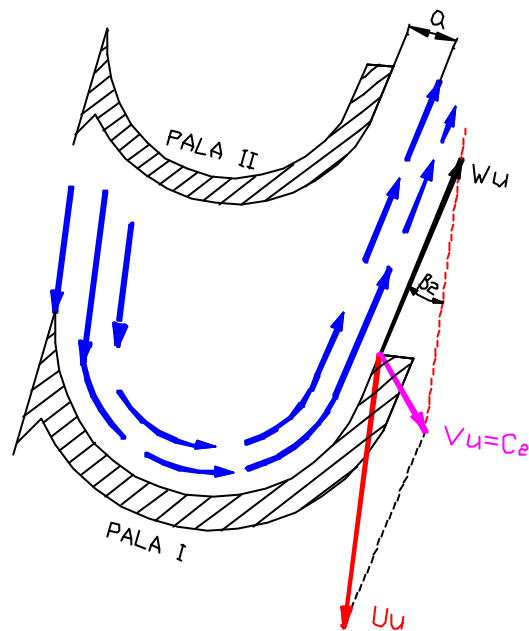


Figura # 3.20 Salida del agua de la pala y relación con la Pala 2

⁽²⁰⁾ Turbomáquinas de Lucien Vivier, Edición Alvin Michel, Paris, 1996, Pág. 350-351

3.3.4.1.- Polígono de Velocidades

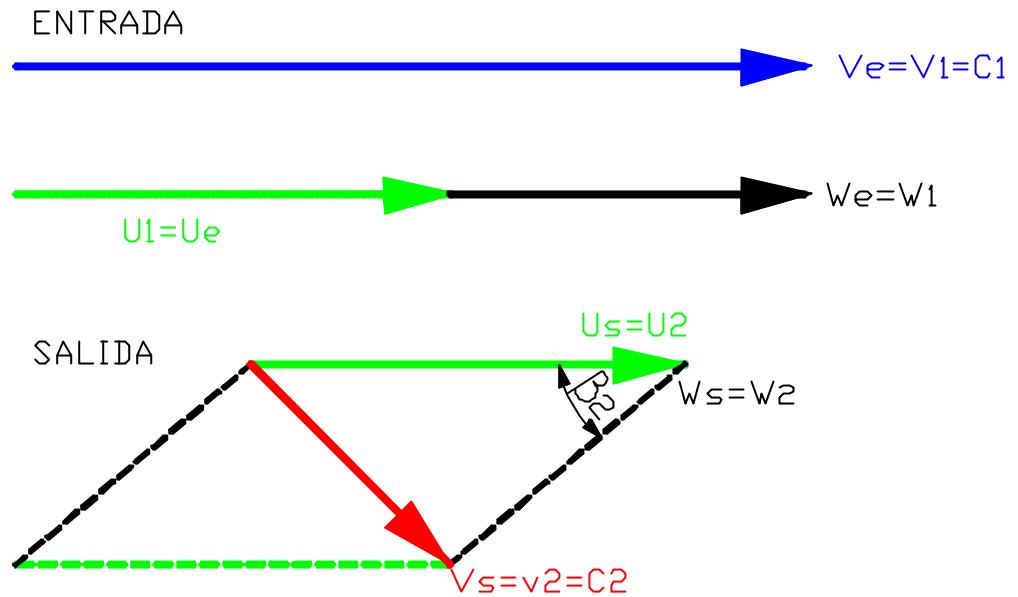


Figura # 3.21 Polígono de velocidades del chorro a la entrada y salida de la cuchara

$$U_1 = U_2 = U \text{ por lo tanto } U \text{ es Constante}$$

De la Figura # 3.19 se forma los polígonos de velocidad y se genera las siguientes expresiones vectoriales:

$$\vec{U}_e + \vec{W}_e = \vec{V}_e \quad (21)$$

Donde:

U_e = Velocidad periférica del chorro en m/s (entrada)

W_e = Velocidad relativa chorro m/s (entrada)

U_e = Velocidad del chorro del agua a la salida del inyector y a la entrada de la cuchara

Las turbinas Pelton, son turbinas tangenciales, por lo tanto U es Constante y en consecuencia $U_e = U_s = U_u = 8,152 \text{ m/s}$, valor calculado anteriormente

La velocidad relativa a la salida es la siguiente:

$W_2 = W_S = W_U$ y este valor final de esta velocidad se le considera multiplicando por el coeficiente ϕ , y este siendo una constante de reducción y que es aproximadamente $\sim 0,97$, según⁽²⁰⁾.

$$W_u = \phi * W_e$$

W_U = Velocidad relativa chorro m/s (salida)

Si se despeja de la ecuación (21) la velocidad relativa se puede encontrar de la siguiente forma:

Pero sabiendo que $V_e = C_1 = 16,99$ m/s y $U_e = 8,152$ m/s, valores calculados anteriormente.

$$W_e = V_e - U_e$$

$$W_e = 16,99 - 8,152 = 8,838 \text{ m/s}$$

$$W_U = W_e * \phi = 0,97 * 8,838 = 8,572 \text{ m/s}$$

$$W_u = 8,572 \text{ m/s}$$

La velocidad absoluta V_u o C_2 a la salida de la cuchara se analiza por medio del triángulo de velocidades y con el ángulo de $\beta_2 = 13^\circ$ seleccionado, se genera la siguiente expresión:

$$U_1 = U_2 = K_p * V_e = 0,45 * 16,99 = 7,645 \text{ m/s}$$

$$U_1 = 7,645 \text{ m/s}$$

Donde K_P es un valor de diseño para la determinación de W_1 , según⁽²⁰⁾.

⁽²⁰⁾ **Turbomáquinas de Lucien Vivier**, Edición Alvin Michel, Paris, 1996, Pág. 350-351

Del polígono de velocidades a la **entrada** vectorialmente se deduce que:

$$W_1 = C_1 - U_1$$

$$W_1 = 16,99 - 7,645 = 9,345 \text{ m/s}$$

$$W_1 = 9,345 \text{ m/s}$$

Del triángulo de velocidades a la **salida** y con $\beta_2 = 13^\circ$:

$$U_1 = U_2 = U_u = 7,645 \text{ m/s}$$

Se puede establecer la siguiente relación y calcular la velocidad relativa a la salida y finalmente la velocidad

$$\cos \beta_2 = \frac{W_2}{U_2}$$

$$W_2 = U_2 \cos 13^\circ = 7,645 * \cos 13^\circ = 7,449 \text{ m/s}$$

$$\text{sen} \beta_2 = \frac{C_2}{W_2}$$

$$V_u = C_2 = W_2 \text{sen} 13^\circ = 7,449 * \text{sen} 13^\circ = 1,675 \text{ m/s}$$

3.3.5.- Cálculo de la altura teórica

Según ⁽²¹⁾ para el cálculo de la altura teórica se encuentra con la fórmula indicada a continuación:

$$H_u = \frac{(U_1^2 - U_2^2 + W_2^2 - W_1^2 + C_1^2 - C_2^2)}{2g} \quad (22)$$

(21) C MATAIX. Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas. ED Castillo, Madrid, 1970, 465 – 471.

Por ser la turbina seleccionada de flujo tangencial $U_1 = U_2 = U_u =$ Constante, y que solo los siguientes factores se calculan:

$$H_u = \frac{(0 + W_2^2 - W_1^2 + C_1^2 - C_2^2)}{2g}$$

$$H_u = \frac{(0 + 7,449^2 - 9,345^2 + 16,99^2 - 1,675^2)}{2g} = 12,946m$$

Con este valor se puede determinar el rendimiento teórico, el cual da una orientación clara de que todo el proceso de cálculos se los ha elaborado correctamente.

$$\eta_{TEÓRICO} = \frac{H_u}{H_n} * 100\% \quad (23)$$

Reemplazando los valores de altura en la ecuación (23) se puede encontrar el rendimiento teórico del diseño.

$$\eta_{TEÓRICO} = \frac{12,946}{15,64} * 100\% = 82,77\%$$

Indicando que es un rendimiento optimo de energía que se va a transformar para generar movimiento del 82,77%.

3.3.6.- Dimensionamiento de cucharas pelton en función del diámetro del chorro

El dimensionamiento de los álabes o cucharas son proporcionales al diámetro del chorro, estos se conforman por dos semielipsoides que forman una arista o nervio que divide al chorro de agua en dos partes, ver Figura # 3.23.

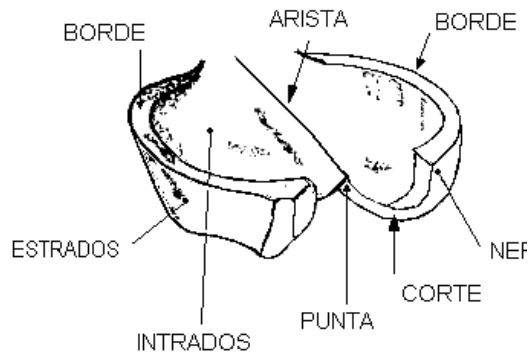


Figura # 3.22 Partes de una Cuchara Pelton

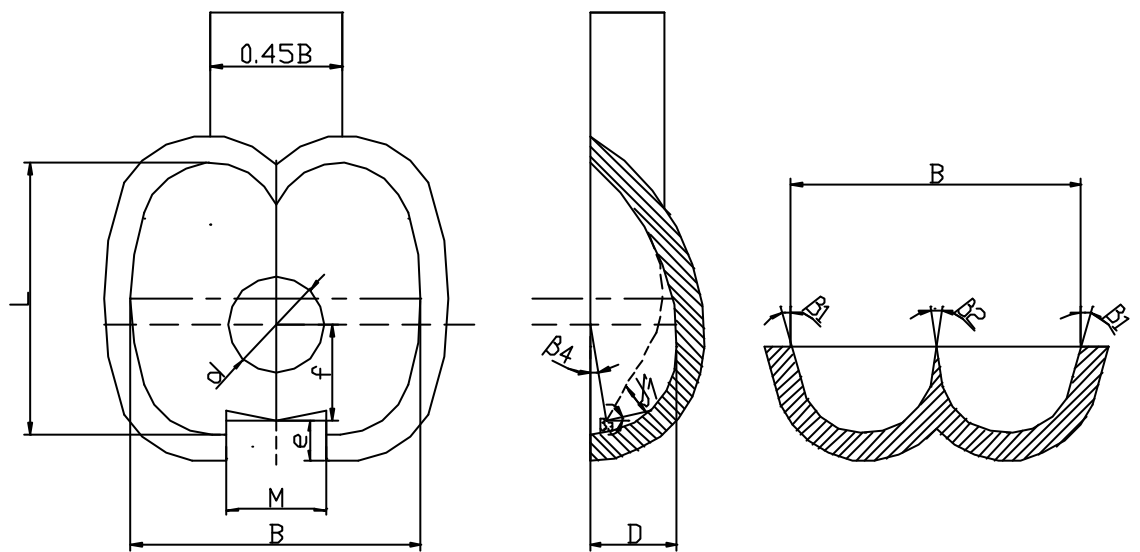


Figura # 3.23 Forma y dimensiones de los álabes de la turbina Pelton

Las dimensiones de la cuchara se toman al valor de d (diámetro del chorro de agua), utilizando la Tabla # 8, según ⁽²²⁾.

⁽²²⁾ APUNTES PARA UN MANUAL DE DISEÑO ESTANDARIZACIÓN Y FABRICACIÓN DE EQUIPOS PARA PEQUEÑAS CENTRALES HIDROELECTRICAS – OLADE Volumen II Turbinas Pelton, Pág. 16.

Tabla # 8 Proporciones de las cucharas Pelton en función del diámetro del chorro

B	L	D	f	M	e	β_1	β_2	l	β_3	β_4	J
2,5d	2,5d	0,85d	0,8d	1,0d	0,3d	10°	4°	1,6d	2°	0°	0,1
a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a
4,0d	3,5d	1,3d	1,1d	1,2d	0,6d	30°	20°	1,7d	5°	20°	0,2

Fuente: Manual del OLADE [9]

Donde:

B = Ancho de la cuchara

L = Longitud de las cucharas

D = Profundidad de las cucharas

f = Longitud de la cuchara desde el corte hasta el centro del chorro

M = Ancho de corte de la cuchara

e = Longitud radial del corte de la cuchara

l = Longitud de la cuchara en la mitad de la misma

β_1 = Angulo de salida del agua de la cuchara

β_2 = Angulo de entrada del agua a la cuchara

β_3 = Angulo formado por las medias cucharas

β_4 = Angulo de la punta de la cuchara

J = Espesor de las cucharas

Todas estas dimensiones se pueden apreciar en el plano anexo1:

Las dimensiones de la cuchara, calculadas de acuerdo con el diámetro del chorro o sección de la salida del inyector se escriben a continuación:

Teniendo en cuenta que la sección de la salida del inyector $d = 22$ mm

$$B = (2,5 \text{ a } 3) d = 3d$$

$$B = 66 \text{ mm}$$

$$L = (2,5 \text{ a } 3,5) d = 2,8d$$

$L = 61,6 \text{ mm}$
 $D = (0,85 \text{ a } 1,3) d = 0,9d$
 $D = 19,8 \text{ mm}$
 $f = (0,8 \text{ a } 1,1) d = 0,98d$
 $f = 21,56 \text{ mm}$
 $M = (1,0 \text{ a } 1,2) d = 1,02d$
 $M = 22,44 \text{ mm}$
 $e = (0,3 \text{ a } 0,6) d = 0,42d$
 $e = 9,24 \text{ mm}$
 $l = (1,6 \text{ a } 1,7) d = 1,62d$
 $l = 35,64 \text{ mm}$
 $\beta_1 = (10^\circ \text{ a } 30^\circ)$
 $\beta_1 = 15^\circ$
 $\beta_2 = (4^\circ \text{ a } 20^\circ)$
 $\beta_2 = 18^\circ$
 $\beta_3 = (2^\circ \text{ a } 5^\circ)$
 $\beta_3 = 4^\circ$
 $\beta_4 = (0^\circ \text{ a } 20^\circ)$
 $\beta_4 = 10^\circ$
 $J = (0,1 \text{ a } 0,2) d = 0,12d$
 $J = 2,64 \text{ mm}$

A continuación se ubicará las dimensiones a cumplir de la cuchara diseñada y será presentada en la Tabla # 3.9.

Tabla # 3.9 Datos calculados para la cuchara de la turbina Pelton

B	L	D	f	M	e	β_1	β_2	l	β_3	β_4	J
66 mm	61,6 mm	19,8 mm	21,56mm	22,44mm	9,24mm	15°	18°	35,64 mm	4°	10°	2,64 mm

3.3.7.- Determinación del número de álabes

El número de álabes suele ser de 17 a 26 por rueda, dependiendo de la velocidad específica de la turbina. Para valores de números específicos altos se tendrá un mayor número de cucharas y a un número característico menor disminuye el número de álabes⁽²³⁾.

En cualquier caso, el número de álabes deben ser tal que el agua proveniente de el chorro no tenga lugar para pasar entre dos álabes sin acción sobre alguno de ellos

Según ⁽²⁴⁾ el número de álabes puede ser calculado por medio de la expresión experimental expuesta a continuación:

$$Z = \frac{1}{2} \frac{D_p}{d} + 14a16 \quad (24)$$

Consecutivamente se puede calcular el número de álabes para el rodete.

$$Z = \frac{1}{2} \frac{259.84}{22} + 14 = 4.905 + 14 = 19.905$$

$$Z = 19.905$$

Por lo tanto se puede elegir entre 20 y 19 cucharas; y siendo finalmente seleccionada 19 cucharas.

(23) **APUNTES PARA UN MANUAL DE DISEÑO ESTANDARIZACIÓN Y FABRICACIÓN DE EQUIPOS PARA PEQUEÑAS CENTRALES HIDROELECTRICAS – OLADE** Volumen II Turbinas Pelton, Pág. 23

(24) **INTERMEDIATE TECHNOLOGY DEVELOPMENT GROUP ITDG PERÚ – OLADE.** Manual de Mini y Microcentrales Hidráulicas (Guía para desarrollo y proyectos), Pág. 144.

3.3.8.- Carcaza

Sirve principalmente para conducir el agua descargada o turbinada. En las unidades de eje horizontal, en el lugar en el rodete recibe la descarga del chorro, las dimensiones de la cubierta deben ser alrededor de 10 a 12 veces el diámetro de este chorro. En el lugar que el rodete ha quedado fuera de descarga, la cubierta debe ser tan angosta como se pueda, para disminuir la fricción del aire. La cubierta debe desfogarse en forma apropiada cerca del centro del rodete.

El diseño de la carcaza depende básicamente del número de los inyectores que se utilicen en la turbina. El diseño que se propone en este proyecto contempla la posibilidad de diseño de un chorro.

3.3.9.- Dimensionamiento del Inyector en función del diámetro del chorro

La tubería de presión entrega el agua a una turbina Pelton pero termina en un inyector en forma de tobera convergente, con aguja de cierre cónica, que cumple las funciones de alimentador, regulador de caudal y principalmente el convertidor de la energía potencial del agua en energía cinética para que la turbina gire.

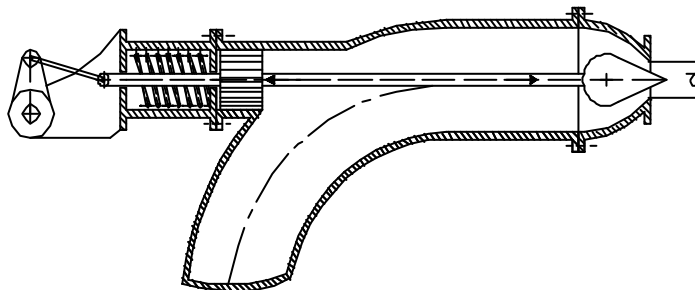


Figura # 3.24 Inyector de una Turbina Pelton

En la figura # 3.24 se aprecia el esquema de un inyector, donde se observa la tobera y de la turbina de la aguja de cierre, la posición de la aguja determina el grado de apertura de la tobera. La aguja es desplazada por medio de un sistema manual.

La forma convergente de la tobera transforma la energía de presión en energía de velocidad, que se traduce en un chorro de agua que ataca a los álabes de la turbina.

El diámetro del tubo de inyección se calcula con la siguiente ecuación, según ⁽²⁵⁾:

$$D_i = \sqrt{\frac{4 * Q}{\rho * V_i}} \quad (25)$$

D_i = Diámetro del inyector

V_i = Velocidad del agua en el inyector

$$V_i = 0.1\sqrt{2gH_n} \quad (26)$$

Introduciendo los datos en la expresión (26) se encuentra la velocidad del agua en el inyector

$$V_i = 0.1\sqrt{2 * 9.81(m/s) * 15.64(m/s)}$$

$$V_i = 1.751 m/s$$

Para encontrar el diámetro del inyector se determina con la ecuación (25), dando como respuesta lo siguiente:

$$D_i = \sqrt{\frac{4 * Q}{\rho * V_i}}$$

⁽²⁵⁾ APUNTES PARA UN MANUAL DE DISEÑO ESTANDARIZACIÓN Y FABRICACIÓN DE EQUIPOS PARA PEQUEÑAS CENTRALES HIDROELECTRICAS – OLADE Volumen II Turbinas Pelton, Pág. 15 – 16.

$$D_i = \sqrt{\frac{4 * 6.4 * 10^3 \text{ m}^3 / \text{s}}{\rho * 1.751 \text{ m/s}}} = 0.0682 \text{ m}$$

$$D_i = 68.2 \text{ mm}$$

3.3.9.1.- Tobera y Aguja

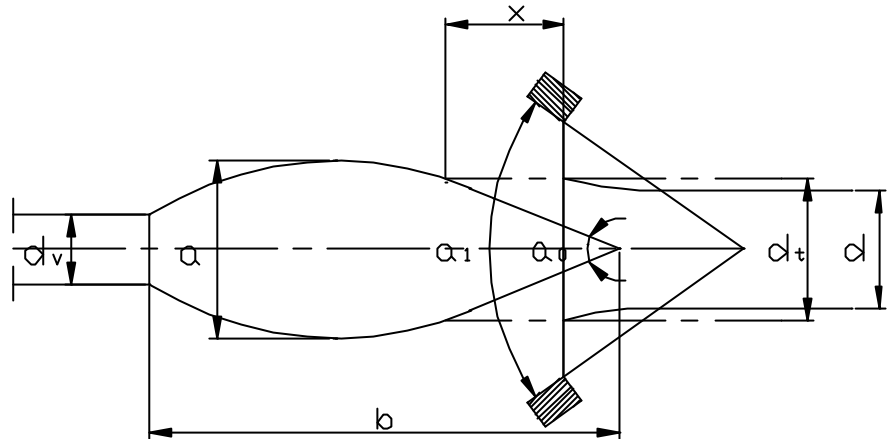


Figura # 3.25 Dimensiones de la Tobera y aguja

Las dimensiones de la tobera y la aguja deben ser determinadas de acuerdo con la Tabla # 3.10 en función del chorro ⁽²⁵⁾.

Tabla # 3.10 Proporciones de la Tobera en función del diámetro del chorro

a	a ₀	a ₁	dt	X	d _v	b	d ₂	l	r	d ₁
1,42d	40°	60°	1,1d	0,5d	0,58d	3,25d	4,5d	6d	15d	2,5d
a	a	a	a	A	a	a	a	a	a	a
1,62d	60°	90°	1,4d	1,16d	0,667d	3,7d	4,6d	12,1d	25d	4,0d

Fuente: Manual del OLADE [9]

Donde:

a = Diámetro máximo de la aguja

a₀ = Angulo de la punta de la aguja

a₁ = Angulo de la punta del inyector

dt = Diámetro de las punta del inyector

x = Recorrido máximo de la aguja

d_v = Recorrido máximo de la aguja
 b = Longitud de la aguja
 d_2 = Diámetro mayor en la curvatura del inyector
 l = Longitud del tramo recto del inyector
 r = radio de curvatura del inyector
 d_1 = Diámetro del tramo recto del inyector

Todas estas dimensiones se pueden apreciar en el plano 1/3:

Las dimensiones de la tobera, calculadas en función del diámetro del chorro se escriben a continuación:

Teniendo en cuenta que la sección de la salida del inyector $d = 22$ mm

$$a = (1.42 \text{ a } 1.62)d = 1.50d$$

$$a = 33 \text{ mm}$$

$$a_0 = 40^\circ \text{ a } 60^\circ$$

$$a_0 = 45^\circ$$

$$a_1 = 60^\circ \text{ a } 90^\circ$$

$$a_1 = 70^\circ$$

$$dt = (1.1 \text{ a } 1.7)d = 1.2d$$

$$dt = 26.4 \text{ mm}$$

$$x = (0.5 \text{ a } 1.16)d = 1d$$

$$x = 22 \text{ mm}$$

$$d_v = (0.58 \text{ a } 0.6)d = 0.58d$$

$$d_v = 12.76 \text{ mm}$$

$$b = (3.25 \text{ a } 7.3)d = 4d$$

$$b = 88 \text{ mm}$$

$$d_2 = (4.5 \text{ a } 4.6)d = 4.55d$$

$$d_2 = 100.1 \text{ mm}$$

$$l = (6.0 \text{ a } 12.1)d = 7d$$

$$l = 154 \text{ mm}$$

$$r = (15 \text{ a } 25)d = 20d$$

$$r = 440 \text{ mm}$$

$$d_1 = (2.5 \text{ a } 4.0)d = 3d$$

$$d_1 = 66 \text{ mm}$$

A continuación se ubicará las dimensiones a cumplir de la tobera y será presentada en la Tabla # 3.11.

Tabla # 3.11 Datos calculados para la cuchara de la turbina Pelton

a	a ₀	a ₁	dt	x	d _v	b	d ₂	l	r	d ₁
33 mm	45°	70°	26,4 mm	22 mm	12,76 mm	88 mm	100,1 mm	154 mm	440 mm	66 mm

3.4.- DIMENSIONAMIENTO DE COMPONENTES MECÁNICOS DE LA PICOCENTRAL HIDRO

El diseño mecánico de la turbina será de carácter verificativo, ya que se realizará a partir de las dimensiones antes encontradas y exigidas principalmente por el diseño hidráulico, por consiguiente el dimensionamiento mecánico se reducirá a determinar los factores de seguridad con que están trabajando cada elemento.

3.4.1.- Diseño a Fatiga de los Álabes

Los álabes al estar sometidos a la acción tangencial del agua proveniente del inyector sufren entre los esfuerzos principales, como:

De flexión y cortante.

Como se muestra a continuación en la figura # 3.26, en donde se aprecia la sección representada en el corte indicado en donde se procede a encontrar las propiedades de esta sección como son el área transversal y momento de inercia.

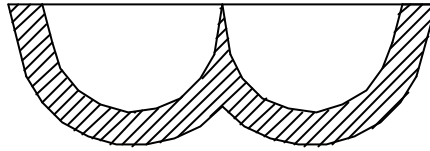


Figura # 3.26. Corte de un álabe en sección transversal crítica

3.4.2.- Cálculo del Área Transversal

El cálculo del área transversal de la Figura # 3.27 resultará al multiplicar dos veces el área formada por la resta de dos regiones semielípticas como muestra la figura # 3.28

Para ello se realiza una representación cartesiana (ver Figura # 3.28) para establecer las ecuaciones de las semielipses y con ayuda del cálculo integral encontrar el valor de estas áreas.

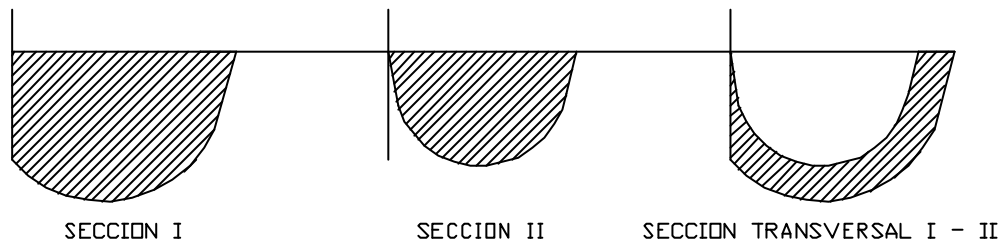


Figura # 3.27 Representación gráfica del área de un semieipsoide

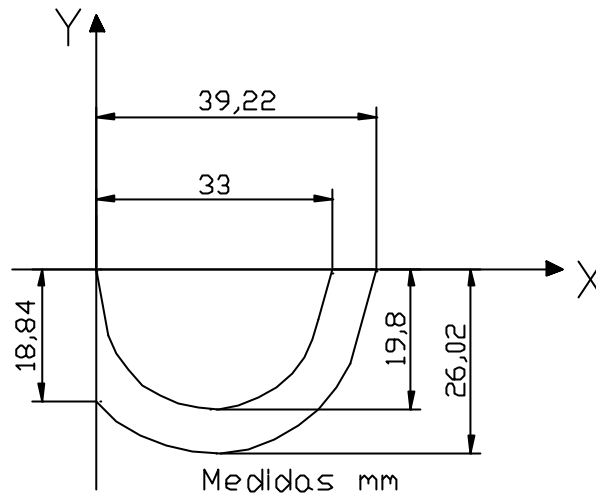


Figura # 3.28 Representación en dos dimensiones de un solo semielipsoide

Las curvas elípticas con respecto a los ejes X – Y, pero en otra posición se calcula por medio de la siguiente ecuación, según ⁽²⁶⁾.

$$\frac{(X - X_0)^2}{a^2} + \frac{(y - y_0)^2}{b^2} = 1 \quad (27-1)$$

$$\text{Para 1: } \frac{(X - 1.65)^2}{1.65^2} + \frac{y^2}{1.98^2} = 1 \quad (27-2)$$

$$\text{Para 2: } \frac{(X - 1.65)^2}{2.272^2} + \frac{y^2}{2.602^2} = 1 \quad (28)$$

La ecuación integral para calcular el área bajo la curva es la siguiente según⁽²⁷⁾:

$$\text{Area} = \int Y^* dx \quad (29)$$

⁽²⁶⁾ Geometría Analítica de LEHMANN, 1990 Editorial Limusa S.A. Decimoctava impresión 1993 Impreso en México, Teorema 2, Pág. 182,

⁽²⁷⁾ Mecánica Vectorial Para Ingeniero, Estática Ferband P. Beer F Russell Jhontson Sexta edición Impreso en México. Pag. 210 -220

Despejando Y de las ecuaciones (27-2) y (28), se reemplaza en la ecuación (29) y se calcula el area1 y el área 2:

$$\frac{1.98^2(x - 1.65)^2 + 1.65y^2}{(1.65^2)(1.98^2)} = 1$$

$$Y_1 = \sqrt{3.920 - 1.44(x - 1.65)^2}$$

$$Area_1 = \int_b^a Y_1 * dx$$

$$Area_1 = \int_{3.3}^0 \sqrt{3.920 - 1.44(x - 1.65)^2} dx$$

$$Area_1 = \int_{3.3}^0 \sqrt{4.752x - 1.44x^2} dx$$

$$Area_1 = 5.1316 cm^2$$

$$2.272^2 * 2.602^2 = 2.602^2(x - 1.65)^2 + 2.272^2 y^2$$

$$Y_2 = \sqrt{6.770 - 1.311(x - 1.65)^2}$$

$$Area_2 = \int_b^a Y_2 dx$$

$$Area_2 = \int_0^{3.922} \sqrt{6.770 - 1.311(x - 1.65)^2} dx$$

$$Area_2 = \int_0^{3.922} \sqrt{3.200 - 1.311x^2 + 4.326x} dx$$

$$Area_2 = 8.5206 cm^2$$

Una vez obtenidos los valores de las dos áreas semielípticas al área de la sección transversal del álabe quedará determinada al restar estos dos y el resultado multiplicando por dos por tratarse de dos semielipsoides de la siguiente manera:

$$Area_{neta-transversal} = 2(Area_2 - Area_1)$$

$$Area_{neta-transversal} = 2(8.520 - 5.1316)$$

$$Area_{neta-transversal} = 6.778 cm^2$$

3.4.3.- Cálculo del Momento de Inercia

Realizando un análisis similar al anterior en la Figura # 3.28 se determina el momento de inercia de un semielipsoide con respecto al eje X utilizando las ecuaciones cartesianas semielipses.

La ecuación integral para calcular el momento de inercia con respecto al eje X es la siguiente⁽²⁸⁾:

$$I_x = \int y^2 * X * dy \quad (30)$$

Despejado ahora x de las ecuaciones (27) y (28), se reemplaza en la ecuación (30), lo cual da como respuesta:

Para la Región I:

$$I_{x1} = \int_0^{1.98} y^2 \left(\left(\sqrt{2.7225 - 0.6944 y^2} + 1.65 \right) - \left(-\sqrt{2.7225 - 0.6944 y^2} + 1.65 \right) \right) dy$$

$$I_{x1} = \int_0^{1.98} y^2 \left(2\sqrt{2.7225 - 0.6944 y^2} \right) dy$$

$$I_{x1} = 5.03 cm^4$$

Para la Región II:

$$I_{x2} = \int_0^{2.602} y^2 \left(\left(\sqrt{5.1619 - 0.7624 y^2} + 1.65 \right) \right) dy - \int_{1.804}^{1.98} y^2 \left(\left(-\sqrt{5.1619 - 0.7624 y^2} + 1.65 \right) \right) dy$$

(28) Mecánica Vectorial Para Ingeniero, Estática Ferband P. Beer F Russell Jhontson Sexta edición Impreso en México. Pág. 210 -220

$$I_{x2} = 12.152 - 1.2713$$

$$I_{x2} = 10.88 \text{ cm}^4$$

Por lo tanto el momento de inercia total con respecto al eje X de los dos semielipsoides son:

$$I_{Xtotal} = 2(10.88 - 5.03) \text{ cm}^4$$

$$I_{Xtotal} = 11.701 \text{ cm}^4$$

Ahora se procede a encontrar el centro de gravedad en la sección que se está analizando en la Figura # 3.28. Para calcular el momento de inercia con respecto al eje de este centro que es el que interesa para poder realizar el diseño mecánico.

El centro de gravedad de una región semielíptica \bar{y} según ⁽²⁸⁾ se determina mediante la siguiente ecuación:

$$\bar{y} = \frac{4 * b}{3p} \quad (31)$$

Al reemplazar los datos que se observan en la figura # 3.28 de las dos regiones tratadas en la ecuación (27) y (28), los centros de gravedad de cada porción con respecto al eje X resultaron ser las siguientes:

$$\text{Región I:} \quad \bar{y}_1 = \frac{4 * 1.98}{3p} = 0.8403 \text{ cm}$$

$$\text{Región II:} \quad \bar{y}_2 = \frac{4 * 2.602}{3p} = 1.104 \text{ cm}$$

Como ya se dispone de los centros de gravedad de las dos regiones y el área de las mismas nos permite calcular el centro de gravedad real o eje neutro de la sección transversal crítica mediante la ecuación que se observa a continuación:

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i \cdot \bar{y}_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (32)$$

En donde A_i y \bar{y}_i son el área y centro de gravedad de cada región respectivamente. Reemplazando los datos de estas regiones en la ecuación (32) se tiene:

$$\bar{y} = \frac{(8.5206 \cdot 1.104) - (5.1316 \cdot 0.8403)}{(8.5206 - 5.1316)} = \frac{5.090}{3.389} = 1.5019 \text{ cm}$$

$$\bar{y} = 1.5019 \text{ cm}$$

Mediante el teorema de STEINER⁽²⁹⁾ se calcula el momento de inercia de la sección transversal con respecto al centro de gravedad, dicho teorema se expresa de la siguiente manera:

$$I'_x = I_x - A \cdot d^2 \quad (33)$$

Donde:

I'_x = Momento de inercia con respecto al centro de gravedad de la sección transversal

A = Área total de la sección

d = Distancia del eje neutro al eje X de la sección

$$I'_x = 11.701 - (6.778 \cdot 1.5019^2)$$

$$I'_x = 3.588 \text{ cm}^4$$

⁽²⁹⁾ Mecánica Vectorial Para Ingeniero, Estática Ferband P. Beer F Russell Jhontson Sexta edición Impreso en México. Pag. 210 -220

Al conocer los valores de la sección transversal y el momento de inercia en la sección más crítica de la cuchara se puede realizar el diseño a la fatiga de los álabes o cucharas.

Se diseña a la fatiga las cucharas debido a que la fuerza impactante del chorro de agua actúa solamente en cierto tiempo y vuelve a desaparecer, existiendo una carga fluctuante sobre la cuchara. En la Figura # 3.29 se representa a un álabe de la turbina, el cual está expuesto en voladizo y mostrando la carga que actúa sobre él:

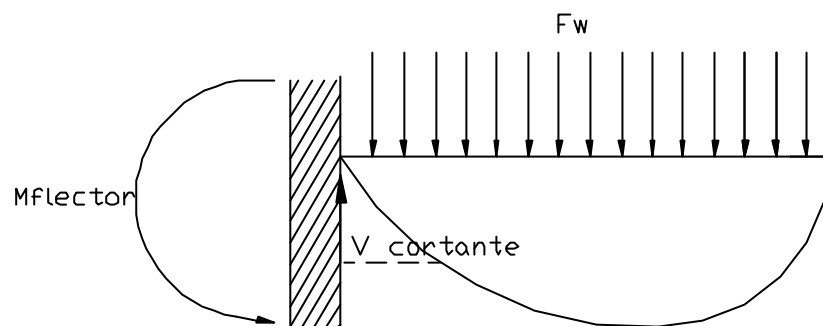


Figura # 3.29 Representación en dos dimensiones de un solo semielipsoide

En donde se observa que los esfuerzos que se producen en la cuchara son: un esfuerzo de flexión y un cortante.

Para calcular estos dos esfuerzos es necesario conocer la fuerza que actúa sobre el álabe, la cual se la determina relacionando la potencia entregada a la turbina ($P_{neta} = KW$), el número de revoluciones ($N = RPM$), el torque ($T = Kg. - cm$) de la misma mediante la siguiente fórmula:

$$P_{neta} = \frac{T * N}{97342.47} \quad (34)$$

97342.47 = factor de corrección de unidades

Si se despeja el torque se tiene:

$$T = \frac{97342.47 * 0.68}{600}$$

$$T = 110.321 \text{Kg} \cdot \text{cm}$$

El torque relaciona a la fuerza y al brazo de torque mediante la siguiente fórmula:

$$T = Fh * \frac{Dp}{2} \quad (35)$$

En donde:

Fh = Fuerza horizontal que actúa sobre los álabes en Kg.

$\frac{Dp}{2}$ = Brazo o distancia de torque en cm

Si se despeja Fh se tiene:

$$Fh = \frac{2 * T}{Dp}$$

$$Fh = \frac{2 * 110.321(\text{kg} \cdot \text{cm})}{25.948 \text{cm}}$$

$$Fh = 8.5032 \text{Kg}$$

De esta manera se obtiene la fuerza puntual que actúa sobre cada uno de los álabes del rodete, pero se considerará que esta fuerza actuará en forma distribuida en toda la sección de la cuchara para lo cual se transformará esta fuerza puntual en una distribuida (Fw) de la siguiente manera:

$$Fw = \frac{Fh}{L} \quad (36)$$

En donde L. es la longitud de la cuchara

$$F_w = \frac{8.503 \text{ Kg}}{6.6 \text{ cm}}$$

$$F_w = 1.2883 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}}$$

3.4.4.- Cálculo del esfuerzo de flexión producido en la cuchara

El momento flector que produce la fuerza F_w sobre el álabe en la figura # 3.29 según ⁽³⁰⁾ es:

$$M = \frac{F_w * L^2}{2} \quad (37)$$

M = Momento flector en Kg – cm

F = Fuerza tangencial en Kg.

L = Longitud de la cuchara en cm.

$$M = \frac{1.288 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}} * (6.6 \text{ cm})^2}{2}$$

$$M = 28.060 \text{ Kg} \cdot \text{cm}$$

El esfuerzo flector $S_{\text{flexión}}$ se lo determina mediante:

$$S_{\text{flexión}} = \frac{M * \bar{y}}{I_x} \quad (38)$$

$$S_{\text{flexión}} = \frac{28.060 \text{ Kg} \cdot \text{cm} * 1.5019 \text{ cm}}{3.588 \text{ cm}^4}$$

$$S_{\text{flexión}} = 11.745 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2}$$

⁽³⁰⁾ J. SHIGLEY. Diseño de Ingeniería Mecánica Mc Gran – Hill Segunda edición, México. 1979. 250- 275, 290 -304

3.4.5.- Cálculo del Esfuerzo Cortante

El esfuerzo cortante t_{Cortante} se produce debido a la reacción V que actúa sobre la sección de la cuchara en el empotramiento el cual se calcula mediante:

$$t_{\text{Cortante}} = \frac{V}{A_3} \quad (39)$$

A_3 representa el área de la sección transversal en el empotramiento y se tomó una sección de 1,5 cm por 2 cm de área, la misma que fue diseñada por condiciones de la sección de chorro, según el OLADE ⁽⁹⁾:

$$t_{\text{Cortante}} = \frac{8.503 \text{ Kg}}{2 * 1,5 \text{ cm}^2}$$

$$t_{\text{Cortante}} = 3.970 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2}$$

En la figura # 3.30 se aproxima la forma de onda que producen los esfuerzos al fluctuar sobre la cuchara en donde en cada gráfica se muestra los esfuerzos que se deben calcular para cada diseño de la cuchara.

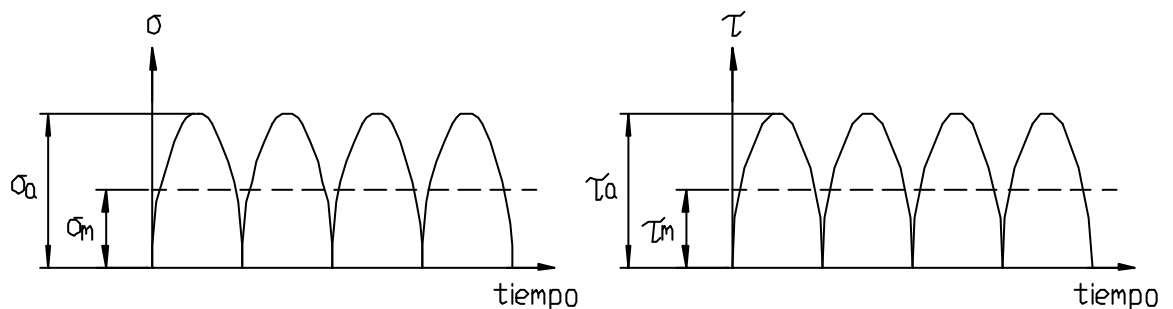


Figura # 3.30 Representación de los esfuerzos fluctuantes que se producen en la cuchara

Como se trata de dos esfuerzos que actúan al mismo tiempo sobre el álabe se utilizará según ⁽³⁰⁾ la ecuación de superposición de esfuerzos

planteada por VON MISSES HENKY para calcular un solo esfuerzo resultante o equivalente S_{equiv} :

$$S_{equiv} = \sqrt{(Km * S_{flexión})^2 + 3(Kt * t_{cortante})^2} \quad (40)$$

Km = Es un factor para maximizar esfuerzos axiales aproximadamente 1.9, pero solo $S_{equiv-a}$; para $S_{equiv-m}$ no se maximizan esfuerzos y $Km = 1$.

Kt = Factor para mayores esfuerzos cortantes o de torsión aproximadamente 1.6, pero solo para $S_{equiv-a}$; para $S_{equiv-m}$ no se mayoran esfuerzos y $Kt = 1$.

Se calcula estos esfuerzos mencionados de la siguiente forma con la ecuación (40):

Con $Km = 1.9$ y $Kt = 1.6$

$$S_{equiv-a} = \sqrt{(1.9 * 11.745)^2 + 3(1.6 * 3.270)^2}$$

$$S_{equiv-a} = 24.085 \frac{Kg}{cm^2}$$

$$S_{equiv-m} = \sqrt{(5.872)^2 + 3(1.635)^2}$$

$$S_{equiv-m} = 6.519 \frac{Kg}{cm^2}$$

Seguidamente se debe determinar los factores de seguridad K mediante:

$$K = \frac{Sm}{S_{equiv-m}} \quad (41)$$

$$Sm = \frac{Se}{\frac{S_{equiv-a}}{S_{equiv-m}} + \frac{Se}{S_{ut}}} \quad (42)$$

El material del rodete a ser fundido según los fabricantes tienen las siguientes características:

$$Sy = 2108 \text{ Kg/cm}^2$$

$$S_{ut} = 2987 \text{ Kg/cm}^2$$

$$Se' = 1494 \text{ Kg/cm}^2$$

Tomando un factor de corrección para el límite de fatiga Se' para la cuchara de 0.68 se tiene, según ⁽³²⁾:

$$Se = 0.68 * Se'$$

$$Se = 1015 \text{ Kg/cm}^2$$

Al reemplazar los valores encontrados en la ecuación (42) y (41) se tiene:

$$Sm = \frac{1015 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2}}{\frac{24.085}{6.519} + \frac{1015}{2987}}$$

$$Sm = 251.58 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2}$$

$$K = \frac{268.091}{6.519}$$

$$K = 38.59$$

Este factor de seguridad indica que las dimensiones de los espesores de la cuchara son muy buenas, hasta se puede disminuir un poco estas medidas, pero esto haría que la sección de la cuchara sea más delgada lo que nos produciría problemas en la fundición puesto que al tener

espesores muy delgados se corre el riesgo que las piezas fundidas no salgan completas.

3.4.6.- Diseño Mecánico del Eje

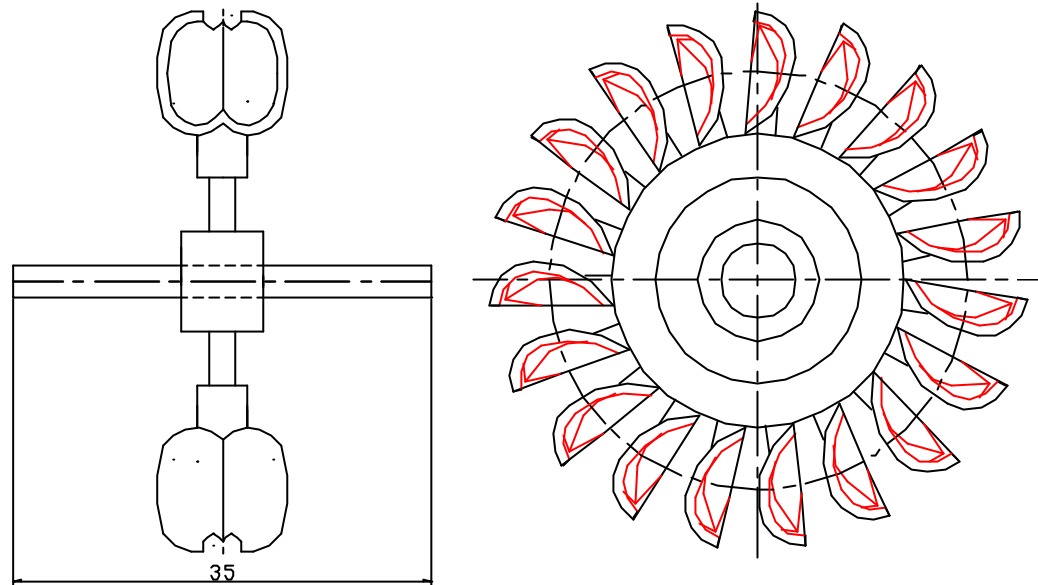


Figura # 3.31 Representación de las fuerzas producidas sobre el eje de la turbina

F_h = Fuerza de chorro sobre la cuchara trasladada al eje

F_v = Fuerza provocada por el peso del rodete de la turbina

F_{res} = Fuerza resultante debido a F_h y F_v .

Para determinar el peso del rodete F_v se determina primero el peso de cada cuchara y luego el peso del disco. Como no se dispone directamente del peso de cada cuchara, este se lo determina empleando el molde de madera, el cual es utilizado como matriz en el proceso de la fundición de las cucharas. Finalmente se calcula el volumen del material que contiene este molde con la ecuación mencionada:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (43)$$

ρ = Densidad del material (madera laurel $\rho = 670 \text{ Kg/m}^3$ según [14])

m = Masa del material (madera laurel $m = 0.027 \text{ Kg}$)

V = volumen de la cuchara

Despejando el volumen de la ecuación (43) se tiene:

$$V = \frac{m}{\rho}$$

$$V = \frac{0.027 \text{ Kg}}{670 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}}$$

$$V = 4.029 * 10^{-5} \text{ m}^3$$

Como se dispone el volumen de cada cuchara se puede ya emplear la densidad del bronce para encontrar el peso real de la cuchara de bronce:

$$m = \rho_{\text{bronce}} * V$$

$$m = 8500 * 4.029 * 10^{-5}$$

$$m = 0.34 \text{ Kg}$$

Esta masa encontrada es solo de una cuchara, pero como se trata de 19, basta multiplicar el valor de $m * 19$ para saber el peso total de las cucharas.

$$m_{\text{cucharas}} = 19 * 0.34 \text{ Kg}$$

$$m_{\text{cucharas}} = 6.46 \text{ Kg}$$

Para saber el peso del disco del rodete se calcula el volumen de este, en donde las dimensiones del mismo se muestran a continuación en la Figura # 3.32.

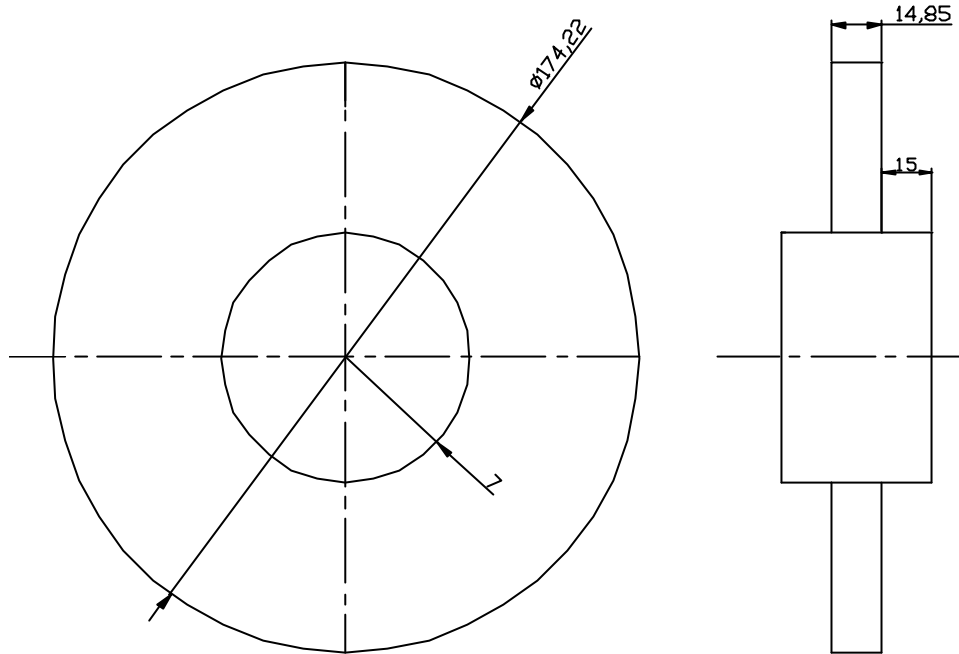


Figura # 3.32 Dimensiones del disco del rodete

$$V_{Disco} = \left(\frac{p * f_{ext}^2}{4} + \frac{p * f_{cubo}^2}{2} \right) * a$$

$$V_{Disco} = \left(\frac{p * 0.174^2}{4} + \frac{p * 0.074^2}{2} \right) * 0.0146$$

$$V_{Disco} = 4.726 * 10^{-4} m^3$$

Para calcular el peso del disco se utiliza nuevamente la relación:

$$? = \frac{m}{V}$$

$$m_{Disco} = ?_{bronce} * V$$

$$m_{Disco} = 8500 * 4.726 * 10^{-4} m^3$$

$$m_{Disco} = 4.071Kg$$

El peso total del rodete es igual a la suma del peso de todas las cucharas más el peso del disco:

$$m_{total} = m_{cucharas} + m_{Disco}$$

$m_{total} = (5.58 + 4.071)Kg$, pero se le toma 10 Kg por motivos de expansión el proceso de fundición.

Como ya se conoce el valor de F_v y F_h se puede calcular la fuerza resultante que soporta el eje ecuación (44):

$$F_{res} = \sqrt{(F_h + F_v)} \quad (44)$$

$$F_{res} = \sqrt{(8.503^2 + 10^2)}$$

$$F_{res} = 13.126Kg$$

Como se observa en la Figura # 3.31 que el eje soporta un esfuerzo de flexión debido a la F_{res} y un esfuerzo de torsión producido por el torque que realiza el chorro de agua sobre el rodete, el cual ya se lo determinó anteriormente y resultado $T_{Máximo} = 110.321 Kg - cm$.

El momento flector máximo $M_{flector - máximo}$ se lo observa a continuación en el diagrama cortante y momentos que se producen en el eje:

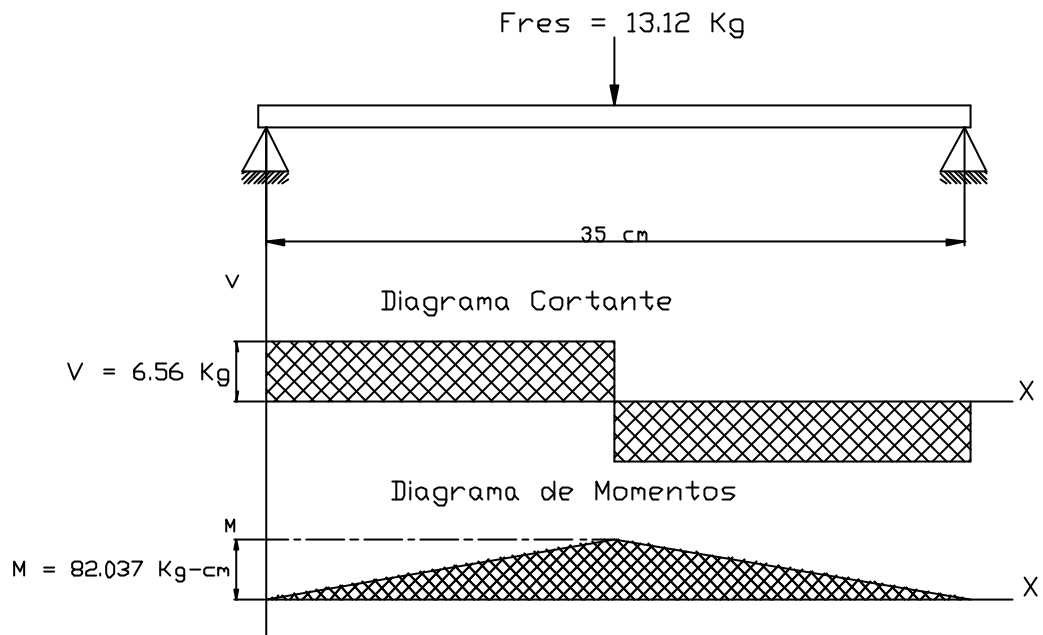


Figura # 3.33 Diagrama de Corte y momento producido en el eje

$$M_{\text{flector máximo}} = \frac{L * F_{\text{res}}}{4} \quad (45)$$

Donde:

L = Distancia máxima del eje suspendida de punto a punto

Por lo tanto se tiene:

$$M_{\text{flector máximo}} = \frac{35\text{cm} * 13.126\text{Kg}}{4}$$

$$M_{\text{flector máximo}} = 114.852\text{Kg} - \text{cm}$$

Seguidamente se estima el **diseño estáticamente**.

Como el eje estará en contacto con el agua se seleccionará un acero inoxidable ⁽³¹⁾ con las siguientes propiedades:

⁽³¹⁾ I BOHMAN. (Manual de aceros de Colegio Don Bosco), Pág. 49

$$S_y = 2803 \text{ Kg/cm}^2$$

$$S_{ut} = 5272 \text{ Kg/cm}^2$$

$$S_{e'} = 2636 \text{ Kg/cm}^2$$

Considerando un factor de corrección para el límite de la fatiga ⁽³²⁾ en el eje se tiene:

$$S_e = 0.68 * S_{e'}$$

$$S_e = 1792 \text{ Kg/cm}^2$$

Una vez que se tiene todos los datos se calcula el diámetro a cargas estáticas mediante la siguiente expresión:

$$? = \left(\frac{32 * n}{\rho * S_y} \left(M_{\text{flexor máximo}}^2 + \frac{3 * T_{\text{máximo}}^2}{4} \right)^{\frac{1}{2}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (46)$$

n = Factor de seguridad = 3, recomendado por condiciones de diseño.

$$? = \left(\frac{32 * 3}{\rho * 2803} \left(114.852^2 + \frac{3 * (110.321)^2}{4} \right)^{\frac{1}{2}} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$? = 1.176 \text{ cm}$$

Se puede calcular el diámetro del eje a cargas dinámicas según el criterio de Soderberg mediante la siguiente ecuación:

$$? = \left(\frac{32 * n}{\rho} \left(\left(\frac{T_{\text{máximo}}}{S_y} \right)^2 + \left(\frac{M_{\text{máximo}}}{S_{e'}} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (47)$$

⁽³²⁾ J. SHIGLEY. Diseño de Ingeniería Mecánica Mc Gran – Hill Segunda edición, México. 1979, 250- 275, 290 -304

$$? = \left[\frac{32 * 3}{\rho} \left(\left(\frac{110.321^2}{2803} \right)^2 + \left(\frac{114.852.^2}{1792} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right]^{\frac{1}{3}}$$

$$? = 1.3196 \text{ cm}$$

Finalmente el diseño establece que se debe cuantificar **dinamicamente** el eje, el cual consta de los siguientes parámetros:

Se selecciona inicialmente el diámetro $? = 1.226 \text{ cm}$, lo que únicamente se hará es la comprobación para que no falle por deflexión mediante la expresión:

$$d = \frac{F * L^3}{48 * E * I} \quad (48)$$

Donde:

d = Deformación

F = Fuerza máxima (13.126 Kg)

L = Longitud del eje (35 cm)

E = Modulo de elasticidad ($2.1 * 10^6 \text{ kg/cm}^2$)

I = Momento de Inercia

El momento inercia para una sección transversal circular viene dado por:

$$I = \frac{\rho * d^4}{64} \quad (49)$$

Por lo tanto reemplazando los datos se obtiene:

$$I = \frac{\rho * 1.3196^4}{64}$$

$$I = 0.1488 \text{ cm}^4$$

Este valor calculado se lo reemplaza en la ecuación (48):

$$d = \frac{13.126 \text{Kg} * 35^3 \text{cm}^3}{48 * 2.1 * 10^6 * 0.1488 \text{cm}^4}$$

$$d = 0.0375 \text{cm}$$

Para elementos de máquinas la deflexión no debe pasar de L/2000

$$d_p = 35/2000 = 0.0175 \text{ cm}$$

Se observa que la deflexión producida en el eje es mayor a la admisible, por lo que se calculará nuevamente el diámetro mínimo del eje para garantizar que este no falle por deflexión.

Utilizando la d permisible y despejando el momento de inercia de la ecuación (48) se tiene:

$$I = \frac{13.126 * 35^3}{48 * 2.1 * 10^6 * 0.0175}$$

$$I = 0.3190 \text{cm}^4$$

Reemplazando este valor de inercia en la ecuación (49) y despejando se tiene el diámetro final:

$$d = \sqrt[4]{\frac{64 * I}{\rho}}$$

$$d = \sqrt[4]{\frac{64 * 0.319}{\rho}}$$

$$d = 1.596 \text{cm}$$

3.4.7.- Diseño de los Chaveteros

Los chaveteros a realizarse en el eje serán de sección cuadrada y las chavetas serán de aleación acero, aluminio debido a que el esfuerzo de la fluencia de la chaveta debe ser menor a la del eje. Seguidamente se procede a encontrar sus respectivas dimensiones ⁽³³⁾, como se indica en la Figura # 3.34:

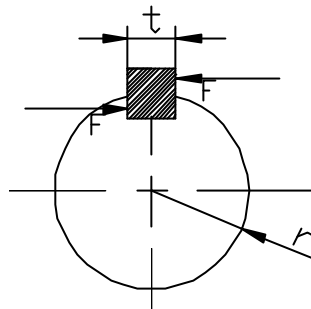


Figura # 3.34 Chavetero

Por la teoría de la energía de distorsión la resistencia al cortante es:

$$S_{SY} = 0.577S_Y \quad (50)$$

El esfuerzo de fluencia S_y del aluminio es de 630 Kg/cm^3 , y reemplazando este valor en la ecuación (48) se tiene:

$$S_{SY} = 0.577 * 630 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2}$$

$$S_{SY} = 364 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2}$$

⁽³³⁾ J. SHIGLEY. Diseño de Ingeniería Mecánica Mc Gran – Hill Segunda edición, México. 1979, 290 -304

La falla por corte a través del área del chavetero originará un esfuerzo t ⁽³⁴⁾:

$$t = \frac{F}{t^* l} \quad (51)$$

F = Fuerza cortante en el chavetero

.t = Espesor del chavetero (0.4 cm)

.l = Longitud del chavetero

Además:

$$F = \frac{T}{r} \quad (52)$$

r = Radio del eje 1.30 cm

Calculando F se tiene:

$$F = \frac{110.321}{1.30}$$

$$F = 84.062 \text{ Kg}$$

Ahora despejando l en la siguiente relación se tiene:

$$\frac{S_{SY}}{n} = \frac{F}{t^* l} \quad (53)$$

$$l = \frac{3 * 84.062}{0.4 * 364}$$

$$l = 1.75 \text{ cm}$$

La resistencia se determina con un área igual de la cara de la cuña o chavetero de la siguiente manera:

⁽³⁴⁾ Manual de aceros de Colegio Don Bosco, Pág. 55

$$\frac{S_{SY}}{n} = \frac{F}{\frac{t \cdot l}{2}} \quad (54)$$

Despejando l queda el siguiente valor:

$$l = 3.464 \text{ cm}$$

3.4.8.- Selección de Chumaceras y Rodamientos

Para el cálculo y selección de las chumaceras y rodamientos se ha empleado el catálogo de la SKF⁽³⁵⁾. Los datos que se disponen para tal efecto son los siguientes:

$N = 1800 \text{ RPM}$

Tiempo de vida estimado del rodamiento $L_t = 5 \text{ años}$

Tiempo de trabajo $T_t = 24 \text{ h/día}$

Carga radial mayor en el eje $F_r = 64.38 \text{ Nt}$

Carga axial en el eje $F_a = 0$

Inicialmente se determina el número de horas de trabajo (L_h) del rodamiento aplicando la siguiente ecuación:

$$L_h = L_t \cdot T_t \quad (55)$$

$$L_h = 5 \cdot 24 \cdot 365$$

$$L_h = 43800 \text{ horas}$$

Pero también este valor se lo puede encontrar en ⁽³⁵⁾; dando como resultado lo siguiente:

⁽³⁵⁾ Manual de Selección de Rodamientos de la SKF, Catálogo 3200 Sp. Impreso en Alemania por Carl Gerber, Pág. 27 – 82, 111 – 457.

$L_{10h} = 40000$ a 50000 horas de servicio, por ser una maquina que funciona todo el día y de carácter de generación eléctrica.

De lo cual se determinan $L_{10h} = 45000$ horas de servicio

El procedimiento para calcular una chumacera es similar al empleado para seleccionar un rodamiento. Se calcula la carga estática equivalente 1 (P_{or1}) con la siguiente ecuación:

$$P_{or1} = 0.6Fr + 0.5Fa \quad (56)$$

$$P_{or1} = 0.6 * 64.38 + 0.5 * 0$$

$$P_{or1} = 38.628Nt$$

También se calcula la carga estática equivalente 2 con la siguiente ecuación:

$$P_{or2} = Fr = 68.38Nt \quad (57)$$

De las dos cargas anteriormente calculadas se debe tomar la mayor y en este caso será:

$$P_{or \text{ máx}} = 68.38Nt$$

Luego se determina la capacidad de carga estática necesaria para la chumacera con la siguiente fórmula:

$$C_0 = s_0 * P_0 \quad (58)$$

Donde:

C_0 = Capacidad de carga estática, en Nt.

P_0 = Carga estática equivalente, en Nt.

s_0 = Factor de seguridad estático

Considerando la aplicación del proyecto de generación se tiene los siguientes datos según⁽³⁶⁾:

$$P_0 = 63.38 \text{ Nt}$$

$$s_0 = 2$$

$$C_0 = 2 * 63.38$$

$$C_0 = 128.76 \text{ Nt}$$

Por lo tanto la chumacera tentativa para estos valores se tiene que es UCP205 – 10001.

Para el rodamiento se calcula la carga dinámica equivalente:

$$Pr = X * Fr + Y * Fa \quad (59)$$

Sabiendo que X, Y, factores de carga radial y axial respectivamente.

Como el eje soporta solamente cargas radiales el valor de $X = 1$, $Y = 0$, entonces:

$$Pr = (1 * 64.38) + (0)$$

$$Pr = 64.38 \text{ Nt}$$

También se calcula la capacidad requerida dinámica (Cd), mediante la ecuación:

$$Cd = \frac{Fh}{Fn} P_r \quad (60)$$

⁽³⁶⁾ Manual de Selección de Rodamientos de la SKF, Catálogo 3200 Sp. Impreso en Alemania por Carl Gerber, Pág. 111 – 457.

Los valores de $F_h = 4.9$ y $F_n = 0.28$, por lo tanto se tiene:

$$Cd = \frac{4.9}{0.28} 64.38$$

$$Cd = 1126.65Nt$$

Finiquitando la selección en función de la siguiente ecuación (61) se encuentra la capacidad de carga estática para el rodamiento:

$$L_{10h} = \frac{C_0^K}{P^K} * \frac{10^6}{60 * N} \quad (61)$$

$$P = Fr$$

$$N = 1800 \text{ RPM}$$

$$F_r = 64.38 \text{ Nt}$$

$$L_{10h} = 45000 \text{ horas de servicio}$$

$$C_0 = P * \left(L_{10h} * \frac{60 * N}{10^6} \right)^K$$

$K = 3$ considerando un rodamiento de bolas

$$C_0 = 64.38 * \left(45000 * \frac{60 * 1800}{10^6} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$C_0 = 1090.51Nt$$

$$Cd = 1126.65Nt$$

Con estos datos se procede a la selección del rodamiento en ⁽³⁶⁾:

Rodamiento de Bolas 61805 SKF

3.4.9.- Diseño del sistema de transmisión

La turbina impulsará un generador eléctrico el cual gira a una velocidad de 1800 RPM, y el sistema de transmisión a usarse será de bandas trapezoidales.

Se selecciona el tipo de sección determinado el factor de servicio y se calcula la potencia de diseño⁽³⁷⁾:

$$\text{Pot de diseño} = P_H * f_s \quad (62)$$

P_H = Potencia transmitida en CV

f_s = factor de servicio

P_H = 0.92 CV

f_s = 1.25 (transmisión por fajas sin sacudidas, con generador de corriente)⁽³⁷⁾ (Ver anexo 3)

Pot de diseño = 0.92 * 1.25 = 1.15 CV

Diámetro de la Polea

Como la polea menor (en el eje del generador) girará a 1800 RPM, la sección recomendada es la "A".

La relación de transmisión (i) esta dado por:

$$i = \frac{N_2}{N_1} \quad (63)$$

$$i = \frac{1800}{600} = 3$$

⁽³⁷⁾ INTERMEDIATE TECHNOLOGY DEVELOPMENT GROUP ITDG PERÚ – OLADE. Manual de Mini y Microcentrales Hidráulicas (Guía para desarrollo y proyectos), Pág. 170 – 175.

El diámetro mínimo recomendado es de 2.8 pulgadas. Se selecciona un diámetro (d) para la polea menor de 2.8 plg.

Luego la polea mayor queda con la siguiente medida:

$$D = 2.8 * 3$$

$$D = 8.4 \text{ plg}$$

Determinación de distancia entre centros C:

$$C = \frac{(D + 3d)}{2} \quad (64)$$

$$C = \frac{(8.4 + 3(2.8))}{2}$$

$$C = 8.4 \text{ plg}$$

Se establecerá una distancia entre centros de 13 plg:

Ahora se calcula la longitud de la banda (L):

$$L = 2C + \frac{p(D + d)}{2} + \frac{(D - d)^2}{4C} \quad (65)$$

$$L = 2 * 13 + \frac{p(8.4 + 2.8)}{2} + \frac{(8.4 - 2.8)^2}{4(16)}$$

$$L = 44.08 \text{ plg}$$

Se obtiene una faja estandarizada más cercana:

A46 L' = 46 pulgadas (Ver Anexo 4 Tabla I)

En consecuencia la nueva distancia entre centros será:

$$C' = C + \frac{(L'-L)}{2} \quad (66)$$

$$C' = 13 + \frac{(46 - 44.08)}{2}$$

$$C' = 13,96 \text{ plg}$$

Se calcula seguidamente el número de bandas. La velocidad tangencial de la polea menor viene dada por:

$$V = \frac{p * d * N}{60} \quad (67)$$

$$V = \frac{p * 2.8 * 2.54 * 1800}{60}$$

$$V = 670.29 \frac{m}{\text{min}}$$

Con la relación de $D/d = 3$, se obtiene $K_d = 1.13$ (Ver Anexo 5)

Para la sección "A" los valores de las constantes para potencia nominal son, (Ver anexo 4):

$$a = 2.684; c = 5.326; e = 0.0136$$

A continuación se indica la ecuación (68) la cual sirve para calcular el valor de la potencia nominal en Kw por banda.

$$Pot. nominal = \left[2.19 * a * \left(\frac{10^3}{V} \right)^{0.09} - \frac{6.2 * c}{(K_d * d)} - \frac{26.26 * e * V^2}{10^6} \right] * \frac{V}{1000} \quad (68)$$

Reemplazando los datos en la expresión mencionada se tiene el siguiente valor de potencia:

$$Pot.nomin al = \left[2.19 * 2.684 * \left(\frac{10^3}{671.29} \right)^{0.09} - \frac{6.2 * 5.236}{(1.13 * 2.8 * 2.54)} - \frac{26.26 * 0.0136 * 670.29^2}{10^6} \right] \frac{670.29}{1000}$$

$$Pot.nomin al = 1.330 \frac{Kw}{Banda}$$

Para $(D-d)/C' = (8.4-2.8/13,96)=0,4011$, entonces con este parámetro se determina el valor de $K_? = 0,80$; $K_L = 0,92$, (Ver anexo 6 y 7)

La potencia nominal ajustada es, de acuerdo a ⁽³⁷⁾:

$$Pot. Nominal ajustada = Pot. .nominal * K_? * K_L \quad (69)$$

Por lo tanto se tiene la siguiente potencia ajustada:

$$Pot.nomin alajustada = 1.330 \frac{Kw}{Banda} * 0.80 * 0.92$$

$$Pot.nomin alajustada = 0,9788 \frac{Kw}{Banda}$$

Finalmente el número de bandas es:

$$\# bandas = \frac{P_H * factor de servicio}{Pot.nomin alajustada} \quad (70)$$

$$\# bandas = \frac{0.92 * 1.25}{0,9788}$$

$$\# bandas = 1.1 \sim 1 \text{ banda}$$

De tal manera que el sistema de transmisión está dado por una banda en V (A46).

3.5.- Justificación técnica económica de la turbina

El análisis económico del proyecto se realiza como una orientación en los costos que resultaría en construir o importar este tipo de centrales hidro. Pero la parte financiera estará encaminada a determinar el tiempo de recuperación de la central de generación

Para realizar el análisis técnico económico de la turbina se ha visto conveniente cuantificar todos los componentes de pico hidro y analizar en conjunto ya que las cotizaciones en la mayoría de las empresas constructoras en el exterior expresan costos de la picocentral en conjunto.

Tabla # 3.12 Costos de Construcción de Picocentral Hidro

OPERACIÓN	Costo Total (USD)
Moldes de Turbina	\$ 40
Fundición de Turbina	\$ 500
Balanceo de Turbina	\$ 200
Estructura	\$ 100
Inyector	\$ 100
Alternador	\$ 100
Componentes extras alternador	\$ 60
Sistema de Transmisión	\$ 20
Eje y Chavetas	\$ 40
TOTAL	\$ 1.160

El consumo diario de una población rural de acuerdo a información del CENACE⁽³⁸⁾ se dice que es 3.2 Kw – hora. Por lo tanto anualmente se tiene:

$$\text{Consumo mensual} = \text{Consumo diario} * 30 \quad (71)$$

⁽³⁸⁾ Informe anual del CENACE 2004 a 2005 Pág. 53 www.cenace.ec.gov.com

Consumo mensual = 3.2 Kw – H * 30

Consumo mensual = 96 Kw – H por mes

Según ⁽³⁸⁾ el valor del Kw – H es de \$ 0.09813 el cual están cobrando las empresas eléctricas a nivel Ecuador.

A continuación se calcula el costo que se tendría del consumo mensual si se comprara la energía a la empresa eléctrica.

Costo mensual = 96 Kw – H * \$ 0.09813 = \$ 9.42

Finalmente se analiza cual va ser tiempo de recuperación del proyecto. El tiempo de recuperación se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$PV = I = A * \frac{(1 - (1 + i)^{-n})}{i} \quad (72)$$

Donde:

i = Taza de recuperación

I = Valor de inversión

A = Valor de costo mensual del Kw – hora.

i = TIR = 8 % anual nominal

$i_m = 0.67 \% = 0.0067$

Por lo tanto se tiene:

$$1000 = 9.42 * \frac{(1 - (1 + 0.0067)^{-n})}{0.0067}$$

$$(1.01)^n = 1 - \frac{7.772}{9.42}$$

$$(1.01)^n = 0.17$$

$$\ln(1.01)^n = \ln 0.17$$

$$n = \frac{\ln 0.17}{\ln 1.01}$$

$$n = 175.197 \text{ meses} \sim 14 \text{ años}$$

Este tiempo calculado indica que va ser largo el plazo de recuperación de la inversión por mantener un costo de Kw – hora bajo el cual es cubierto en las empresas eléctricas por los subsidios que el gobierno cobija para que estos costos no sean altos; y sobre todo el valor del consumo se a calculado de carácter constante aunque esto no debe ser cierto en la práctica, pero sin embargo el proyecto se paga solo con la venta de energía.

En cuanto a la fabricación de picocentrales hidro en otros países como Perú, Colombia, Estados Unidos, entre otros a continuación se detalla los costos de picocentrales de algunas empresas.

Tabla # 3-13 Lista de precios de algunos fabricantes de sistemas pico hidro

Características	Empresa Constructora	País	Costo
0,5 Kw Automotriz CC, 12 V	3 HC Centrales Hidroeléctricas	Perú	\$ 1.350
1 Kw Inducción CA, 2f, 60 Hz, 220V	3 HC Centrales Hidroeléctricas	Perú	\$ 2.100
Turbinas de baja altura	Turbinas Harris	EEUU	\$ 1.500

Fuente: Página electrónicas Internet [17] y [17-1]

Comparando el valor de la picocentral de algunos constructores se puede apreciar que la pico hidro del proyecto resulta más económica construirla en nuestro país, pero es importante mencionar que las picocentrales de los fabricantes tienen mayor durabilidad y rendimiento.

Las empresas que fabrican estas centrales poseen una amplia experiencia, lo cual se refleja en el caso de que se requiera construir un central de gran potencia, entonces resultaría insuficiente las alternativas de la localidad.

El proyecto pretende generar alternativas de inicio para que con el tiempo se pueda construir pico hidro con mejores características de funcionamiento, rendimiento y principalmente de menor costo.

CAPITULO IV: DIMENSIONAMIENTO ELÉCTRICO

4.1.- Justificación de selección

Con respecto al alternador automotriz el criterio de selección para el empleo del mismo se hace una comparación inicial con el dinamo; de lo cual se debe considerar al alternador por las siguientes causas:

- Bajo costo
- Amplia existencia comercial de los componentes del alternador
- Mínimo mantenimiento del alternador ya que el dinamo necesita un control periódico de escobillas y otros componentes.

A pesar que el dinamo tiene otras ventajas, las cuales no son importantes a la hora de decidir en la selección ya que no son ventajas que influyan en el funcionamiento para la aplicación que se pretende darle al generador.

El alternador síncrono, desde hace mucho tiempo, es el más importante dispositivo de conversión de potencia electromecánica y es pieza clave en la producción de electricidad.

Como se puede apreciar en el Capítulo II una comparación de generadores lo cual resume que el generador síncrono tiene grandes bondades pero una desventaja de control de frecuencia lo cual impide el montaje de la pico central con este alternador ya que se requeriría la ubicación adicional de un servomecanismo de regulación y por ende se incrementaría el costo del proyecto.

El alternador automotriz es aquel de producción en serie para acoplarse a motores diesel o gasolina y que tiene características expuestas en el Capítulo II y siendo importante mencionar las ventajas más determinantes para la selección:

- Bajo costo
- Amplia existencia comercial de los componentes del alternador
- Mínimo mantenimiento.
- Se suprime la parte más compleja del control de la frecuencia, por medio de servomotores o de control por medio de elementos mecánicos.
- La energía puede ser acumulada en baterías y entonces con el inversor se puede usar una potencia mayor que de la turbina. En éste caso se usa la potencia de la turbina, más la potencia de las baterías.

Selección

Por todas las comparaciones realizadas se puede resaltar lo siguiente para demostrar cual ha sido el generador seleccionado:

- Potencia para picocentral requerida baja ya que es para uso rural
- Bajo costo y alto rendimiento
- No necesita ningún mecanismo de regulación especial para controlar la frecuencia.
- El control que se efectuó al requerimiento de carga se hará por medio del inyector.

Haciendo un análisis se puede determinar que el alternador automotriz es síncrono y lo único adicional que posee son filtros a la salida para generar corriente continua, esto hace que algunas ventajas mencionadas posea también el alternador DC del generador síncrono.

Considerando todo lo mencionado la selección determina que el generador escogido para la pico hidro ha sido el **alternador automotriz DC**.

Sin embargo el alternador automotriz que se ha seleccionado para acoplarse a una turbina hidráulica debe considerar los siguientes factores:

- a) Construcción con dos cojinetes, dimensionados para trabajar con esfuerzo radial como estándar (trabajo con poleas) y / o empuje axial cuando se solicite de manera que pueda trabajar con eje vertical. Vida estimada entre 20000 y 100000 horas.
- b) Velocidades sincrónicas de 1800 RPM o menos para acople directo o indirecto a la turbina.
- c) Bobinas rotativas aseguradas para soportar velocidades de embalamiento de 200 % en no menos de 15 minutos.
- d) Servicio de operación a 100 % de carga por 11 horas más 110 % de carga o sobrecarga por 1 hora y así sucesivamente, 24 horas al día.
- e) Factor de potencia 0.8 o lo que se indique.

4.2.- Características técnicas del equipo

Para este proyecto se ha considerado el empleo de un alternador automotriz para un automóvil de marca MAZDA, el cual posee las siguientes características:

- Marca del alternador YUKI - FEHE – 18 – 300
- Su origen de construcción Japón
- Regulador incorporado
- Voltaje de operación: 12 – 14 Voltios
- Corriente de Trabajo: 55 a 60 Amperios
- Case tipo B
- Diámetro de la polea 75 mm
- Peso del alternador 6,5 Kg

4.3.- Señal obtenida

La señal obtenida según el alternador automotriz seleccionado es de corriente continua de 12 Voltios DC, el valor de la corriente estará en función de la carga que la picocentral genere.

Los valores de la señal obtenida serán cuantificados y registrados por medio de un osciloscopio. Por lo tanto se podrá obtener curvas de funcionamiento del alternador en conjunto con la batería, regulador, y filtro o diodos.

CAPITULO V: IMPLEMENTACIÓN DE LA PICOCENTRAL HIDRÁULICA

5.1.- Planos de Construcción

Descripción de la Picocentral Hidráulica a ser montada

Componentes Externos:

- Captación de agua ha sido tomada del agua que es almacenada a la salida de la central Illuchi1
- Derivación es el tipo de captación empleada.
- Desarenador se encuentra en la salida de la central de illuchi1.
- Cámara de carga se le ha considerado el tanque de reserva para refrigeración de los cojinetes de la central Illuchi 2.
- Tubería presión seleccionada ha sido de 2 pulgadas, la cual esta conectada del tanque de presión a la turbina.
- Casa de máquinas se ha visto adecuado ubicarla a lado de la turbina.
- La altura mínima de operación es 10 metros
- Caudal 0,64 m³/s
- Altura Neta 15.64 m

Componentes Internos:

- Carcaza diseñada en función al diámetro de chorro
- Microturbina tipo Pelton, fabricada en aleación de Bronce de 250 mm de Diámetro primitivo, con 19 cucharetas.
- Un chorro de 22 mm de inyector
- Eje de 25 mm de diámetro de Acero Inoxidable
- 2 Chumaceras de 25 mm
- La potencia de generación va desde 50 a 700 W
- El acople turbina alternador empleado es por medio de poleas
- Alternador YUKI

- Luz piloto
- Válvula de compuerta a la salida del tanque de presión
- Voltímetro
- Amperímetro
- Cables de batería
- Unión a tubería de presión

En el Anexo1 se muestra los planos de detalle, con las especificaciones respectivas, de la turbina, geometría de la cuchara, geometría de la aguja del inyector, inyector, eje y toda la picocentral hidro en conjunto.

5.2.- Montaje de la Picocentral Hidroeléctrica:

A continuación se presenta los pasos más importantes que se efectuaron en el proceso de instalación de la turbina pelton con sus respectivos componentes.

A pesar de la pequeña potencia de esta máquina (0,68 Kw) sus dimensiones y peso son grandes comparadas con las micro turbinas de menores caudales y alturas, por lo tanto se requiere una manipulación cuidadosa durante la instalación, que no solo permitirá un buen montaje de la máquina si no que adicionalmente se vera un funcionamiento confiable.

5.3.- Cimentación y Anclaje

El proceso de montaje de la turbina pelton se inicia con la cimentación de la turbina, esta cimentación debe realizarse considerando las fuerzas producidas durante el funcionamiento a plena carga, para ello tiene que estar bien anclada la estructura soporte de la turbina y demás componentes

La turbina está provista de una carcasa, la misma que esta dotada de apoyos para el anclaje, estos apoyos tienen agujeros para pernos de ½ pulgada que van asegurados al piso, en estos pernos se asegura la carcasa,

previa cimentación. Para la cimentación se utiliza concreto armado, pero en el caso del proyecto se ha provisto una base la misma que será sujeta al piso y a las patas de la pico central.

La turbina ha sido sujeta a la base por medio de pernos de $\frac{1}{2}$ pulgada, y estando sujeta a 2 chumaceras, las mismas que alojan al eje principal de 1 pulgada, y dando como consecuencia la mejor fijación de la turbina.



Figura # 5-35 Cimentación de Patas de Pico central

5.4. - Nivelado

Inicialmente con la ayuda de un tecla se proceda a nivelar la carcasa y estructura base, pero finalmente se comprueba con un nivel la correcta ubicación de la carcasa, base y turbina, caso contrario ubicar alzas hasta lograr la posición correcta.

Cumpliendo lo antes mencionado se procede a sujetar completamente los pernos.



Figura # 5-36 Método empleado en la nivelación del proyecto

5.5.- Acople Turbina – Tubería de Presión y válvulas de protección en el sistema

La unión de la turbina con la tubería de presión se acopla mediante una universal, acople de tubería PVC 2 pulgadas, accesorios que están conectadas por medio del inyector bronce de 2 pulgadas, la misma que se encuentra sujeta en la carcasa por medio de pernos regulables, los mismos que tienen como objeto buscar el acercamiento o alejamiento del inyector y turbina. A continuación se tiene el inyector con la aguja y boquilla e inyector.



Figura # 5-36 Conjunto Inyector (Boquilla aguja)

También es necesario colocar una válvula para el control de agua a la turbina y se instala inmediatamente antes de la unión válvula tubería de presión la cual permita manipulaciones en la turbina en caso de alguna avería, o con efectos de mantenimiento.



Figura # 5-37 Turbina - Inyector

Una vez alineadas las partes, se ajusta o sujeta por medio de abrazaderas



Figura # 5-38 Turbina – Tubería de Presión y válvulas de protección

También es importante alinear la tubería con respecto a la turbina con el inyector para poder aprovechar al máximo la transformación de energía.

5.6.- Instalación de Rodete y Accesorios en los Apoyos

Después de haber instalado la carcasa y base con una correcta cimentación y un buen nivelado se procede a realizar el ensamble de los componentes de la turbina, primero se instala el inyector, carcasa, por medio de pernos.

El rodete va ensamblado en el extremo inferior del eje, asegurado con una chaveta de sección transversal cuadrada, estando el eje apoyado sobre dos rodamientos que soportan esfuerzos radiales, soportes que están apoyados en la base.

Para la transmisión de movimiento y potencia, en este caso, se utiliza una transmisión flexible de polea. La polea motriz va instalada en el eje entre los

dos apoyos (rodamientos), cuya instalación se asegura con una chaveta de sección transversal cuadrada y la polea.

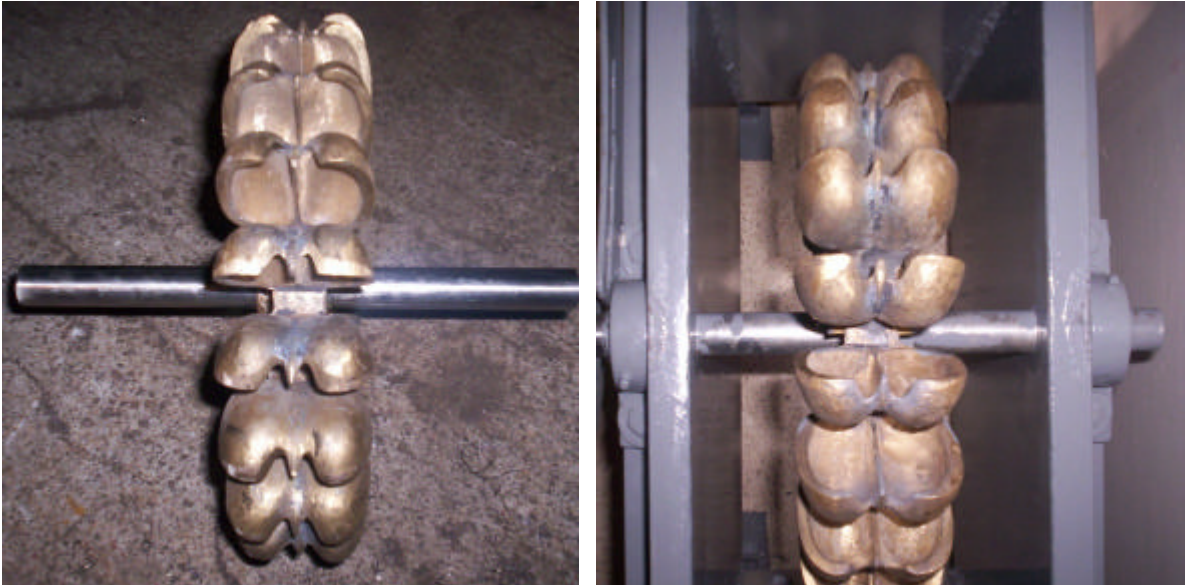


Figura # 5-39 Instalación de Rodete y Accesorios en los Apoyos

La secuencia de ensamble de los componentes que van en el eje es la siguiente:

- Rodete en conjunto con eje
- Retenedores y empaques en carcasa
- Apoyo de rodamiento exterior para eje porta rodete
- Polea motriz

Cada una de estas piezas se ensamblan en la posición adecuada tal como lo indica en los planos.

5.7.- Acoplamiento alternador turbina

La instalación o montaje del generador se realiza sobre la base, junto con la carcasa de la turbina. Para facilitar el desplazamiento del alternador

(templado de las fajas) se utiliza una plancha de acero con una guía, en donde el generador se mueve libremente.



Figura # 5-40 Acoplamiento alternador turbina

5.8.- Templado de Bandas

El ajuste de la banda se realiza mediante el libre movimiento del alternador hasta obtener un temple adecuado y finalmente se sujeta por medio de un perno en la guía y así anular toda posibilidad de que el alternador pueda moverse.

5.9.- Puesta en marcha de alternador y componentes adicionales

Una vez situado el alternador se ubica los accesorios adicionales, en este caso se ubicará la batería, fusibles, amperímetro, voltímetro en la casa de máquinas la cual se encuentra en la parte occidental de la picocentral,

5.10.- Pruebas antes de la puesta en marcha

Después de haber realizado el montaje de la turbina y generador, y antes de proceder a iniciar el funcionamiento, se ha realizado algunas pruebas o

verificaciones con la finalidad de ver la sensibilidad del conjunto, detectar algunos sonidos raros, o algunos inconvenientes que puedan presentarse, para ello hay que hacer girar al eje y su conjunto manualmente unos minutos y analizar minuciosamente y detenidamente las cosas extrañas que puedan suceder.

Una vez verificado que no hay inconvenientes, se ha abierto parcialmente el inyector de agua por unos minutos, en este lapso de tiempo se estuvo pendiente de las cosas que puedan ocurrir, y también se escuchó si existen algunos ruidos inadecuados.

Se verificó la temperatura de los rodamientos, fugas de agua, o algún imprevisto y como consecuencia se dio la respectiva corrección

Finalmente después de realizar todas las correcciones necesarias se puso en marcha la Picocentral.

Los rodamientos deben estar perfectamente alineados para facilitar la libre rotación del eje.



Figura # 5-41 Pruebas antes de la puesta en marcha

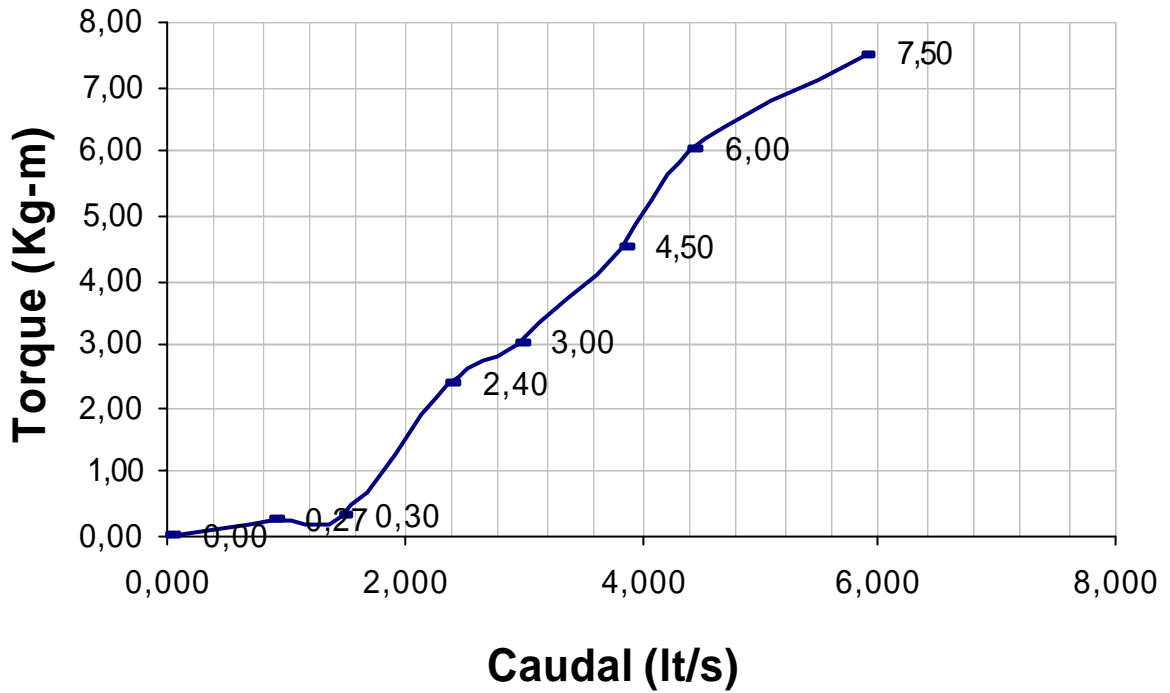
5.11.- Resultados obtenidos

Para determinar los resultados obtenidos cabe recalcar que la picocentral debe estar en marcha de lo cual arroja los siguientes resultados, los mismos que serán analizados exhaustivamente, y así poder reflejar las características que la central ha logrado obtener.

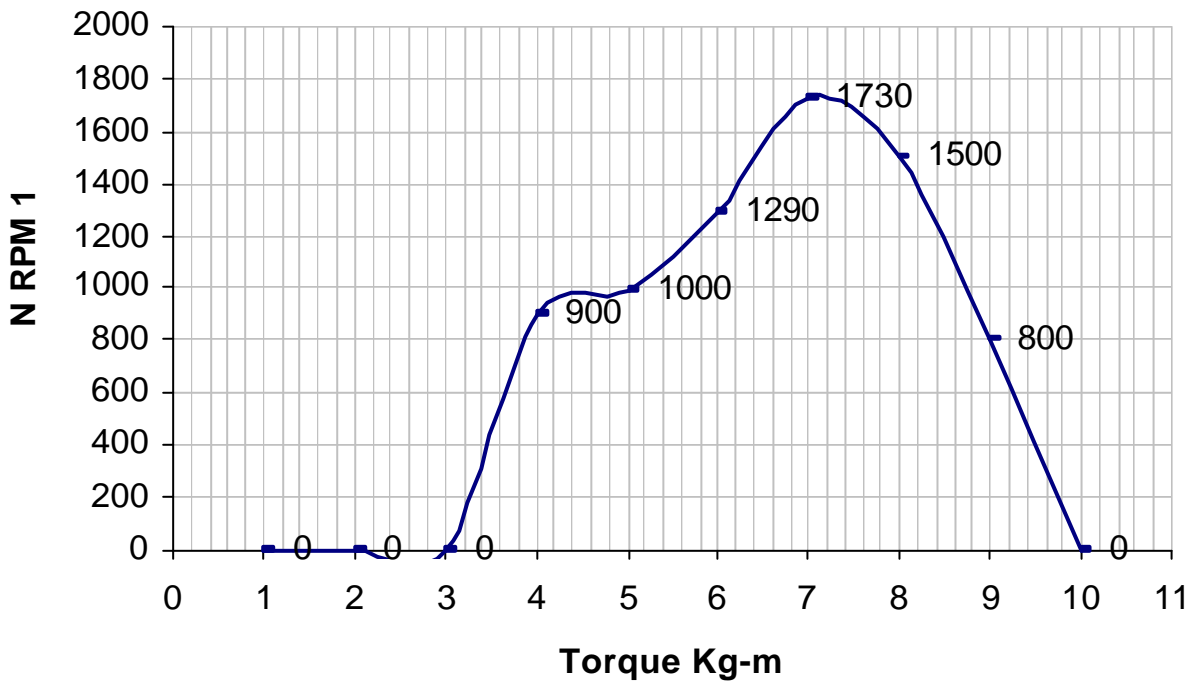
DATOS OBTENIDOS EN LAS PRUEBAS DE LA PICOCENTRAL HIDRO

Apertura	Número	Q	Peso	N	N	Torque	Distancia	V	P.	I
%	Vueltas	(lt/s)	(Kg)	(RPM)	Carga (RPM)	(Kg-m)	(m)	(V)	(W)	Medido (A)
0	0,00	0,000	0,00	0	0	0,00	0,3	14	0	0
15	0,90	0,881	0,90	900	900	0,27	0,3	13	324,324	24,948
25	1,50	1,468	1,00	1200	1000	0,30	0,3	12,2	360,360	29,538
40	2,40	2,350	8,00	1750	1290	2,40	0,3	12,1	540,541	44,673
50	3,00	2,937	10,00	1800	1730	3,00	0,3	12	495,495	41,291
65	3,90	3,818	15,00	1780	1500	4,50	0,3	12	540,541	45,045
75	4,50	4,406	20,00	1750	800	6,00	0,3	11,9	450,450	37,853
100	6,00	5,875	25,00	1700	0	7,50	0,3	11,8	409,910	34,738

5.11.1.- Variación Caudal - Torque

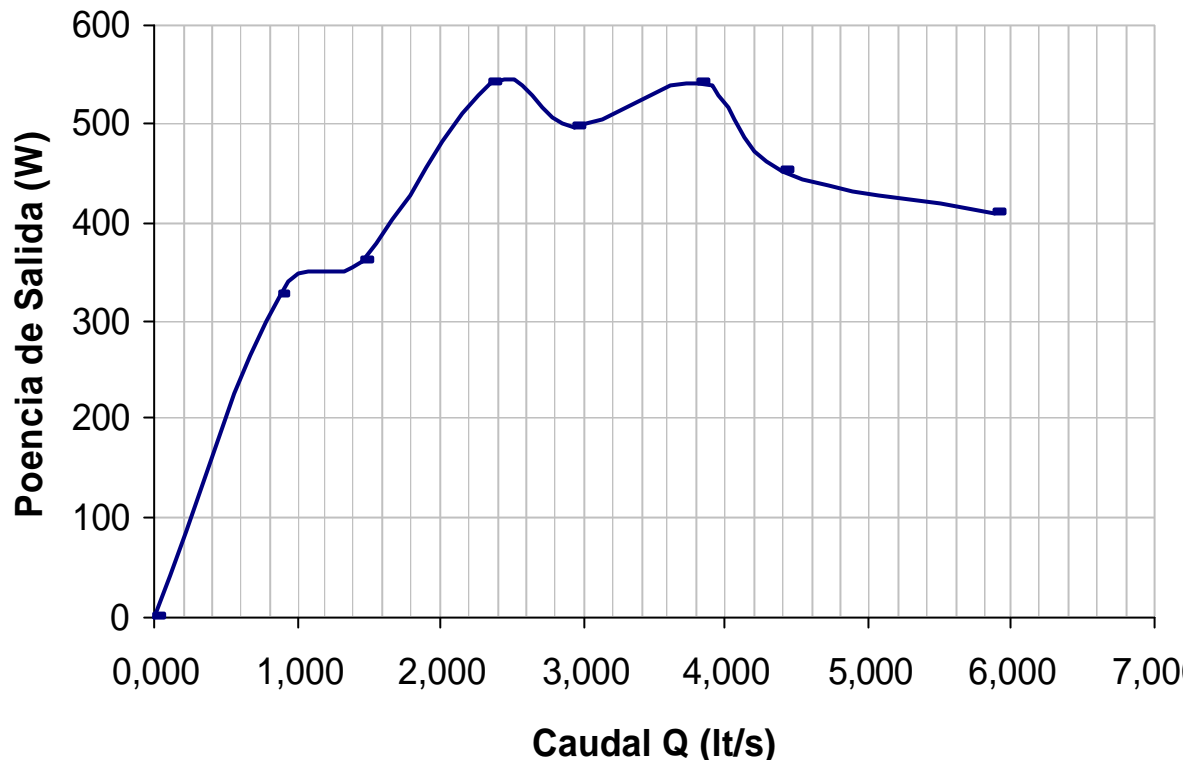


Torque VS RPM Con carga



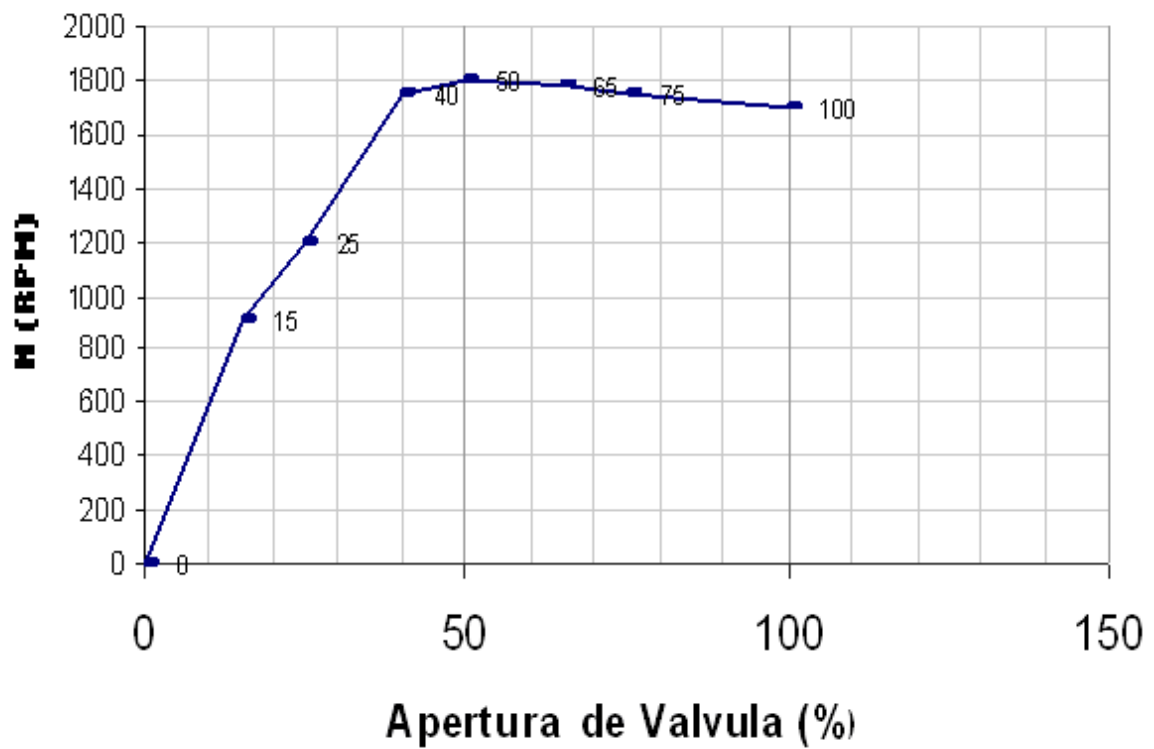
Gráfica # 5.14 Variación Caudal - Torque

5.11.2.- Variación Caudal - Potencia de Salida W



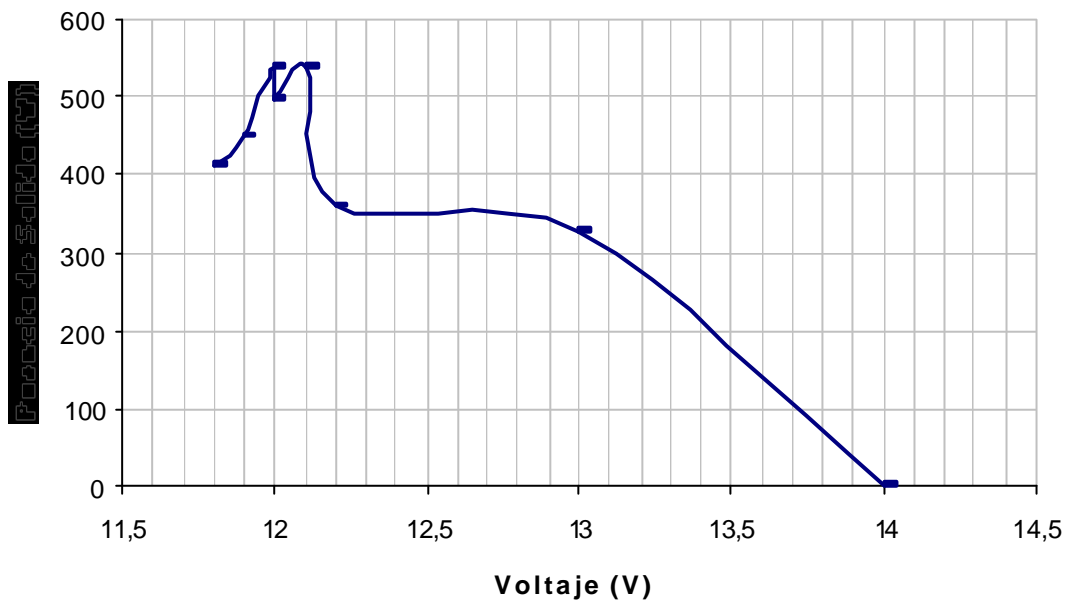
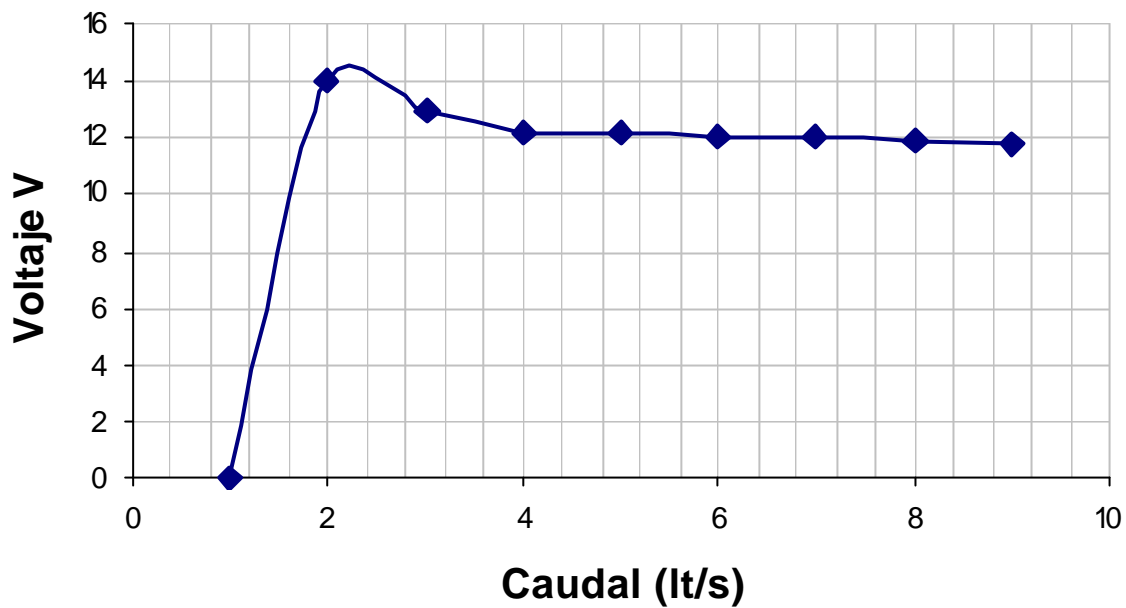
Gráfica # 5.15 Variación Caudal - Potencia de Salida W

5.11.3.- Variación Caudal - RPM



Gráfica # 5.16 Variación Caudal - Velocidad RPM

5.11.4.- Variación Caudal - Voltaje medido Generado



Gráfica # 5.17 Variación Caudal - Voltaje medido Generado

5.11.5.- Análisis de Resultados

La mayoría de los datos obtenidos han sido de carácter experimental los cuales reflejan claramente el comportamiento que tiene la turbina y demás componentes.

Inicialmente se ha determinado el caudal en porcentaje en función del número de vueltas del inyector. El caudal fue medido por medio de un aforo a la salida del inyector.

El torque se determinó por medio de una distancia en (m) de 0.30 y con una graduación de pesos.

El número de RPM se midió por medio de un Tacómetro y se efectuó dos lecturas, una sin pesos y otra toma de datos con pesos, lo cual dio como respuesta un N carga (RPM).

La potencia de salida que se encontró se determinó por medio de amperímetro y voltímetro que están ubicados en la casa de máquinas (Ver Figura # 5.41).

El torque de la máquina según la Gráfica # 5.14 tiene un valor máximo de 7.5 Kg-m con un $Q = 5.875$ lt/s y alcanzando una velocidad de 1730 RPM, pero a un caudal de 3.818 lt/s logra tener un $T = 4.50$ Kg-m, dando como referente que la turbina en función de la carga tiene un valor admisible desde 40 % a 60 % de caudal; es decir no hace falta que funcione a la pico hidro a 100 % de caudal

La potencia de salida de acuerdo a la gráfica # 5.15 Variación Caudal - Potencia de Salida, muestra el valor de potencia de salida = 540.541 W, con un caudal de 2.340 lt/s, y con una potencia teórica de entrada = 680 W, se puede encontrar el rendimiento de la pico hidro:

$$\eta = \frac{P_s}{P_e} * 100 \quad (73)$$

$$\eta = \frac{540.541}{680} * 100 = 79\%$$

El rendimiento encontrado esta en el orden del 79 % lo cual muestra el correcto diseño y dimensionamiento de la turbina.

A partir del 25 % al 50 % de caudal se tiene un valor de velocidad estable desde 1200 a 1800 RPM, lo cual muestra que este tipo de turbina puede trabajar con un caudal bajo sin ningún inconveniente, (Ver Gráfica # 5.16 Variación Caudal - Velocidad RPM).

Por ser un alternador automotriz se tiene un voltaje casi constante, según la Gráfica # 5.17 Variación Caudal -Voltaje medido Generado, se observa que en ausencia de movimiento el voltaje de la batería cargada esta en el orden los 14 V pero a medida que la carga va ingresando se tiene una caída del voltaje hasta 11.8 V, valor que paulatinamente por la acción del alternador es compensando a un valor constante de 12 V.

5.12.- Manual de operación y mantenimiento

La implementación de micros, picocentrales hidráulica requieren de la inversión de un gran capital. A fin de recuperar está inversión en el plazo previsto la central debe funcionar todo el tiempo posible, pero a ello se debe restar el tiempo programado de paradas por diversos motivos, incluyendo las que corresponden al tiempo dedicado al mantenimiento.

Esto es posible solo con una adecuada operación del sistema y programa de mantenimiento bien planificado que efectivamente sea llevado a la práctica.

Por lo tanto se puede decir que en algunas microcentrales no se comprende la cualidad del mantenimiento preventivo, de lo cual cabe indicar las siguientes causales:

- Ausencia de recursos financieros
- Falta de conocimientos para la ejecución de actividades de mantenimiento.
- Inexistencia de programas claros de mantenimientos.

También es importante indicar que genera problemas la inadecuada operación.

Por lo tanto a continuación se especifica los procedimientos y actividades de mantenimiento de una manera secuencial de acciones, que se repiten periódicamente y encargándose de esta actividad una persona, que en si puede ser el operador.

Es importante indicar que las acciones de mantenimiento y operación se han elaborado en base a la experiencia acumulada en la realización de este proyecto y en función de otros manuales de operación y mantenimiento.

Acciones de Mantenimiento Bocatomas

La presa es una estructura de concreto a lo ancho del río que requiere un mínimo de mantenimiento, ya que épocas de grandes lluvias, los ríos traen consigo piedras, arena vegetación y por consiguiente estos materiales pueden bloquear la entrada de agua al canal, por lo que será importante que se retire dichos residuos.

Pueden existir rajaduras o filtraciones en la presa, y pudiendo observar mejor en época de estiaje. Durante esta época se deben realizar los trabajos de resane, si ello no fuera posible, se puede impermeabilizar temporalmente las filtraciones con sacos de arena.

Acciones de Mantenimiento Canales

La picocentral tiene canales para llevar el agua de la bocatoma a la cámara de carga. El canal empleado es de concreto.

Una de las consideraciones a tomar es la velocidad con la que circula el agua, por tal motivo en el caso de que la velocidad se incremente a la cual fue diseñada, puede erosionar rápidamente el canal y la corriente. Al ir demasiado lento el agua tiende a sedimentar los sólidos en la superficie, por tanto, es conveniente mantener la velocidad entre los límites designados.

El canal debe ser inspeccionado periódicamente, cuidando remover piedras, vegetación y sedimentos.

Las acciones de mantenimiento en el canal debe estar orientado a prevenir fugas y repararlas tan pronto como ellas aparezcan. Los acueductos también deben ser inspeccionados en sus soportes y estructura en general.

Acciones de Mantenimiento Cámaras de carga

La cámara de carga es el punto donde se conecta la tubería de presión, por consiguiente es importante que el único elemento que pase sea el agua y que cualquier otro objeto, dependiendo de su dimensión, podría causar la disminución de la potencia, al quedarse atorado en un intersticio de la turbina.

Se debe inspeccionar el rebosadero y soportes para determinar daños que puedan ocurrir con el tiempo, como es el caso de las rajaduras o deslizamientos de la cimentación.

Acciones de Mantenimiento Tubería de presión

La tubería de presión lleva el agua de la cámara de carga hacia la turbina. En la Picocentral se tiene tubería PVC la cual no debe estar expuesta a los

rayos del sol, debido al prematuro envejecimiento que provoca los rayos ultravioleta en el PVC, por esta condición es importante elaborar zanjas o cubiertas, que también aislaría posibles golpes.

Es de suma importancia verificar el estado de las uniones, considerando la presencia de drenajes laterales para conducir aguas de lluvias que de otro modo podrían socavar el terreno provocando deformación y rotura de la tubería.

Acciones de Mantenimiento Válvulas

Las válvulas tienden a presentar fugas, por lo que se debe comprobar que exista dicho efecto y en caso de haberlo ajustar las prensas de la válvula hasta eliminar las fugas, en caso de persistir cambiar dicha válvula.

Las válvulas están diseñadas para trabajar en una determinada posición, es decir cerrada o abierta nunca en posición media debido al desgaste prematuro del elemento obturador.

Comprobar que si no hay cierre hermético se debe a que los asientos del obturador y el asiento se han desgastado, por lo que habrá que desmontarla y arreglarla.

Acciones de Mantenimiento en la turbina

En este caso la turbina Pelton, requiere poco mantenimiento en la medida en que el agua se mantenga limpia, situación que se cumple en un porcentaje aceptable en la pico central.

Si el agua llegare con algún objeto que incruste en el inyector de la turbina, será necesario desmontar el inyector y extraer el objeto.

Otro parámetro de vital importancia son los rodamientos o apoyos al eje: se debe estar alerta ante la ocurrencia de ruidos extraños o sobrecalentamiento, pues estos son indicadores que algo anda mal.

De otro lado el desgaste de el rodete aguja tobera ocurre a lo largo de el tiempo, por lo que será necesario realizar una inspección anual rigurosa que proporcione información y de cual se podrá conocer el avance de desgaste.

Si la turbina tiene falta de agua, sobre velocidad, rotura de la banda, nivel de aceite en los rodamientos o por otra causa, es importante realizar una prueba de funcionamiento anual, para lo que habrá que simular la ocurrencia de la falla y verificar el correcto funcionamiento del sistema.

Acciones de Mantenimiento Fajas y poleas

El acoplamiento por ser indirecto se debe inspeccionar vibraciones a causa de desalineamientos, tensiones excesivas de fajas y ajuste de pernos de sujeción de chumaceras y templador de banda.

El templado de la banda se debe apreciar en función al fabricante, el que recomiende una máxima flecha de deformación al ser aplicada una fuerza determinada.

También se debe revisar el estado del lubricante y su correcto funcionamiento.

Los rodamientos requieren poca atención: periódicamente se realizará un engrase y proceder al recambio en cuanto hayan culminado el número de horas de trabajo que el fabricante del equipo especifique.

Para el cambio de rodamientos se debe preferentemente usar un extractor de rodamientos y tener las máximas precauciones tanto en la manipulación del rodamiento como en su montaje.

Cada cierto tiempo habrá que realizar el recambio de grasa, ya que el exceso de la misma puede causar calentamientos.

Acciones de Mantenimiento alternador y componentes adicionales

Es necesario realizar en los alternadores automotrices inspecciones, debiendo poner atención en detección de polvo, humedad, o grasa en su interior, por efectos perjudiciales que pueden tener sobre las bobinas del estator y del rotor. Igual atención requieren el estado de las escobillas o carbones del colector, el desgaste del mismo y la limpieza del polvo que dejan los carbones al desgastarse.

Componentes Eléctricos:

El excesivo chisporroteo en el colector ocurre con frecuencia luego de que el generador ha sido sometido a reparación, esto se puede corregirse aflojando el soporte de las escobillas y girando ligeramente el sentido de la rotación del rotor hasta encontrar una posición correcta.

Las escobillas deben ser limpiadas y asentadas con papel lija fina aproximadamente cada 1000 horas de funcionamiento.

Para la limpieza de las bobinas se debe realizar por medio de un solvente dieléctrico. Esta maniobra debe ser efectuada por una persona capacitada en este tipo de acciones.

Un borne flojo se convierte en una mala resistencia, lo que puede ser causa de un quemado del bobinado de fase.

También se considera los niveles de aislamiento, el cual puede bajar por presencia de humedad en el estator

En cuanto a las escobillas se debe revisar el estado de los carbones, longitud, superficie de contacto con el colector.

Se deberá inspeccionar el estado del colector, y rectificar en caso de algún agrietado, rayado, surcado.

Es importante saber que los bobinados resisten una temperatura hasta de 155°C. Los diodos rectificadores no resisten temperaturas mayores a 60°C, por lo que es importante el uso de disipadores de calor al soldar terminales y cables en el momento de cambiarlos. La grasa de los cojinetes se diluye por encima de los 60°C.

Es de vital importancia inspeccionar el nivel de líquido de la batería para no tener desgaste en el funcionamiento por ausencia de dicho elemento, adicionalmente se insiste en que la batería sea asilada la humedad para evitar que los bornes sean sulfatados y genere problemas en la continuidad de la corriente.

Cuando deja de cargar, el problema se limita al alternador; pero, cuando carga demasiado, es muy posible que también la batería sufrió algún daño.

La lectura debe estar entre 12.5 voltios como mínimo y entre 14 y 15 como máximo el exceso estaría indicando una sobrecarga. Una sobrecarga ocasiona daños, a la batería y a todas las partes eléctricas

La batería debe estar totalmente cargada antes de que se le ponga en funcionamiento con el alternador; es decir: 12.6 voltios 100 % de nivel de carga y al estar con un voltaje de 11.8 o menos el nivel de carga es 0 %.

El regulador de corriente, al estabilizar la corriente, mantiene la carga, por encima de las necesidades del funcionamiento; lo que significa, que si se ingresa la carga el regulador ajusta.

Por lo tanto se debe ubicar un voltímetro, a la batería, y, con la carga, el voltaje de carga debe mantenerse; pero si la carga ingresa; y el voltaje de carga disminuye, significa que el regulador, esta defectuoso y deberá ser sustituido.

Los diodos deben ser conectados el ohmetro, entre el terminal de cada diodo y se comprueba si hay una lectura alta y una baja, el diodo esta en buenas condiciones; si las lecturas son similares, se deberá remplazarlo.

La bobina del rotor se debe probar con un ohmetro en la escala de resistencia baja, si la aguja del ohmetro no se mueve significa que el rotor funciona bien, pero si la aguja se mueve quiere decir que la bobina tiene un corto a tierra.

Los alternadores, dejan de trabajar adecuadamente, manifestando sus fallas de dos maneras. Una de ellas, es cuando deja de cargar, y la otra, cuando carga demasiado.

En cuanto al rebobinado es preferible no hacerlo por cuanto el alternador es automotriz y resulta idóneo reemplazar las piezas por su bajo costo de las mismas.

Componentes Mecánicos

Hay que considerar el tiempo de vida de los rodamientos internos del alternador caso contrario se debe tener como referente de 30000 a 50000 horas de funcionamiento.

Revisar el desgaste de la polea del alternador, ya que si hay un elevado desgaste las paredes de la misma ya no tendrán un completo contacto con la banda y se va tener pérdidas y un rápido deterioro en la banda.

Operación de PCH (Pico central Hidroeléctrica)

Es importante mencionar que para una PCH se tendrá un régimen de funcionamiento distinto que una microcentral, mini etc. Por las condiciones de componentes diferentes.

En términos generales, se puede concluir que, por mantenimiento, la picocentral debe paralizarse preferentemente de acuerdo a los criterios de la siguiente Tabla # 5-18

Tabla # 5-18 Paralización de PCH por mantenimiento

EPOCAS	PARALIZAR DURANTE
<ul style="list-style-type: none"> • Durante el año • Durante la semana • Durante el día 	<ul style="list-style-type: none"> • Meses de estiaje • Días de fin de semana • Horas nocturnas, de madrugada o en horas de poca demanda

Fuente: OLADE Manual de Mini y Microcentrales Hidráulicas Pág. 249.

Libro de registro

El libro de registro es un documento que debe permanecer en la PCH, en el se deben consignar las ocurrencias diarias.

Constancias de que novedades en el día y en el caso de mantenimiento que cuando se debe realizar nuevamente esta actividad.

Estos son los argumentos para evaluar la ocurrencia de una falla para la toma de una decisión correctiva, y se considera parte de la PCH.

En este libro se lleva el registro de horas de funcionamiento diario, la lectura del contador de energía (KW - h) debe servir como criterio para evaluación del factor carga.

Consideraciones adicionales en la puesta en marcha de la Picocentral

Es conveniente adiestrar una o más personas para la operación de la planta.

El propietario de la picocentral deberá seleccionar una o dos personas para el cargo y en forma práctica enseñarles el funcionamiento del equipo y como llevar a cabo acciones de mantenimiento.

Pero es indispensable mencionar que este manual pretende acercar de una forma práctica al operador a un sistema pico hidro.

De otro lado es común que el operador sea una persona que habiendo participado en la construcción de las obras, durante su trabajo ha mostrado disciplina y voluntad. Ello, sumado a un par de explicaciones lo convierte en operador. No necesariamente esta es la peor forma de selección; sin embargo se debe poner mayor cuidado en la selección, y tener en cuenta que el cargo requiere de las personas, los siguientes requisitos:

- Saber leer y escribir.
- Habilidades manuales para el manejo de herramientas.
- Capacidad de retención para memorizar secuencias.
- Iniciativa e imaginación para la solución de problemas.
- Capacidad de deducción para distinguir causa y efecto.
- Alto sentido de responsabilidad.

Ahora bien, las funciones del cargo deben especificarse claramente. En la generalidad de los casos, estas funciones implican:

- a) Poner en marcha la turbina bajo condiciones normales.
- b) Parar la turbina bajo condiciones normales.
- c) Súper vigilar el funcionamiento del grupo hidrogenerador.
- d) Llenar el registro diario de funcionamiento y ocurrencia.

- e) Realizar maniobras para el reparto de energía eléctrica y en caso de que la turbina esté acoplada a una máquina, maniobrar sobre la turbina de acuerdo a los requerimientos de potencia de la máquina acoplada o movida.
- f) Paralizar la turbina en caso de anomalías, detectar la causa y proceder a eliminarla, cuando se trate de ocurrencias menores.
- g) Conocer el funcionamiento de los sistemas de protección.
- h) Llevar a cabo acciones de mantenimiento periódicamente y programar los tiempos de repetición.
- i) Realizar las maniobras para un adecuado llenado de la tubería de presión.
- j) Regular la cantidad de agua necesaria en la bocatoma y en la cámara de carga.
- k) Realizar inspecciones en los diferentes componentes de la PCH para la detección de fallas o posible ocurrencia de falla.
- l) Realizar instalaciones y reparaciones eléctricas menores, tomas de corriente eléctrica, fusibles, focos e interruptores.
- m) En caso de accidentes, saber proporcionar primeros auxilios.

Programa de Mantenimiento

El Cuadro especificado a continuación resume las principales actividades a realizarse según la periodicidad. (Ver Anexo 8)

CAPITULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1.- Conclusiones

- En la elaboración de la picocentral se ha podido establecer claramente la carencia en el desarrollo de equipos en el Ecuador para aprovechamiento de energías renovables.
- Este equipo tiene una buena proyección de aceptación en la zona rural, pero también por razones de la elaboración de este proyecto se ha encontrado aplicación de estos en lugares turísticos.
- Al reducir las perdidas se puede obtener mayor potencia, esto da como referente que no hay que considerar a la hora de la selección y diseño solo un alto rendimiento del rodete.
- La turbina Pelton fue la que se ajustó a los datos técnicos del lugar, pero aparte de eso la importancia de haber utilizado este rodete se debe a la eficiencia que la misma posee.
- El acoplamiento realizado en el diseño fue indirecto entre el rodete – alternador, ya que en el proceso de diseño se pudo jugar con la velocidad (RPM), a efecto de controlar los números característicos de potencia y caudal y que por ende se vea reflejado en el empleo de 3 o más chorros.
- En la realización del diseño se logró obtener la mayor parte de dimensiones y características de todos los componentes de la picocentral, pero algunas medidas se las encontró de forma experimental en el proceso de construcción y se las ajustó adecuadamente hasta alcanzar el mejor funcionamiento de la picocentral.

- Los fabricantes de equipos anuncian el valor N_s de sus turbinas. Gran número de estudios estadísticos sobre aprovechamientos muy diversos, han permitido correlacionar, para cada tipo de turbina, la velocidad específica con la altura de salto neto.
- La geometría de la cuchara. número de cucharas, carcasa, inyector están en función del diámetro del chorro, es por eso la gran importancia de no cometer errores en la determinación del diámetro del chorro.
- El tiempo de recuperación del proyecto es a largo plazo de inversión por mantener un costo de Kw – hora bajo, el cual es cubierto en las empresas eléctricas por los subsidios que el gobierno cobija para que estos costos no sean altos; y sobre todo el costo del consumo se a calculado de carácter constante aunque esto no debe ser cierto en la practica, pero sin embargo el proyecto se paga solo con la venta de energía
- Una de las principales fortalezas del proyecto esta constituido en no necesitar un regulador de frecuencia, elemento que encarece enormemente el costo de micro picocentrales, pero en ausencia de este elemento se ha logrado establecer la generación en corriente continua.
- La turbina diseñada y fabricada alcanzó el 79 % de rendimiento el mismo que esta dentro de los rangos aceptables de los fabricantes de turbina Pelton, pero este alto valor se debe al correcto montaje y sobre todo las consideraciones adecuadas en el diseño.

6.2.- Recomendaciones

- Para la determinación del caudal se aplicó el método del aforo, siendo este un procedimiento de una exactitud módica, la cual influencia en que no se aproveche todo el caudal, por lo tanto se recomienda emplear otras técnicas que nos den mayor exactitud en la toma de datos.
- Es importante tener o investigar sobre un estudio completo de hidrología para poder asegurar por lo menos la factibilidad del montaje de la central en dicho lugar.
- Para centrales de mayor potencia es indispensable la realización de un estudio de factibilidad e hidrología.
- Las pérdidas es la contraparte más elocuente ya que cualquier componente adicional genera más pérdidas, por lo tanto es adecuado emplear elementos que generen la menor cantidad de pérdidas en el sistema, ya que se verá reflejado en la eficiencia.
- El diseño del eje debe ser minuciosamente realizado ya que es el principal elemento que tiende a ser afectado en caso de estar mal diseñado.
- Para efectos de la realización de los moldes de la fundición de la turbina se recomienda el empleo de plantillas o galgas elaboradas con el propósito de minimizar al máximo errores en el proceso de la elaboración de los moldes.
- Es importante el empleo de un manual de operación y mantenimiento para no cometer ambigüedades, ya que podrían sacrificar los componentes de la pico hidro tanto en operación y mantenimiento.

- Se debe considerar en el plan de mantenimiento actualizaciones permanentes en los tiempos de funcionamiento para evitar cambiarlos antes de que culminen sus horas de uso.
- En caso de querer construir picocentrales es beneficioso consultar con organismos como el OLADE para poder tener la mayor cantidad de información acerca de la turbina que se pretenda construir.
- El empleo de energía renovable en el Ecuador no es valorado. Por tal razón se espera que éste sea un principio en el aprovechamiento de energías alternativas y que no se considere un proyecto más.

BIBLIOGRAFIA Y PAGINAS ELECTRONICAS

[1] MINISTERIO DE ENERGIA Y MINAS REPÚBLICA DEL ECUADOR
www.menergia.gov.ec

[2] COLECCIÓN CEAC Centrales Hidroeléctricas

[3] MÁQUINAS ELECTRICAS Y TRASFORMADORES DE IRWIN
KOSOW Segunda edición.

[3-1] PÁGINA ELECTRÓNICA AUTOMECANICO.COM
www.automecanico.com

[3-2] PÁGINA ELECTRÓNICA www.codeso.com/mche1.html

[4] Mecánica de Fluidos de MOTT Cuarta edición México – Editorial Prentice Hall, 1996.

[5] KIDDER – PARKER Manual del arquitecto y del constructor. Editorial Hispanoamericana. Decimoctava edición, México, 1998.

[5-1] Guía para el equipamiento electromecánico de pequeñas instalaciones hidroeléctricas. ICONTEC.

[5-2] PÁGINA ELECTRONICA Esquemas para PICO HIDRO Colombia archivo PDF

[5-3] PÁGINA ELECTRONICA Energía renovables E-mail:
info@upme.gov.co y también www.upme.gov.co Bogotá, D.C. - Colombia

[5-4] FACULTAD DE INGENIERIA - LABORATORIO DE MAQUINAS HIDRAULICAS (LA.M.HI.)
CURSO: " PEQUEÑAS CENTRALES HIDRÁULICAS"

[6] Catalogo de la Goulds – GPM 6

[7] C MATAIX. Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas. ED Castillo, Madrid, 1970, 465 – 471.

[8] INTERMEDIATE TECHNOLOGY DEVELOPMENT GROUP ITDG PERÚ – OLADE. Manual de Mini y Microcentrales Hidráulicas (Guía para desarrollo y proyectos) www.itdg.org.pe

[9] APUNTES PARA UN MANUAL DE DISEÑO ESTANDARIZACIÓN Y FABRICACIÓN DE EQUIPOS PARA PEQUEÑAS CENTRALES HIDROELECTRICAS – OLADE Volumen II Turbinas Pelton

[10] Turbomáquinas de Lucien Vivier, Edición Alvin Michel, Paris, 1996, Pág. 350-351

[11] Cálculo de LEITHOLD Tomo II Edición 2002 Editorial San Marcos, Impreso en el Perú, Pág. 195.

[11-1] Geometría Analítica de LEHMANN, 1990 Editorial Limusa S.A. Decimoctava impresión 1993 Impreso en México.

[12] BEER – JOHNSTON. Mecánica Vectorial para ingenieros, Mc Graw – Hill.

[13] J. SHIGLEY. Diseño de Ingeniería Mecánica Mc Gran – Hill Segunda edición, México. 1979, 250- 275, 290 -304

[14] BIBLIOTECA ATRIUM DE LA MADERA TOMO I

[15] I BOHMAN. (Manual de aceros de Colegio Don Bosco).

[16] Informe anual del CENACE 2004 a 2005 pag 53
www.cenace.ec.gov.com

[17] Paginas electrónica Sistemas Hidroeléctricos Harris Altertec
www.altertec.s.a.com

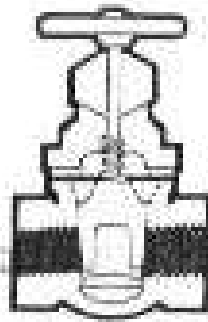
[17-1] Página de empresa peruana de fabricación de centrales Hidroeléctricas 3HC www.turbinas3hc.com

[18] Manual de Selección de Rodamientos de la SKF, Catálogo 3200 Sp. Impreso en Alemania por Carl Gerber, Pág. 27 – 82, 111 – 457.

ANEXOS

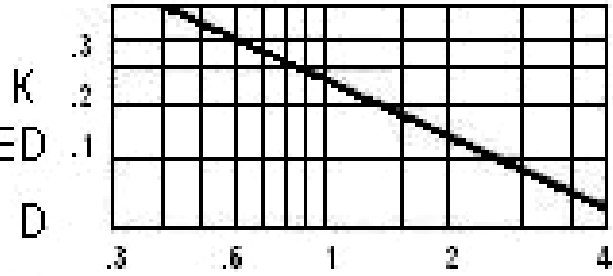
ANEXO 1 PLANOS DE CONSTRUCCIÓN

Anexo # 1.1 Coeficiente de resistencia por válvulas

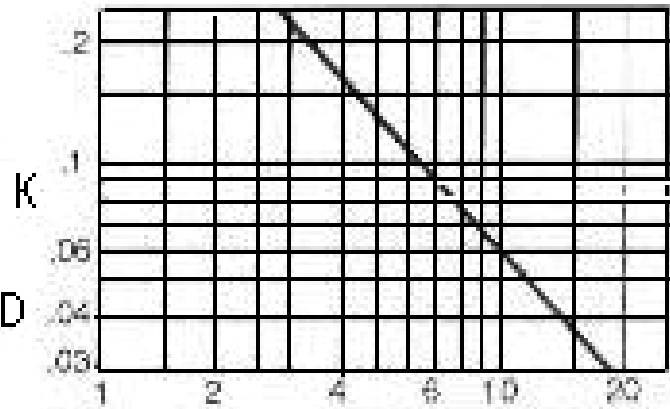


GLOBE VALVE

SCREWED



FLANGED



Fuente: Catálogo de la Goulds – GPM 6. Pág. 643

Anexo # 1.2 Propiedades Del Agua

TEMPERATURA °C	Peso específico ? KN/m ³	Densidad ? (Kg/m ³)	Viscosidad dinámica μ (Pa -s) o (N - s/m ²)	Viscosidad cinemática ? (m ² /s)
0	9,81	1000	1.75×10^{-3}	1.75×10^{-6}
5	9,81	1000	1.52×10^{-3}	1.52×10^{-6}
10	9,81	1000	1.30×10^{-3}	1.30×10^{-6}
15	9,81	1000	1.15×10^{-3}	1.15×10^{-6}
20	9,79	998	1.02×10^{-3}	1.02×10^{-6}
25	9,78	997	8.91×10^{-4}	8.94×10^{-7}
30	9,77	996	8.00×10^{-4}	8.03×10^{-7}
35	9,75	994	7.18×10^{-4}	7.22×10^{-7}
40	9,73	992	6.51×10^{-4}	6.56×10^{-7}
45	9,71	990	5.94×10^{-4}	6.00×10^{-7}
50	9,69	988	5.41×10^{-4}	5.48×10^{-7}
55	9,67	986	4.98×10^{-4}	5.05×10^{-7}
60	9,65	984	4.60×10^{-4}	4.67×10^{-7}
65	9,62	981	4.31×10^{-4}	4.39×10^{-7}
70	9,59	978	4.02×10^{-4}	4.11×10^{-7}
75	9,56	975	3.73×10^{-4}	3.83×10^{-7}
80	9,53	971	3.50×10^{-4}	3.60×10^{-7}
85	9,5	968	3.30×10^{-4}	3.41×10^{-7}
90	9,47	965	3.11×10^{-4}	3.22×10^{-7}
95	9,44	962	2.92×10^{-4}	3.04×10^{-7}
100	9,4	958	2.82×10^{-4}	2.94×10^{-7}

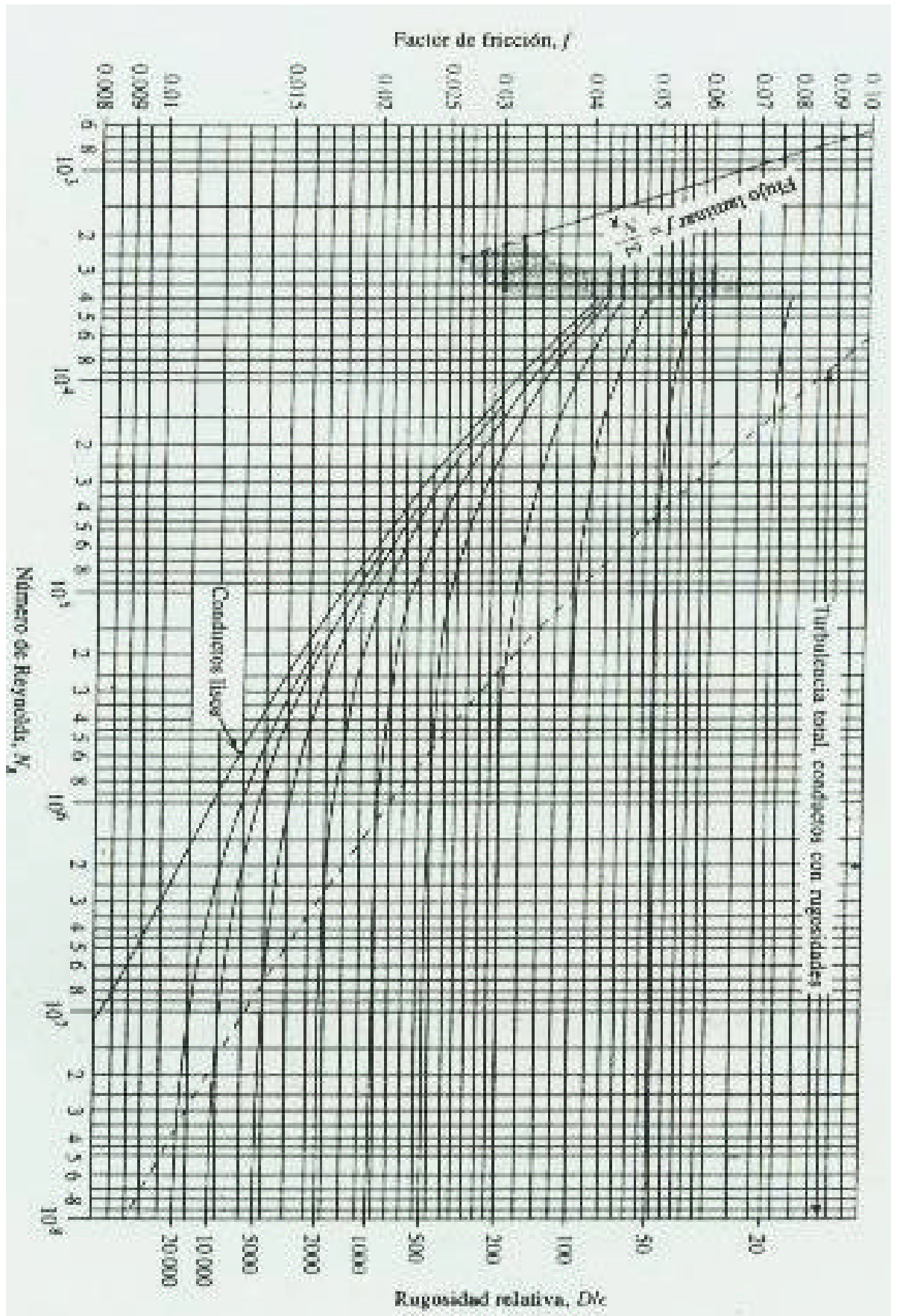
Fuente: Mecánica de Fluidos de MOTT. Pág. 535.

**Anexo # 1.3 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS TUBERIA POLIETILENO
PLASTIGAMA**

DIÁMETRO Pulgadas	ROLLO m	Diámetro exterior mm	Diámetro interior mm	Espesor pared mm	Presión Trabajo lb/pul2
1/2"	100	22,08	15,8	6,28	125
3/4"	100	26,61	20,93	5,68	90
1"	100	32,26	26,04	6,22	72
1.1/4"	100	42,35	35,05	7,3	64
1.1/2"	100	47,53	40,84	6,69	57
2"	100	62,06	52,5	9,56	64
3"	50	90,43	77,93	12,5	57
4"	25	118,66	102,26	16,4	57

Fuente: Manual de características técnicas de PLASTIGAMA

Anexo # 2 DIAGRAMA DE MOODY



Fuente: Mecánica de Fluidos de MOTT. Pág. 241

Anexo # 3 Tabla de Valores Aproximados de Factor de servicio

Transmisión	Grado de irregularidad de la máquina conducida	Máquina Propulsora											
		Motor eléctrico Horas de Funcionamiento diario				Turbinas, motores multi-cilindros. Horas de funcionamiento				Motores monocilindricos. Horas de funcionamiento diarias			
		0.5	3	8	24	0.5	3	8	24	0.5	3	8	24
Engranajes cilíndricos y cónicos, así como ruedas de fricción	I	0.5	0.8	1.0	1.25	0.8	1.0	1.25	1.5	1.0	1.25	1.6	1.75
	II	0.8	1.0	1.25	1.5	1.0	1.25	1.5	1.75	1.25	1.5	1.75	2.0
	III	1.25	1.5	1.75	2.0	1.5	1.75	2.0	2.25	1.75	2.0	2.25	2.5
Transmisión por tornillo sin fin, así como por cadenas	I	0.5	0.75	1.0	1.25	0.7	0.95	1.2	1.45	0.85	1.1	1.35	1.6
	II	0.7	0.95	1.2	1.45	0.85	1.1	1.35	1.6	1.0	1.25	1.50	1.75
	III	1.0	1.25	1.5	1.75	1.2	1.45	1.7	1.95	1.35	1.6	1.85	2.1
Transmisión por Fajas	I	0.5	0.75	1.0	1.25	0.65	0.9	1.15	1.4	0.75	1.0	1.25	1.5
	II	0.65	0.9	1.15	1.4	0.75	1.0	1.25	1.5	0.9	1.15	1.4	1.65
	III	0.9	1.15	1.4	1.65	1.0	1.25	1.5	1.75	1.1	1.35	1.6	1.85

FUENTE: INTERMEDIATE TECHNOLOGY DEVELOPMENT GROUP ITDG PERÚ – OLADE. Manual de Mini y Microcentrales Hidráulicas Pág. 171

Anexo # 4 Tabla de Longitudes normalizadas de correas trapezoidales norteamericanas. Constantes de potencia

SECCIÓN A		SECCIÓN B		SECCIÓN C		SECCIÓN D	
D min = 3 pulg (7,62 cm)		D min = 5,4 pulg (13,71 cm)		D min = 9 pulg (22,86 cm)		D min = 13 pulg (33 cm)	
Correa número	Longitud primitiva pulg (cm)	Correa número	Longitud primitiva pulg (cm)	Correa número	Longitud primitiva pulg (cm)	Correa número	Longitud primitiva pulg (cm)
A26	27,3 (69,3)	B35	36,8 (93,4)	C51	53,9 (136,9)	D120	123,3 (313,1)
A31	32,3 (82,0)	B38	39,8 (101,1)	C60	62,9 (159)	D128	131,3 (333,5)
A35	36,3 (92,2)	B42	43,8 (111,2)	C68	70,9 (180)	D144	147,3 (374,1)
A38	39,3 (99,8)	B46	47,8 (121,4)	C75	77,9 (197,8)	D158	161,3 (409,7)
A42	43,3 (109,9)	B51	52,8 (134,1)	C81	83,9 (213,1)	D173	176,3 (447,8)
A46	47,3 (120,1)	B55	56,8 (144,2)	C85	87,9 (223,2)	D180	183,3 (465,5)
A51	52,3 (132,8)	B60	61,8 (156,9)	C90	92,9 (235,9)	D195	198,3 (503,6)
A55	56,3 (143,0)	B68	69,8 (177,2)	C96	98,9 (251,2)	D210	213,3 (541,7)
A60	61,3 (155,7)	B75	76,8 (195,0)	C105	107,9 (274,0)	D240	240,8 (611,6)
A68	69,3 (176,0)	B81	82,8 (210,3)	C112	114,9 (291)	D270	270,8 (687,8)
A75	76,3 (193,0)	B85	86,8 (220,4)	C120	122,9 (312,1)	D300	300,8 (764,0)
A80	81,3 (206,5)	B90	91,8 (233,1)	C128	130,9 (332,4)	D330	330,8 (840,2)
A85	86,3 (219,2)	B97	98,8 (250,9)	C144	146,9 (373,1)	D360	360,8 (916,4)
A90	91,3 (231,9)	B105	106,8 (271,2)	C158	160,9 (408,6)	D390	390,8 (992,6)
A96	97,3 (247,1)	B112	113,8 (289,0)	C173	175,9 (446,7)	D420	420,8 (1068,8)
A105	106,3 (270,0)	B120	121,8 (308,3)	C180	182,9 (464,5)	D480	480,8 (1221,2)
A112	113,3 (287,7)	B128	129,8 (329,6)	C195	197,9 (502,6)	D540	540,8 (1373,6)
A120	121,3 (308,1)	B144	145,8 (370,3)	C210	212,9 (540,7)	D600	600,8 (1526,0)
A128	129,3 (328,4)	B158	159,8 (405,8)	C240	240,9 (611,8)	D660	660,8 (1672,4)
		B173	174,8 (444,0)	C270	270,9 (688,0)		
		B180	181,8 (461,7)	C300	300,9 (764,2)		
		B195	196,8 (499,8)	C330	330,9 (840,4)		
		B210	211,8 (537,9)	C360	360,9 (916,6)		
		B240	240,3 (610,3)	C390	390,9 (992,8)		
		B270	270,3 (688,0)	C420,9	(1069,0)		
		B300	300,3 (762,7)				
Constantes para potencia nominal: a = 2,684 c = 5,326 e = 0,0136		Constantes para potencia nominal: a = 4,737 c = 13,962 e = 0,0234		Constantes para potencia nominal: a = 8,792 c = 38,819 e = 0,0416		Constantes para potencia nominal: a = 18,788 c = 137,7 e = 0,0848	

FUENTE: INTERMEDIATE TECHNOLOGY DEVELOPMENT GROUP ITDG PERÚ – OLADE. Manual de Mini y Microcentrales Hidráulicas Pág. 173

Anexo # 5 Tabla Coeficiente de Diámetro pequeño Kd

D2/D1	Kd
1.000 - 1.019	1.00
1.020 - 1.032	1.01
1.033 - 1.055	1.02
1.056 - 1.081	1.03
1.082 - 1.109	1.04
1.100 - 1.142	1.05
1.143 - 1.178	1.06
1.179 - 1.222	1.07
1.223 - 1.274	1.08
1.275 - 1.340	1.09
1.341 - 1.429	1.10
1.430 - 1.562	1.11
1.563 - 1.814	1.12
1.815 - 2.948	1.13
2.249 y más	1.14

FUENTE: INTERMEDIATE TECHNOLOGY DEVELOPMENT GROUP ITDG PERÚ – OLADE. Manual de Mini y Microcentrales Hidráulicas Pág. 174

Anexo # 6 Tabla Coeficiente de arco de contacto K_d

$\frac{D2-D1}{C}$	K_d	
	III	V - Plana
0.00	1.00	0.75
0.10	0.99	0.76
0.20	0.97	0.78
0.30	0.96	0.79
0.40	0.94	0.80
0.50	0.93	0.81
0.60	0.91	0.83
0.70	0.89	0.84
0.80	0.87	0.85
0.90	0.85	0.85
1.00	0.82	0.82
1.10	0.80	0.80
1.20	0.77	0.77
1.30	0.73	0.73
1.40	0.70	0.70
1.50	0.65	0.65

FUENTE: INTERMEDIATE TECHNOLOGY DEVELOPMENT GROUP ITDG PERÚ – OLADE. Manual de Mini y Microcentrales Hidráulicas Pág. 174

Anexo # 7 Tabla Factores de Corrección de Longitud K_L

Designación de la longitud normalizada		SECCIÓN TRANSVERSAL DE LA CORREA				
cm	pulg.	A	B	C	D	E
66.0	26	0.84	0.81	0.80	0.80	0.80
76.7	31	0.84	0.81	0.80	0.80	0.80
88.9	35	0.87	0.81	0.80	0.80	0.80
96.5	38	0.88	0.83	0.80	0.80	0.80
106.6	42	0.90	0.85	0.80	0.80	0.80
116.8	46	0.92	0.87	0.80	0.80	0.80
129.5	51	0.94	0.89	0.80	0.80	0.80
139.7	55	0.96	0.90	0.80	0.80	0.80
152.4	60	0.98	0.92	0.82	0.80	0.80
172.7	68	1.00	0.95	0.85	0.80	0.80
190.5	75	1.02	0.97	0.87	0.80	0.80
203.2	80	1.04	0.98	0.87	0.80	0.80
205.7	81	1.04	0.98	0.89	0.80	0.80
215.9	85	1.05	0.99	0.90	0.80	0.80
228.6	90	1.06	1.00	0.91	0.80	0.80
243.8	96	1.08	1.01	0.92	0.80	0.80
246.3	97	1.08	1.02	0.92	0.80	0.80
266.7	105	1.10	1.04	0.94	0.80	0.80
284.5	112	1.11	1.05	0.95	0.80	0.80
304.8	120	1.13	1.07	0.97	0.86	0.80
325.1	128	1.14	1.08	0.98	0.97	0.80
365.8	144	1.15	1.11	1.00	0.90	0.80
401.3	158	1.15	1.13	1.02	0.92	0.80
439.4	173	1.15	1.15	1.04	0.94	0.80
457.2	180	1.15	1.16	1.05	0.94	0.91
495.3	195	1.15	1.18	1.07	0.96	0.92
533.4	210	1.15	1.19	1.08	0.96	0.94
609.6	240	1.15	1.22	1.11	1.00	0.96
685.8	270	1.15	1.25	1.14	1.03	0.99
762.0	300	1.15	1.27	1.16	1.05	1.01
838.2	330	1.15	1.27	1.16	1.07	1.03
914.4	360	1.15	1.27	1.19	1.09	1.05
990.6	390	1.15	1.27	1.21	1.11	1.07
1066.8	420	1.15	1.27	1.23	1.12	1.09
1219.2	480	1.15	1.27	1.24	1.16	1.12
1371.6	540	1.15	1.27	1.24	1.18	1.14
1524.0	600	1.15	1.27	1.24	1.20	1.17
1676.4	660	1.15	1.27	1.24	1.23	1.19

FUENTE: INTERMEDIATE TECHNOLOGY DEVELOPMENT GROUP ITDG PERU – OLADE. Manual de Mini y Microcentrales Hidráulicas Pág. 175

Anexo # 8 PROGRAMA DE MANTENIMIENTO SEGÚN SU PERIODICIDAD

ACTIVIDADES	SF	SI	D	S	M	3M	6M	A	2A	5A	8A
Ajuste de prensas estopa de inyector	X										
Cambio de empaques de inyector	X										
Sellado de fugas y reparación de canal		X									
Limpieza de bocatoma		X									
Limpieza de rejilla de cámara de carga		X									
Verificar temperatura de rodamientos de turbina			X								
Verificar vibraciones en la turbina			X								
Verificación de ruidos anormales turbina y generador			X								
Verificación de fugas de agua en uniones de turbina			X								
Inspección de existencia de piedras y lodo en bocatoma					X						
Inspección de estado de canal y desarenador					X						
Limpieza de tanque desarenador						X					
Inspección de conexiones eléctricas							X				
Limpieza de Canal							X				
Engrase de rodamientos de eje turbina							X				
Verificación de tensión de banda turbina alternador								X			
Inspección de zonas susceptibles de derrumbes								X			
Verificación de filtraciones en tubería de presión								X			
Inspección desgaste del rodete e inyector								X			
Verificación de alineación de rodete								X			
Limpieza de bobinado interior del generador								X			
Medición de aislamiento de generador									X		
Cambio rodamientos de eje turbina										X	
Cambio de retenedor aislante de agua carcasa chumaceras								X			
Verificación de nivel de carga de batería					X						
Inspección de prisioneros y chavetas en poleas y rodete				X							
Verificación de ausencia de humedad en alternador			X								
Cambio de rodamientos internos de alternador DC				X						X	
Limpieza de terminales de batería y nivel interna de agua				X							
Verificación de escobillas y colector de alternador								X			
Observar estado de tubería de presión								X			

GLOSARIO DE TERMINOS:

Hidro: Término proveniente de hidráulica.

INECEL: Ex Instituto Nacional Ecuatoriano de Electrificación.

MEM: Ministerio de Energía y Minas

INELMO: Empresa privada encargada en la construcción de transformadores y elementos de potencia

Energía Geodésica: o energía potencial

Altitud: Dimensión de un cuerpo perpendicular a la base.

Energía cinética: Cuando un cuerpo está en movimiento posee energía cinética ya que al chocar contra otro puede moverlo y, por lo tanto producir un trabajo. Para que un cuerpo adquiera energía cinética o de movimiento, es necesario aplicarle una fuerza.

Energía hidráulica: Cantidad neta de agua bombeada desde una altura de bombeo en un periodo de tiempo dado.

Energía potencial: Todo cuerpo ubicado a cierta altura del suelo posee energía potencial. Todos los cuerpos tienen energía potencial que será tanto mayor cuanto mayor sea su altura. Como la existencia de esta energía potencial se debe a la gravitación (fuerza de gravedad), su nombre más completo es energía potencial gravitatoria.

Energía: Propiedad de la materia la cual se manifiesta desde cualquiera de sus estados o formas. La más básica de sus definiciones indica que se trata de la capacidad que poseen los cuerpos para realizar un trabajo.

Fluido: Es una sustancia que se deforma continuamente al ser sometida a un esfuerzo cortante (esfuerzo tangencial) no importa cuan pequeño sea.

Fuentes energéticas convencionales: Son aquellas energías que estamos acostumbrados a usar, en las cuales se emplea tecnología de uso común, 46 desde la extracción del recurso energético natural hasta transformarlo en un producto útil para el consumidor final. A esta energía convencional pertenecen: petróleo, carbón mineral, gas natural, y electricidad.

Fuentes energéticas no renovables: Las fuentes de producción de energía no renovables, es decir que agotan sus reservas a medida que son consumidas, incluyen el carbón, el petróleo y el gas natural conocidos también como combustibles fósiles.

Fuentes energéticas no convencionales: Son aquellas fuentes que no usamos comúnmente, su uso no contamina el medio ambiente y utilizan recursos naturales renovables e inagotables, como el viento y el sol. Las principales fuentes de energía son la solar, eólica, geotermia, biodigestión y oceánica.

Batería: Pila reversible que almacena energía durante la carga y la restituye parcialmente durante su descarga.

Carga: Cantidad de energía eléctrica necesaria para poner en funcionamiento cualquier dispositivo o aparato eléctrico. A veces se asume que la carga es el aparato mismo que recibe la energía.

Controlador de carga: Dispositivo que controla el régimen de carga de las baterías.

Energía eléctrica: Es el resultado de la conversión de la energía mecánica, a través de un generador acoplado a una turbina.

Generador: Elemento encargado de convertir la energía mecánica en energía eléctrica.

Potencia: Es la velocidad a la que se realiza un trabajo.

Sistema eléctrico: Conjunto de dispositivos que generan un trayecto o ruta de una corriente eléctrica.

Turbina hidráulica: Máquina rotativa accionada por agua, que, a su vez, genera energía mecánica.

Turbogenerador: Generador eléctrico que comprende una turbina de vapor, directamente acoplada a éste.

Vida útil: Es el tiempo transcurrido entre el momento de iniciar el desempeño con la eficiencia nominal hasta el momento en que la eficiencia ha descendido al 80% del valor inicial, criterio que generalmente se aplica a varios dispositivos de generación y también a los de consumo de energía.

Yacimiento: Sitio donde se halla naturalmente una roca, un mineral o un fósil.

Obra de toma: Puede incluir obras de embalse (presas, cortinas) del cauce principal, captación a fijo de agua (captación lateral, toma de río). Frecuentemente se instalan presas sumergidas (soleras, barrajes) para elevar el nivel del agua al ingreso de la toma.

Conducción: Puede tomar la forma de canal o túnel que porta el agua desde la toma hasta la cámara de carga, o más lejos cuando se utilizan canales de regadío.

Cámara de carga: (taza, tanque de carga, reservorio). Estructura que recibe el agua del canal antes de su ingreso a la tubería de presión.

Desarenador: (separador de sólidos, sedimentador). Estructura civil para facilitar el asentamiento de las partículas salidas suspendidas en el agua al reducir la velocidad de flujo. Puede instalarse en la toma o en la cámara de carga.

Compuertas: Dispositivo para controlar el flujo en tomas, canales y cámaras de carga.

Rejillas: (mallas). Dispositivos para evitar el paso de sólidos, flotantes, o arrastrados por encima de determinada dimensión.

Tubería de presión: (tubo, ducto de presión). Tubería que transporta el agua desde la cámara de carga hasta la turbina y que permite aprovechar la energía potencial del salto.

Salto: (salto bruto, caída). Altura vertical desde el nivel libre del agua en la cámara hasta el nivel de máximo aprovechamiento en la turbina.

Válvula Principal: Elemento de aislamiento de la turbina con respecto a la tubería de presión. Normalmente no se usa para fines de regulación.

Turbina: Motor hidráulico que aprovecha la energía hidráulica disponible y la convierte en energía mecánica.

Transmisión turbina - generador: Sistema para transmitir la energía desde el eje de la turbina hasta el eje del generador; puede ser por acoplamiento directo o por medio de transmisión sea por fajas (bandas) en "V" o planas, engranajes o cadenas.

Generador: Máquina eléctrica que convierte la energía mecánica en energía eléctrica; puede ser un alternador (generador sincrónico) o un generador asíncrono (generador asincrónico, motor eléctrico invertido).

Tablero de control e instrumentación (tablero, sistema de control, tablero de mando transformador).

Línea de transmisión: En pequeñas centrales hidroeléctricas se emplean bajas y medias tensiones para la transmisión desde la planta hasta el punto de consumo.

Válvula principal: componente que se instala en la parte inferior de la tubería de presión

Junta de montaje: es el componente que conecta la válvula principal y la entrada de la turbina.

Tablero de control y gobernador de velocidad tipo electrónico: recibe la energía del generador eléctrico, y en ella se puede observar los valores de la tensión, corriente, frecuencia, potencia activa y reactiva, factor de potencia.

El regulador de velocidad opera realizando transferencia de carga, desde la carga principal a la carga secundaria y viceversa, el regulador cuenta con una carga secundaria para disipar la energía.

Sistema de transmisión de potencia: permite transmitir la energía mecánica de la Turbina hidráulica hacia el Generador Eléctrico. Puede ser un acoplamiento directo, si la Turbina gira a la velocidad síncrona del Generador eléctrico.

ELABORADO POR

NESTOR G. TENORIO Z.

ING PABLO MENA
DIRECTOR DE CARRERA DE ING ELECTROMECAÁNICA

AB. EDUARDO VASQUEZ ALCAZAR
SECRETARIO ACADÉMICO