



**UNIVERSIDAD NACIONAL  
“PEDRO RUIZ GALLO”**



**Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica**

**IV PROGRAMA DE TITULACIÓN PROFESIONAL EXTRAORDINARIA  
EXAMEN DE SUFICIENCIA PROFESIONAL**

**Para Optar el Título Profesional de**

**INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA**

**“Cálculo y Selección de Parámetros de una Turbina  
Hidráulica para la Generación de Electricidad en la  
Comunidad de Puesta de Sol-Lonya Grande-Rio Napo”**

**Presentado Por:**

**Br. SILVA GUEVARA WILFREDO.**

**LAMBAYEQUE – PERÚ**

**2017**



**UNIVERSIDAD NACIONAL  
“PEDRO RUIZ GALLO”**



**Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica**

**IV PROGRAMA DE TITULACIÓN PROFESIONAL EXTRAORDINARIA**

**EXAMEN DE SUFICIENCIA PROFESIONAL**

**Para Optar el Título Profesional de**

**INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA**

**“Cálculo y Selección de Parámetros de una Turbina Hidráulica para la Generación de Electricidad en la Comunidad de Puesta de Sol-Lonya Grande Rio Napo.”**

**Presentado Por:**

**Br. SILVA GUEVARA WILFREDO.**

**Aprobado por el Jurado Examinador**

**PRESIDENTE: MSc ING. JUAN ANTONIO TUMIALAN HINOSTROZA**

**SECRETARIO: M.Sc ING. JORGE LUIS NOMBERRA TEMOCHE**

**MIEMBRO: ING. TEOBALDO EDGAR JULCA OROZCO**

**ASESOR: M.Sc ING. DANIEL CARRANZA MONTENEGRO**

**Lambayeque – Perú**

**2017**



**UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA y ELÉCTRICA**



**IV PROGRAMA DE TITULACIÓN PROFESIONAL EXTRAORDINARIA**

**EXAMEN DE SUFICIENCIA PROFESIONAL**

**TITULO**

**“Cálculo y Selección de Parámetros de una Turbina Hidráulica para la Generación de Electricidad en la Comunidad de Puesta de Sol-Lonya Grande-Rio Napo ”**

**CONTENIDOS**

**CAPITULO I: PROBLEMA DE LA INVESTIGACION.**

**CAPITULO II: MARCO TEORICO.**

**CAPITULO III: MARCO METODOLOGICO.**

**CAPITULO IV: ANALISIS E INTERPRETACION DE LOS RESULTADOS.**

**CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.**

**CAPÍTULO VI: REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.**

**CAPITULO VII: ANEXOS, PLANOS Y OTROS.**

**AUTOR: Br. SILVA GUEVARA WILFREDO.**

---

**PRESIDENTE**

---

**SECRETARIO**

---

**MIEMBRO**

---

**ASESOR**

**Lambayeque – Perú**

**2017**

## DEDICATORIA

Este EXAMEN DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

*Está dedicada a mis padres: Alejandro Silva Sánchez e Isidora Guevara Quispe, por haber sido el pilar más importante y por haberme demostrado siempre su cariño y apoyo incondicional, ciento que están conmigo siempre.*

*Y me apoyaron para lograr esta meta tan importante en mi formación profesional.*

*A mi hermano Segundo Silva Guevara y familia en general, porque me han brindado su apoyo incondicional y por compartir conmigo buenos y malos momentos.*

## **AGRADECIMIENTO**

*Doy gracias a DIOS Padre, sobre todas las cosas por todas las bendiciones y por haberme permitido cumplir con mis objetivos y metas propuestas.*

*Al Msc. Ing. Daniel Carranza Montenegro, asesor del presente trabajo de investigación, por sus aportes y orientación; no solo en la realización de este trabajo si no por las enseñanzas durante nuestro desarrollo académico y profesional.*

*A mis compañeros de la facultad, juntos pasamos muy buenos momentos y compartimos gratas experiencias.*

## RESUMEN

El presente trabajo describe el proyecto de cálculo y diseño del prototipo de una Turbina de Río que será del tipo tripala de eje inclinado con respecto al nivel del agua del río y fabricado en fibra de vidrio y resina con un diámetro nominal de 2 m y una velocidad de giro de 427 r.p.m. que van unidos a dos platos de sujeción en acero inoxidable para el montaje de los alabes. Además, se cuenta con un árbol de transmisión de acero galvanizado de 1.5 plg., de diámetro nominal el cual está acoplado directamente al rotor, este tubo va encapsulado en otro de las mismas características con 2.5 plg., de diámetro nominal que sirve de soporte y protección. El sistema de transmisión incluye un amplificador de velocidades activada para faja y poleas el cual es un componente intermedio entre el árbol de transmisión y el generador. El sistema cuenta además con un generador de imanes permanentes de neodimio ferrítico el cual permite reducir la velocidad de generación por un lado y por el otro obtener un bajo costo del equipo, el mismo que es adaptado al rotor de la turbina de río generando corriente alterna y que a través de un sistema de diodos rectificadores transforma el voltaje de 12 V y potencia 250 W y 360 r.p.m. a corriente continua. Otro componente del sistema es el tablero de control el cual cuenta con instrumentos de medición básicos como voltímetro y amperímetro y los respectivos diodos rectificadores de 12 V. Todos los componentes del sistema están instalados en una balsa flotante de fabricación local. Finalmente la energía eléctrica generada es almacenada en una batería para su posterior utilización doméstica.

Con los datos de diseño como son la potencia, la velocidad del agua del río, la densidad del agua, la celeridad de diseño o relación de velocidad en la punta del alabe, el número de alabes, el radio de la turbina y el tipo de sección del perfil, se realizan los cálculos necesarios y luego se tabulan estos resultados que sirven de datos para la fabricación de la turbina. Incluyendo los costos.

Palabra clave: Turbina, Rotor, Energía eléctrica, Alabes.

## **ABSTRACT**

The present work describes the design and calculation of the prototype of a River Turbine that will be of tripala type with inclined axis with respect to the water level of the river and made of fiberglass and resin with a nominal diameter of 2 m and a speed of rotation of 427 rpm which are attached to two stainless steel clamping plates for the mounting of the blades. In addition, there is a galvanized steel transmission shaft of 1.5 in., Nominal diameter which is coupled directly to the rotor, this tube is encapsulated in another of the same characteristics with 2.5 in. of nominal diameter that serves as support and protection. The transmission system includes an activated speed amplifier for belt and pulleys which is an intermediate component between the drive shaft and the generator. The system also has a permanent magnet generator ferritic neodymium which allows to reduce the generation speed on the one hand and on the other to obtain a low cost of the equipment, the same that is adapted to the rotor of the river turbine generating alternating current and that through a system of diodes rectifiers transforms the voltage of 12 V and power 250 W and 360 rpm to direct current. Another component of the system is the control board which has basic measuring instruments such as voltmeter and ammeter and the respective 12 V rectifier diodes. All components of the system are installed in a locally manufactured floating raft. Finally the generated electric energy is stored in a battery for later domestic use.

With design data such as power, river water velocity, water density, design speed or speed ratio at the blade tip, the number of blades, the radius of the turbine and the type of blade section of the profile, the necessary calculations are made and then these results are tabulated that serve as data for the manufacture of the turbine. Including costs.

Keyword: Turbine, Rotor, Electric power, Booms.

# ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA .....	I
AGRADECIMIENTO .....	II
RESUMEN .....	III
ABSTRACT .....	IV
ÍNDICE GENERAL .....	V
INDICE DE FIGURAS .....	VIII
INDICE DE TABLA .....	IX
INTRODUCCION .....	1
CAPITULO I .....	2
1.0. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN .....	2
1.1. Realidad Problemática. ....	2
1.2. Formulación del Problema .....	2
1.3. Delimitación de la Investigación .....	3
1.4. Justificación e importancia de la investigación .....	3
1.5. Limitaciones de la Investigación .....	4
1.6. Objetivos de la Investigación .....	5
CAPÍTULO II .....	6
2. MARCO TEÓRICO.....	6
2.1. Antecedentes de Estudios.....	6
2.2 Desarrollo de la temática correspondiente al tema investigado .....	8
2.2.1 La Turbina de Río de la comunidad El Paraíso .....	9
2.2.2 Ubicación del proyecto .....	9
2.3 El acceso a la energía .....	10
2.4. Demanda Energética de la Zona .....	11
2.4.1. Consumo Energético por Familia .....	12
2.4.2. Potencia Generada por la Turbina .....	13
2.5. Instalación del primer prototipo .....	13
2.5.1. La organización de la comunidad.....	14
2.5.2. La capacitación en Operación y Mantenimiento .....	15
2.5.3. Los impactos en la población .....	15
2.6. El Agua.....	16
2.6.1. La Cuenca del Amazonas.....	16
2.7. Medidas de Protección contra palizadas. ....	18
2.8. Consideraciones para satisfacer la Potencia Nominal .....	20



2.8.1. La Máxima y Mínima velocidad de la corriente del Río Ucayali.....	20
2.9. Definición conceptual de la terminología empleada. ....	21
2.9.1 Definición de Turbomaquina.....	21
2.9.2. Clasificación de las Turbomaquina Hidráulicas.....	22
2.9.2.1 Según la función que desempeñan.....	22
2.9.2.2. Según la presión en el rodete .....	24
2.9.2.3. Según la dirección de entrada del agua .....	26
2.10. Turbinas de Río o de Caída Cero .....	27
CAPÍTULO III .....	29
3. MARCO METODOLÓGICO. ....	29
3.1. Tipo y diseño de la investigación. ....	29
3.1.1 Procedimiento de cálculo.....	29
3.2. Teoría aerodinámica.....	29
3.3. Hipótesis.....	31
3.3.1. La Energía del Agua .....	31
3.3.2. Potencia Suministrada .....	31
3.3.3. Factores que afectan la Potencia Suministrada .....	33
3.3.4 Componentes de una Turbina de Río.....	34
3.3.5. El Rotor.....	34
3.3.5.1. Las palas o alabes del rotor.....	36
3.3.5.2. El eje de transmisión. ....	38
3.3.5.3 El Generador Eléctrico .....	39
3.3.5.4. El tablero de Control .....	41
3.3.6. Selección del Rotor.....	42
3.3.7. Materiales para la Construcción del Rotor .....	46
3.4. Selección del Lugar.....	46
3.4.1 Mínima Velocidad de Corriente Útil .....	47
3.4.2 Profundidad Mínima Útil.....	47
3.5. Sistema de Anclaje .....	49
3.6. Eficiencia Total y Pérdidas en una Turbina de Río .....	49
3.7 Análisis Estadístico e interpretación de los datos.....	51
3.7.1. Del Diseño Conceptual .....	51
3.7.2 Del Diseño de Ingeniería .....	51
3.7.2.1 Cálculo del Diámetro del Rotor.....	52
3.7.2.2. Cálculo de la sección del alabe y selección del perfil.....	53

3.7.2.3. De la linealización del alabe .....	55
CAPITULO IV .....	61
4.0 ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS. ....	61
4.1 Resultados en tablas y gráficos. ....	61
4.1.1. De la Fabricación del Alabe .....	61
4.1.2. Del Generador Eléctrico .....	62
4.1.3. Ensayos de Campo .....	63
4.2. COSTOS DE FABRICACIÓN DE LA TURBINA .....	64
4.2.1 Rotor axial .....	64
4.2.2. La Transmisión .....	64
4.2.2.1 El Árbol de transmisión .....	64
4.2.3 Generación de Energía .....	65
4.2.3.1. Generador de Imanes Permanentes .....	65
4.2.3.3 Regulador de Carga .....	66
4.2.4 Soporte del Sistema .....	66
4.2.4.1 Balsa Flotante.....	66
4.2.4.2 Sistema de Amarre.....	66
4.3. Costo total del grupo turbina – generador .....	66
CAPITULO V .....	69
5.1. CONCLUSIONES. ....	69
CAPITULO VI .....	71
BIBLIOGRAFÍA.....	71
ANEXOS .....	72
ANEXO -1 Diámetros comerciales para tubos de acero galvanizado.....	73
ANEXO -2. Angulo de Ataque vs Coeficiente de Sustentación en perfil Naca 4412. ....	74
ANEXO -3 FOTOGRAFIAS.....	75

## INDICE DE FIGURAS

Figura N°1. Ubicación del proyecto.....	4
Figura N°2 Turbina Garman para bombeo de agua. ....	7
Figura N° 3.Ubicacion del proyecto modelo .....	9
Figura N° 4. Instalación del primer prototipo .....	14
FIGURA N° 5 Sistema de anclaje para la Turbina de rio. ....	19
FIGURA N° 6 Ubicación apropiada para una Turbina de rio. ....	20
Figura N° 7. RUEDAS HIDRAULICAS. ....	23
Figura N°8. Turbina de Acción. ....	25
FIGURA N° 9 TURBINA DE REACCION.....	25
FIGURA N° 10, Turbina Axial. ....	26
Figura N° 11. Turbina Radial.....	26
Figura N° 12. Turbina tangencial.....	27
Figura N°12 Turbina Aquacharger. .....	28
Figura N°13. Esquema del perfil.....	30
Figura N° 14 Área de barrido. ....	31
FIGURA N° 15 ROTOR DE EJE HORIZONTAL. ....	34
Figura N° 18. Esquemas de Rotores de Turbinas alternativas .....	43
Figura N° 19. Instalación de la Turbina de Rio. ....	48
FIGURA N° 21. CUERDAS Vs RADIOS. ....	58
FIGURA N° 22. Ángulos $\beta$ Vs. Radio.....	58
FIGURA N° 23, Gráfico de Sankey que representa las perdidas en el grupo .....	60
FIGURA N° 24.PREPARACION DEL MOLDE DEL ALABE CON FIBRA DE VIDRIO. ....	61
Figura N° 25. Fabricación del generador de imanes (bobinas e imanes).....	62
FIGURA N°26 Potencia a la Salida del Generador vs Velocidad del Rio .....	63
FIGURA N°27 . VISTA EN SECCION LONGITUDINAL DE LA PALA .....	68

## INDICE DE TABLA

TABLA N° 1. Velocidades promedios de algunos ríos del Perú. ....	11
TABLA N° 2. PRINCIPALES RIOS DEL PERU.....	18
Tabla N° 3 NUMERO DE PALAS EN FUNCION A LA CELERIDAD .....	37
TABLA N° 4.VARIACION DEL DIAMETRO VS. VELOCIDAD.....	52
TABLA N° 5. CALCULO DE LAS RPM.....	53
TABLA N° 6. LINEALIZACION DEL ALABE DEL PERFIL NACA.....	55
Tabla N°7 VALORES DE CUERDA Y ANGULO $\beta$ LINEALIZADOS. ....	57
Tabla N°8. COSTO DE ROTOR Y ALABES. ....	64
TABLA N° 9. COSTO DE TUBOS. PARA TRANSMISION. ....	65
TABLA N° 10, COMPONENTES INTERMEDIOS. ....	65
Tabla N°11. COSTO TOTAL DEL PROYECTO .....	67

## INTRODUCCION

En zonas rurales donde vive la mayor parte de la población típico en los países en vías de desarrollo, la densidad poblacional es muy baja y el consumo de energía esta confinada a pequeñas escalas. Así, la provisión de la misma desde los distantes centros de generación, no resulta factible económicamente. Como consecuencia de esta desfavorable situación y desde el punto de vista del abastecimiento de energía eléctrica en áreas rurales. La fuente de energía básica del área rural en algunos lugares, sigue siendo la leña con un consumo importante, usada principalmente en requerimientos de calor, tales como cocción y calefacción, originando impactos negativos contra el medio ambiente. En lo que se refiere a iluminación, utilizan: velas, lámparas a gas, que aparte de tener una intensidad luminosa deficiente, a la larga producen daños a la salud, especialmente en la vista y los pulmones. Así, la idea de utilizar la fuerza de la corriente de los ríos no es nueva, existen muchas propuestas de diseño de turbinas para aprovechar este recurso a pequeña y gran escala. Sin embargo, poco se conoce sobre experiencias de aplicación masiva más allá de algunos modelos artesanales de aplicación muy restringida.

La comunidad Puesta de Sol, como la gran mayoría de comunidades rurales de la selva peruana tiene problemas muy serios para el acceso a la energía; especialmente en lo que se refiere al alumbrado, ya que cuenta con limitadas opciones energéticas; su posibilidad de acceso a la red nacional es nula, existen lugares donde se pueda utilizar energía hidráulica bajo la óptica y las tecnologías existentes en el medio, existen abundantes recursos de biomasa en base a una muy rica y variada flora de la zona, por lo que su uso o viabilidad en la generación de energía a pequeña escala está aún en investigación, la energía solar fotovoltaica es una alternativa pero aun es costosa. El uso de baterías sirve actualmente para satisfacer pequeñas demandas de energía (radio, TV, iluminación). La desventaja, es el alto costo que implica el servicio de recarga, con el consiguiente gasto en tiempo y dinero (pasaje, alimentación y el costo del servicio).

## CAPITULO I

### 1.0. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

#### 1.1. Realidad Problemática.

La comunidad Puesta de sol, como la gran mayoría de comunidades rurales de la selva peruana tiene problemas muy serios para el acceso a la energía; especialmente en lo que se refiere al alumbrado, ya que cuenta con limitadas opciones energéticas; su posibilidad de acceso a la red nacional es nula, no existen lugares donde se pueda utilizar energía eléctrica convencional bajo la óptica y las tecnologías existentes en el medio, existen abundantes recursos de biomasa en base a una muy rica y variada flora de la zona, por lo que su uso o viabilidad en la generación de energía a pequeña escala está aún en investigación, la energía solar fotovoltaica es una alternativa pero aun es costosa.

El Grupo de Desarrollo de Tecnología Intermedia o **ITDG** en sus **siglas** inglés.

Fue así que realizó un estudio socioeconómico de la comunidad con la participación activa de la población a fin de identificar las principales necesidades básicas, el nivel de organización y el grado de instrucción y habilidades de los pobladores. En base a este estudio se consideró muy importante trabajar en el tema de creación de la capacidad local y de la organización para el correcto manejo de los equipos y el eficiente uso de la energía. Un tema importante fue definir el tipo de organización que tendría a cargo la responsabilidad del manejo y administración del sistema en su conjunto.

#### 1.2. Formulación del Problema

En zonas rurales donde vive la mayor parte de la población típico en los países en vías de desarrollo, la densidad poblacional es muy baja y el consumo de energía esta confinada a pequeñas escalas. Así, la provisión de la misma desde los distantes centros de generación, no resulta factible económicamente. Como consecuencia de esta desfavorable situación y desde el punto de vista del abastecimiento de energía eléctrica en áreas rurales, un gran porcentaje de la población no se beneficia con las ventajas que ésta brinda.

### **1.3. Delimitación de la Investigación**

La fuente de energía básica del área rural sigue siendo la leña con un consumo importante, usada principalmente en requerimientos de calor, tales como cocción y calefacción, originando impactos negativos contra el medio ambiente. En lo que se refiere a iluminación, utilizan: velas, mecheros, lámparas a gas, que aparte de tener una intensidad luminosa deficiente, a la larga producen daños a la salud, especialmente en la vista y los pulmones. Así, la idea de utilizar la fuerza de la corriente de los ríos no es nueva, existen muchas propuestas de diseño de turbinas para aprovechar este recurso a pequeña y gran escala. Sin embargo, poco se conoce sobre experiencias de aplicación masiva más allá de algunos modelos artesanales de aplicación muy restringida. La experiencia más destacable conocida por su largo esfuerzo de desarrollo ha sido el caso de la Turbina Garman diseñado por el Británico Peter Garman. Las Turbinas de Río (o de Garman), no son más que turbinas eólicas que funcionan dentro del agua, por lo que en el diseño de las aspas se utilizan todos los principios de una turbina eólica y en lo único que se diferencia de estos es en el fluido de trabajo.

### **1.4. Justificación e importancia de la investigación**

Se describe en qué medida y cómo la investigación aportó a la solución de carencia de conocimientos en el medio, cómo atribuyó a responder a las expectativas y demandas de la comunidad de Puerta de sol, porque fue necesario e importante su ejecución, razones para qué de la investigación.

El proyecto durante su desarrollo, atravesó etapas de incertidumbre, sin embargo pese a ello la organización comunal de Puerta de sol, continuó impulsando el desarrollo total del mismo. El liderazgo de los representantes de la comunidad ha sido muy importante para contar con la mano de obra local, así como el apoyo brindado a la instalación de los equipos, como parte de este proyecto.

**Figura N°1. Ubicación del proyecto.**



Fuente: Google Earth

La economía de las familias de Puesta de sol, se ha visto favorecida ya que es posible brindar el servicio de cargado de baterías en la propia comunidad y a un costo menor, sin incluir los gastos en transporte o tiempo dedicado para este efecto.

### **1.5. Limitaciones de la Investigación**

Algunas de las actividades conjuntas fueron las visitas de inspección de recursos en los ríos, Ucayali, Napo, Amazonas y Huallaga, encontrándose viable el uso de esta máquina para una gran cantidad de pequeñas comunidades de la selva peruana, especialmente en el Río Ucayali, por tener una mayor gradiente. Durante los siguientes años con la colaboración de organismos de cooperación técnica se logró financiar e instalar un modelo de 500W de potencia en la comunidad El Paraíso, y que actualmente sirve como unidad piloto, en la cual el Programa de Energía continúa su trabajo de investigación y adaptación de la tecnología.

El impacto de los servicios de educación y salud han servido para identificar dos factores importantes:



La utilización de la energía para el alumbrado de aulas y el funcionamiento de TV y laptops, son importantes, ya que no sólo han mejorado el servicio de iluminación sino que los docentes tienen la oportunidad de utilizar dichos equipos en el proceso de enseñanza - aprendizaje, mejorando así el aprovechamiento de los educandos.

## **1.6. Objetivos de la Investigación**

### **Objetivo general:**

Dada la posibilidad de que una vez probado el funcionamiento de la Turbina de Río, se pueda transferir dicha tecnología a otras regiones donde existan recursos hídricos utilizables mediante esta máquina, además de que este tipo de sistemas no necesita de grandes obras civiles ni mecánicas para funcionar, lo cual trae grandes beneficios en cuanto a la reducción de costos frente a otras formas convencionales para generar electricidad.

### **Objetivos específicos:**

- Adaptar el diseño de la Turbina de Río para la generación de electricidad en pequeñas potencias (de 250 W) aprovechando la energía cinética del Río Napo.
- Satisfacer las pequeñas demandas de energía en las pequeñas comunidades ribereñas.
- Analizar los costos durante los procesos de fabricación de la turbina.

## **CAPÍTULO II**

### **2. MARCO TEÓRICO**

#### **2.1. Antecedentes de Estudios.**

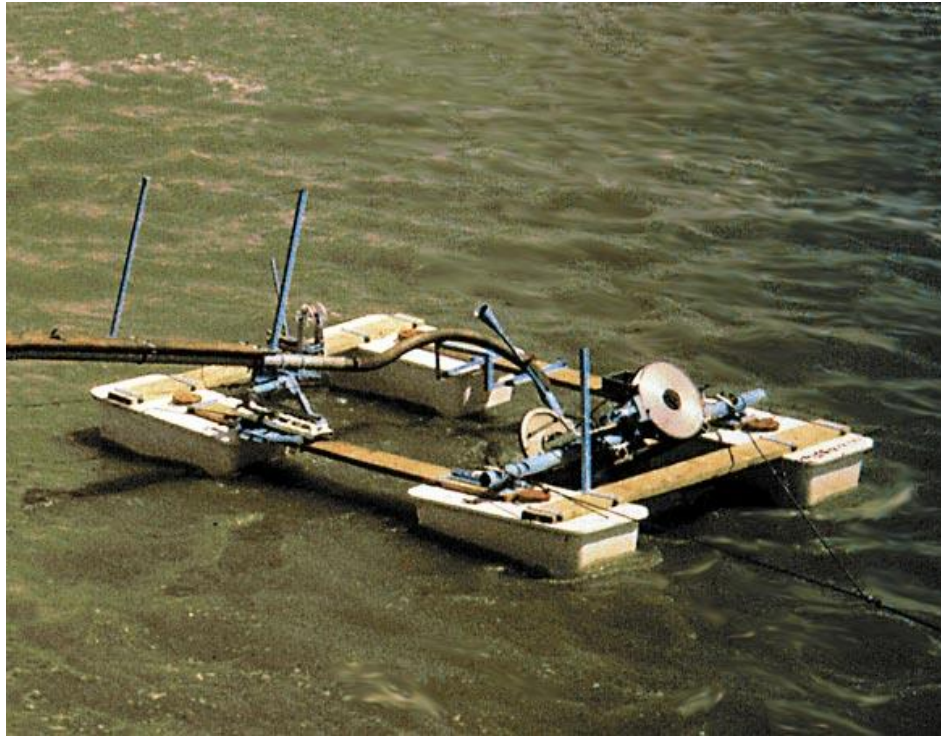
**Turbinas de río: una alternativa energética para la Amazonía** (Saúl Ramírez y Rafael Escobar-2002)

La idea de utilizar la “fuerza de la corriente de los ríos” no es nueva, existen muchas propuestas de diseño de turbinas para aprovechar este recurso a pequeña y gran escala. Sin embargo, en la realidad, poco se conoce sobre experiencias de aplicación masiva, más allá de algunos modelos artesanales de aplicación muy restringida (modelos ad-hoc para cada caso). La experiencia más destacable conocida por su largo esfuerzo de desarrollo ha sido el caso de la turbina Garman, diseñada por el Británico Peter Garman, un investigador quien inició en ITDG sus actividades en el tema.

A inicios de los 80's, la oficina de ITDG en United Kingdom, realizó algunos trabajos sobre las turbinas de río utilizando un rotor de eje vertical. Un prototipo de 4m fue diseñado e instalado en el río Nilo al sur de Sudán con resultados satisfactorios, Entre 1988 y 1994, Peter Garman, el ingeniero responsable del proyecto iniciado por ITDG continuó con el trabajo por cuenta propia desarrollando una turbina de eje inclinado respecto a la horizontal (aprox. 30º) para el bombeo de agua, diseño que obtuvo el premio a la “Tecnología Apropiada” en 1990. Una de las características de estos equipos es que pueden operar con velocidades del río entre 0.6 y 1.5 m/s, pudiendo irrigar hasta 12 hectáreas de vegetales en 14 horas de trabajo diario.

La máxima altura de bombeo es de 25 m. En 1996, el Programa de Energía de ITDG-Perú, inició algunas actividades conjuntas con Peter Garman para adaptar su diseño “la turbina Garman”. En la generación de electricidad en pequeñas potencias y así satisfacer las pequeñas demandas de energía en las pequeñas comunidades ribereñas de la selva peruana, con la posibilidad de que una vez probado su funcionamiento, se pueda transferir dicha tecnología a otras regiones donde existan recursos hídricos utilizables mediante esta máquina.

**Figura N°2 Turbina Garman para bombeo de agua.**



Fuente: [www.solucionespracticas.org.pe/Descargar/315/2868](http://www.solucionespracticas.org.pe/Descargar/315/2868).

**Diseño de una turbina hidrocínética para aprovechamiento energético de ríos no caudalosos.** (Víctor Peña García-Piura –Junio 2013)

Este tema ya ha sido estudiado en nuestro país, pero con muy poco reconocimiento en cuanto al valor potencial que posee. Se han realizados diseños de turbinas hidrocínética.

Sin embargo no se tiene una teoría propia para el tema en sí, es decir se toma en cuenta la teoría de las turbinas eólicas para establecer el diseño de las turbinas de río. Tampoco existe un procedimiento establecido y claro para el desarrollo de este tipo de turbinas, es por esto que la presente tesis tiene como objetivo principal establecer un procedimiento para su diseño óptimo que permita obtener la mayor cantidad de energía a partir de la energía de la corriente de los ríos.

El presente trabajo tiene como objetivo principal el diseño preliminar de una turbina de pequeña potencia para el aprovechamiento de la energía cinética de la corriente de agua de los ríos para la obtención de una energía eléctrica “limpia”, segura y renovable.

Teniendo en cuenta el objetivo principal se establecerá un procedimiento para el diseño de una turbina hidrocínética o de río que permita aprovechar óptimamente la energía cinética de éstos.

Se tomará como base los fundamentos teóricos de las ya ampliamente estudiadas turbinas eólicas y cuyas diferencias más notables, respecto de las turbinas hidrocínética, son la velocidad y densidad del fluido. Si bien es cierto no se podrá extraer el 100% de la energía de la corriente del río se aprovechará la mayor cantidad posible, gracias al diseño óptimo de la turbina.

Se establecerá también el procedimiento para seleccionar los perfiles aerodinámicos que mejor se adapten al trabajo a realizar. Se calcularán los diferentes componentes de ésta, por ejemplo el eje de baja velocidad, los pernos para el ensamblaje, elección de alternador de imanes permanentes y los engranajes multiplicadores.

## **2.2 Desarrollo de la temática correspondiente al tema investigado.**

En 1996, el Programa de Energía de la ONG ITDG-Perú, inició algunas actividades conjuntas con Peter Garman para adaptar su diseño la turbina Garman, en la generación de electricidad en pequeñas potencias y así satisfacer las pequeñas demandas de energía en las pequeñas comunidades ribereñas de la selva peruana.

Algunas de las actividades conjuntas fueron las visitas de prospección de recursos en los ríos, Ucayali, Napo, Amazonas y Huallaga, encontrándose viable el uso de esta máquina para una gran cantidad de pequeñas comunidades de la selva peruana, especialmente en el Río Ucayali, por tener una mayor gradiente. Durante los siguientes años con la colaboración de organismos de cooperación técnica se logró financiar e instalar un modelo de 500W de potencia en la comunidad El Paraíso, y que actualmente sirve como unidad piloto, en la cual el Programa de Energía continúa su trabajo de investigación y adaptación de la tecnología.

### 2.2.1 La Turbina de Río de la comunidad El Paraíso

Tomando en consideración las evaluaciones previas del potencial energético, la evaluación del nivel de organización de las comunidades, el grado de interés y la cercanía a Iquitos lo que facilitaba el montaje, se decidió la instalación del prototipo en la Comunidad El Paraíso.

### 2.2.2 Ubicación del proyecto

La Comunidad de El Paraíso se encuentra a orillas del río Napo, distrito de Mazán, provincia de Maynas, departamento de Loreto, sus coordenadas geográficas son: Latitud : 3° 29' 00", Longitud: 73° 07' 00"

**Figura N° 3. Ubicacion del proyecto modelo**



**Fuente: Mapa Político del Perú.**

## **2.3 El acceso a la energía**

La comunidad de Puesta de sol, como la gran mayoría de comunidades rurales de la selva peruana tiene problemas muy serios para el acceso a la energía; especialmente en lo que se refiere al alumbrado, ya que cuenta con limitadas opciones energéticas; su posibilidad de acceso a la red nacional es nula, no existen lugares donde se pueda utilizar energía hidráulica bajo la óptica y las tecnologías existentes en el medio, existen abundantes recursos de biomasa en base a una muy rica y variada flora de la zona, por lo que su uso o viabilidad en la generación de energía a pequeña escala está aún en investigación, la energía solar fotovoltaica es una alternativa pero aun es costosa. El uso de baterías sirve actualmente para satisfacer pequeñas demandas de energía (radio, TV, iluminación). La desventaja, es el alto costo que implica el servicio de recarga, el cual sólo se puede realizar en las grandes ciudades o capitales de distrito.

Con el consiguiente gasto en tiempo y dinero (pasaje, alimentación y el costo del servicio). Dependiendo del lugar y la oferta, el costo por recargar una batería varía entre S/.3 a S/.7. No obstante, las comunidades ribereñas de la selva tienen la oportunidad de utilizar un recurso natural existente en los ríos, potencial que ha sido confirmado por ITDG en una breve evaluación de campo, en las que se realizaron mediciones de la velocidad en algunos ríos de la selva alta y baja del Perú. He aquí algunas mediciones de velocidades promedios de algunos ríos más importantes de nuestra selva:

**TABLA N° 1. Velocidades promedios de algunos ríos del Perú.**

R í o	V e l o c i d a d ( m / s )	
	E n V a c i a n t e	E n C r e c i e n t e
Amazonas	0 . 7 7 a 1 . 3	1 . 5 4 a 2 . 0 6
Napo	0 . 7 7 a 1 . 3	2 . 0 6 a 2 . 8 3
Aguarico	1 . 2 9	
Putumayo	1 . 0 3 a 1 . 5 4	
Nanay	1 . 0 3	
Yavari	0 . 7 7 a 1 . 8	
Marañón	3 .	4 . 1
Santiago	0 . 7	1 . 0 3
Morona	0 . 7	1 . 5 4
Pastaza	0 . 7	2 . 5 7
Tigre	1 . 1	2 . 1
Corrientes	1 . 0	2 . 1
Huallaga	1 . 1	2 . 5 7
Ucayali	1 . 0	2 . 1 y 4 . 1 2
Urubamba	2 . 1 a 5 . 6 6	
Tambo	1 . 0 3	
Perene	4 . 1 2 a 6 . 1 7	
Ene	1 . 5 4 a 2 . 5 7	
Pachitea	1 . 0	2 . 1
Pichis	1 . 0	2 . 1

Fuente: obtenido de ITDG.

## 2.4. Demanda Energética de la Zona

En Primer lugar hay que señalar que este desarrollo tecnológico fue pensando principalmente en las necesidades energéticas de la población rural. Es importante indicar también, que antes de hacer los diseños técnicos e inclusive hacer la propuesta financiera a los que apoyaron el proyecto, fue necesario hacer un análisis de las necesidades del sector rural a fin de diseñar un modelo que por un lado ofrezca una solución al problema de la falta de energía de la población rural y por otro lado que su costo esté al alcance al menos de una buena fracción de esta población rural peruana.

Entre otros datos relevantes para el diseño, por ejemplo, se encontró que la demanda energética oscila entre los 20 y 45 Kwh. al mes y que los ingresos anuales de la población están concentradas en el rango de US\$ 450 a US\$ 800 por familia (con pocas excepciones), que las necesidades de consumo más urgentes de energía eléctrica para ese sector de la población que se estima en base a 60 familias es la iluminación (2 focos de 50 W), pequeñas radios de 20 W, TVs de 70 W y 1 CPU de 60 W en un tiempo aproximado de 4 horas.

Tomando en cuenta todos estos elementos y otros, se llegó a determinar que una turbina de río de 250 W podría satisfacer medianamente estas necesidades, ya que una turbina de esta potencia puede producir aproximadamente un promedio de 1.5 Kw hora, de energía por día a velocidades de río promedio de 1 m/s. Obteniéndose así un promedio de generación mensual de 45 Kwh., cantidad que como se indica en el párrafo anterior, cubre las necesidades básicas promedio de una familia.

#### **2.4.1. Consumo Energético por Familia**

2 focos de 50 W = 100 W

1 radio de 20 W = 20 W

1 Tv de 70 W = 70 W

1 CPU de 60 W = 60 W

Entonces:

Consumo Promedio por familia = 250 W Tiempo de consumo = 4 horas/día.

Consumo Promedio diario por familia = 250 W x 4 (horas/día) = 1000 W x hora

Consumo Promedio diario por familia = 1 Kw. Hora

Consumo Promedio mensual = 1 (Kw x hora/familia) x 30 días = 30 Kw. hora/familia.



### **2.4.2. Potencia Generada por la Turbina**

Potencia media = 250 W

Tiempo en Funcionamiento = 6 horas/día

Potencia Generada diaria = 250 W x 6 (horas/día) = 1500 W.= 1.5 Kw. hora.

Potencia Generada mensual = 1.5 Kw. hora x 30 días = 45 Kw. Hora.

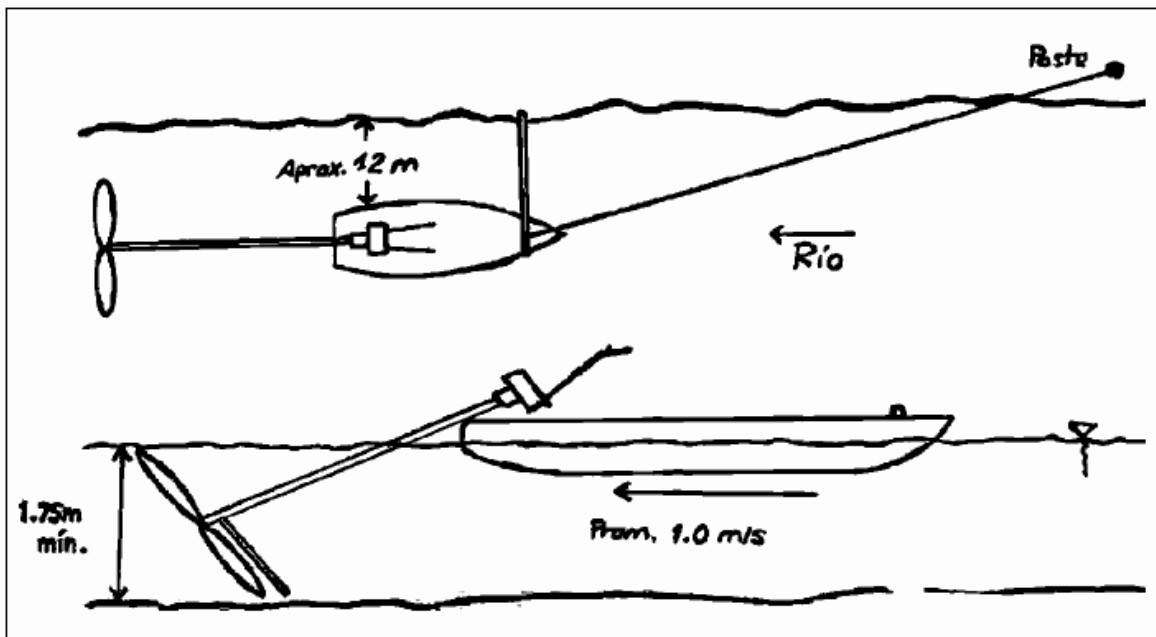
### **2.5. Instalación del primer prototipo**

La instalación de un equipo en calidad de prueba fue la primera fase del desarrollo, este equipo fue donado en su totalidad por Thropton Energy Systems (TES-UK). El equipo estaba compuesto por un rotor tripala (de fibra de vidrio), un generador eléctrico acoplado directamente a un generador múltiplo a través de un eje tubular y un tablero de control de carga de baterías. Los resultados del modelo instalado sirvieron como una fuente importante de información en el proceso de aprendizaje del equipo técnico.

No solamente en el tema técnico sino en el tema social, sirvió para obtener información valiosa para el desarrollo de un nuevo modelo bajo el concepto de tecnología apropiada, utilizando materiales locales así como conocimientos y habilidades locales.

Ese proceso de desarrollo se inició en Agosto de 1999, con la instalación del primer prototipo por el equipo Técnico del Programa de Energía de ITDG y los pobladores de la comunidad de El Paraíso. El funcionamiento de la máquina prototipo instalada fue altamente irregular, entre otras cosas debido a que la máquina donada no había sido probada en campo. Las fallas fueron tanto en los componentes eléctricos y electrónicos, así como en los componentes mecánicos. A pesar de ello, en el poco tiempo que estuvo funcionando el equipo los resultados fueron alentadores.

Figura N° 4. Instalación del primer prototipo



FUENTE: "Water Current Turbines. Autor: Peter Garman

### 2.5.1. La organización de la comunidad.

Si bien el proyecto tenía esencialmente objetivos técnicos y por lo tanto la máquina de carácter piloto, debía mostrar principalmente resultados sobre su comportamiento. El equipo encargado del desarrollo consideró de mucha importancia trabajar en el tema de la organización, tanto para el apoyo necesario de la comunidad durante toda la etapa de desarrollo así como para la futura operación y mantenimiento del equipo y el uso de la energía. Fue así que se realizó un estudio socioeconómico de la comunidad con la participación activa de la población a fin de identificar las principales necesidades básicas, el nivel de organización y el grado de instrucción y habilidades de los pobladores. En base a este estudio se consideró muy importante trabajar en el tema de creación de la capacidad local y de la organización para el correcto manejo de los equipos y el eficiente uso de la energía. Un tema importante fue definir el tipo de organización que tendría a cargo la responsabilidad del manejo y administración del sistema en su conjunto. Después de un análisis conjunto entre la población, autoridades e ITDG se llegó a la decisión de formar un Comité de Administración y Gestión, que se encargaría de dar cuenta del manejo del sistema en su conjunto.

### **2.5.2. La capacitación en Operación y Mantenimiento**

Los miembros del Comité y los encargados de la operación del equipo debían ser capacitados para el manejo y administración de los servicios instalados. En consecuencia la capacitación se dio en dos rubros: técnico y administrativo. En la capacitación se utilizó con bastante insistencia el principio de aprender haciendo, es decir en la medida en que se hacía la instalación las autoridades y pobladores intervenían en el montaje de los equipos; esta metodología tuvo importantes resultados, ya que al final del proceso de instalación se podía contar con un grupo importante de pobladores con el conocimiento y habilidad necesarias para el montaje y desmontaje de la turbina en su conjunto. La capacitación no se limita a la formación de los comuneros a cargo de la operación y mantenimiento de los equipos, sino a toda la población, por cuanto era imprescindible que los pobladores conozcan algunos temas críticos como la capacidad de generación de los equipos y por ende la capacidad de suministro de energía, la necesidad de cuidado en términos de operación y mantenimiento y la necesidad de contar con sistemas sostenibles en el tiempo.

### **2.5.3. Los impactos en la población**

El proyecto durante su desarrollo, atravesó etapas de incertidumbre, sin embargo pese a ello la organización comunal continuó impulsando el desarrollo total del mismo. El liderazgo de los representantes de la comunidad ha sido muy importante para contar con la mano de obra local, así como el apoyo brindado a la instalación de los equipos. Esto ha servido para que otras comunidades como Petrona se hayan beneficiado con la implementación de otros equipos, como parte de este proyecto. La economía de las familias de Puesta de sol, se ha visto favorecida ya que es posible brindar el servicio de cargado de baterías en la propia comunidad y a un costo menor en relación a Mazán, sin incluir los gastos en transporte o tiempo dedicado para este efecto. Se estima que cada familia que hacía uso de este servicio estaría ahorrando un promedio de 6 soles por cada recarga que realice.

El impacto de los servicios de educación y salud han servido para identificar dos factores importantes: la utilización de la energía para el alumbrado de aulas y el funcionamiento de TV y Laptops son importantes, ya que no sólo han mejorado el servicio de iluminación sino que los docentes tienen la oportunidad de utilizar dichos equipos en el proceso de enseñanza - aprendizaje, mejorando así el aprovechamiento de los educandos. La salubridad, beneficiada también por la iluminación en el tópico, es la que hace posible que la atención se realice en condiciones más favorables.

## **2.6. El Agua.**

Según Peñaherrera (2004), el Perú cuenta con un territorio que abarca sólo el 0,87% de la superficie continental del planeta pero al que le corresponde casi el 5% de las aguas dulces del planeta. Esto, que sin duda constituye una ventaja en términos de recurso, sin embargo la realidad nos dice que las aguas superficiales se distribuyen en forma desigual en el tiempo y a través del territorio. El relieve del Perú permite que cualquier gota de agua que drene su territorio lo haga únicamente en tres posibles direcciones: hacia el Océano Pacífico, hacia el Océano Atlántico o hacia el lago Titicaca. Es por esta razón que hablamos de tres grandes conjuntos hidrográficos: la vertiente del Pacífico, la cuenca del Amazonas y la hoya del Titicaca. Cada una de ellas con características distintas. Son las cumbres de la cadena occidental de los Andes las que definen si las aguas de los ríos van a parar ya sea al Océano Pacífico o al océano Atlántico por esta razón a esta línea de cumbres se le denomina la divisoria continental. En el Sur del país los Andes se abren a manera de dos grandes brazos que obligan a los cursos a entregar sus aguas en el lago Titicaca, a ello se le llama cuenca cerrada u hoya, de allí el nombre de hoya del Titicaca.

### **2.6.1. La Cuenca del Amazonas.**

Lo más notorio de los ríos que pertenecen a la cuenca del Amazonas es su enorme longitud si los comparamos con los ríos de la vertiente del Pacífico. Un río como el Ucayali por ejemplo ocupa el primer lugar en longitud en el Perú con un recorrido de 1771 km.

Los 21 ríos de mayor longitud en el Perú pertenecen a la cuenca del Amazonas. Mientras que el Colca - Camaná - Majes con sus 388 km ocupa recién el puesto 22. Debemos añadir que el Amazonas en territorio peruano tiene una longitud de 713 km pero su recorrido total desde sus nacientes hasta su desembocadura es de aproximadamente 6 872 km lo que lo convierte en el más largo del mundo. Debido a la enorme distancia que recorren y a la gran cantidad de afluentes se caracterizan por ser ríos de gran caudal. De hecho el río Amazonas a la altura de la ciudad de Iquitos tiene un caudal de 80 000 m<sup>3</sup> /seg que no tienen punto de comparación con el modesto río Rímac que en promedio trae 20 m<sup>3</sup> /seg (y que con ellos calma la sed de gran parte de la capital del Perú). Debido a su enorme recorrido estos ríos al atravesar terrenos llanos se tornan navegables. De hecho en nuestro país los puertos de Imaza, Iquitos, Pucallpa, Yurimaguas y Puerto Maldonado son sólo algunos de los puertos donde las personas se pueden embarcar en recorridos por la selva. Con sus 50 000 km de recorrido navegable, la red hídrica del oriente peruano es un eficaz modo de transporte si lo comparamos con los aproximadamente 10 000 km. de carreteras asfaltadas con que nuestro país cuenta.

- **Río Urubamba.**

El río Urubamba (o Urupanpa) nace en el nudo de Vilcanota, en el Perú, desde donde recorre gran parte del territorio de la Región Cusco con el nombre de río Vilcanota. Al pasar por la ciudad de Urubamba, recibe el nombre de río Urubamba. Al pasar por Ollantaytambo, el río Urubamba se estrecha y se profundiza. Al confluir con el río Tambo, forman el río Ucayali.

- **Río Ene.**

Al Norte de Sivia, en el Departamento de Ayacucho, el Apurímac cambia de nombre por el río Ene, luego de recibir por su margen izquierdo las aguas del río Mantaro.

- **Río Ucayali.**

Con el nombre del río Ucayali se conoce al Amazonas en su curso medio, cuando recorre el sector comprendido desde la confluencia del Tambo con el Urubamba hasta la desembocadura del río Marañón. Con este nombre recorre los Departamentos de Ucayali y Loreto y discurre por la Selva baja con un cauce meándrico y de poca pendiente, con un ancho que varía de 400 a 2 000 metros, y con una velocidad de sus aguas mucho menor que en su curso superior.

- **Río Pachitea.**

Uno de los mayores afluentes del Ucayali, nace al Este de la ciudad de Cerro de Pasco con el nombre de Huancabamba. (longitud de 550 km) Luego vierte sus aguas al río Palcazú, el que al unirse con el río Pichis pasa a denominarse río Pachitea hasta su desembocadura en el Ucayali, al Sur de la ciudad de Pucallpa. Estudios de su lecho han establecido que el Pachitea no forma meandros y que sus curvas son el resultado de fenómenos tectónicos. El ancho de su lecho varía de 150 a 500 metros; su profundidad en época de creciente permite la navegación de embarcaciones a vapor, durante todo el año.

- **Rio Aguaytia.**

Al norte de la ciudad de Pucallpa entrega sus aguas al río Ucayali, en el Departamento de Ucayali. Nace en la Cordillera Azul con el nombre de río Yuracyacu. Antes de ingresar al llano amazónico, se desplaza por el fondo de un valle en garganta denominado “Boquerón del Padre Abad”, y al pasar por la ciudad de Aguaytía, en el Departamento de Ucayali, toma su nombre. Su longitud es de 380 km.

**TABLA N° 2. PRINCIPALES RIOS DEL PERU.**

Río	Longitud (Km)	Río	Longitud (Km)
Ucayali	1771	Madre de Dios	655
Marañón	1414	Tacuatimanu	621
Putumayo	1380	Tigre	598
Yavari	1184	Purús	483
Huallaga	1138	Corrientes	448
Urubamba	862	Tapiche	448
Mantaro	724	Inambari	437
Amazonas	713	Curaray	414
Apurímac	690	Morona	402
Napo	667	Tambopata	402
<b>Total</b>	<b>10543</b>	<b>Total</b>	<b>4908</b>

FUENTE: CIDEIBER -2005,

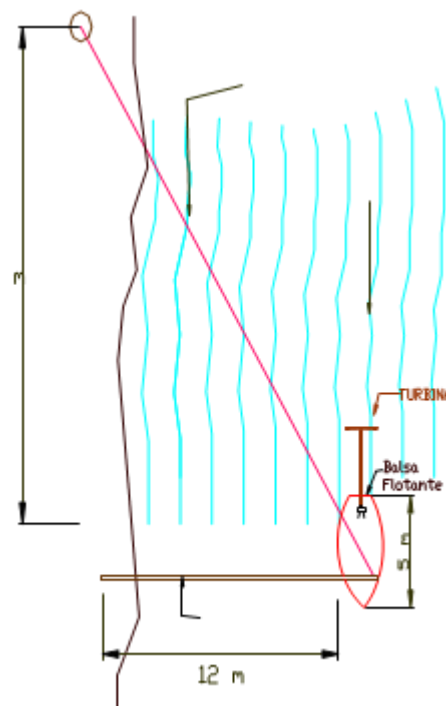
**2.7. Medidas de Protección contra palizadas.**

No existe un mecanismo de protección contra las palizadas que funcione satisfactoriamente en los ríos de la Amazonía. Sin embargo, se tuvo en

consideración un mecanismo de protección contra palizadas utilizada en el Río Amazonas el cual consiste de una línea de troncos flotantes amarrados a cables mediante complementos de sujeción y elementos de amarre. En el extremo de tierra está anclado a un macizo de anclaje en la ribera y la línea de troncos asegura su flotabilidad por la densidad de la madera siendo fijada su posición por boyas, que con sus respectivos anclajes al río aseguran la posición del sistema.

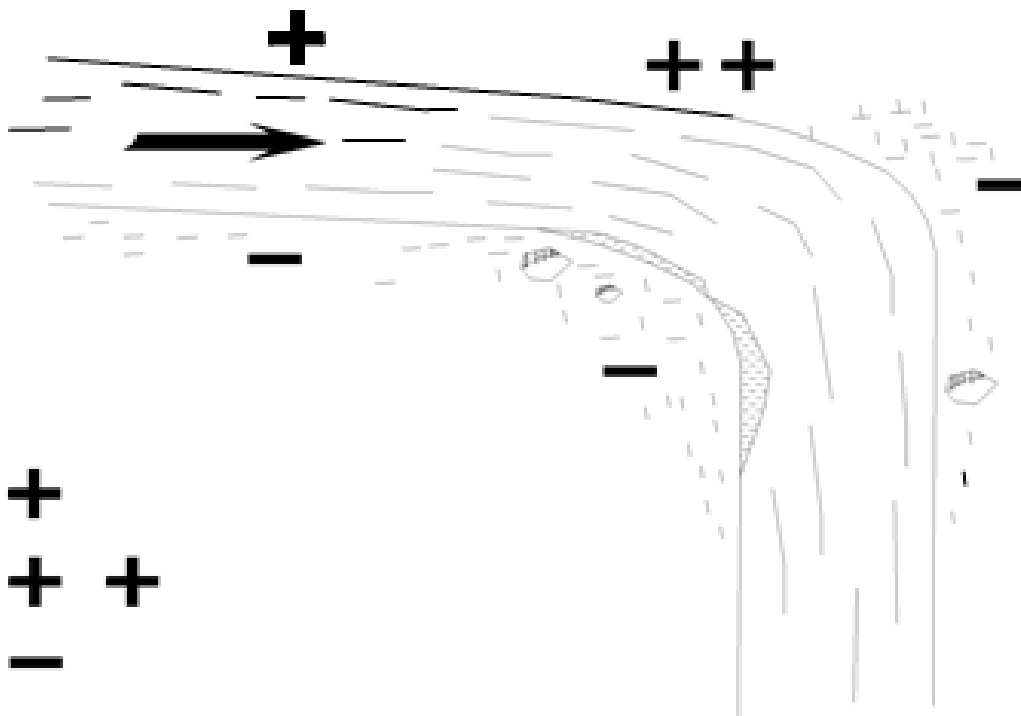
En el caso de la Turbina de Río, se sabe que en el periodo que ha estado en funcionamiento, ésta no ha tenido problemas con arrastre de materiales (ramas, troncos, etc.), no necesariamente por la resistencia del material, sino por la ubicación de la turbina respecto a las corrientes de agua. Por tanto, en la evaluación de campo también es importante identificar el lugar de instalación de la turbina. Además, el sistema se desinstala sencillamente para su traslado a lugares alternativos y de mejores condiciones ante la presencia de palizadas con un mínimo de mano de obra y esfuerzo.

**FIGURA N° 5 Sistema de anclaje para la Turbina de río.**



Fuente: Elaboración propia.

**FIGURA N° 6 Ubicación apropiada para una Turbina de río.**



Fuente: Elaboración propia con referencia a HIDRORED.

**LEYENDA:**

+ = Tramo aconsejable.

++ = Tramo ideal

\_ = Tramo no aconsejable.

**2.8. Consideraciones para satisfacer la Potencia Nominal**

Las consideraciones necesarias para satisfacer la Potencia Nominal de generación de energía eléctrica están relacionadas a la selección del lugar de instalación de la Turbina de Río, por lo tanto es necesario contar con la siguiente información básica en **Temporadas de Vaciante y Creciente**: Según lo descrito en la tabla N° 1.

**2.8.1. La Máxima y Mínima velocidad de la corriente del Río Napo.**

En la Tabla N°1 se da un rango de velocidades del Río Napo, para la Temporada de Vaciante las cuales están comprendidas entre 0,7 m/s y 1.3 m/s.



De la misma tabla, en la Temporada de Creciente, el rango de velocidades fluctúa entre 2.6 y 2,83 m/s. Además para efectos de generación de energía eléctrica, la mínima velocidad de la corriente del río es de 0.5 m/s, a partir de la cual se puede comenzar con la carga de la batería. Cuando la velocidad de la corriente del Río Napo, supera el valor de 1.5 m/s existe la posibilidad de tener sobrecargas en la generación de energía eléctrica. Sin embargo, el Sistema (que incluye a la Turbina, el Pontón, el Sistema de Anclaje, etc.), cuenta además con un **Regulador de Carga**, el cual regula el estado de carga entre límites preestablecidos (para la Turbina de Río éste límite se encuentra entre 0.5 y 1.5 m/s), con lo cual se estaría evitando sobrecargas de generación de energía eléctrica.

### **Nivel Mínimo Útil**

El nivel mínimo útil del Río Napo, depende de la componente vertical del diámetro de la Turbina de Río, ésta es igual a  $2 \times \cos 30^\circ \approx 1.73 \text{ m}$ , lo que nos indica que éste nivel mínimo útil debe ser al menos de 1.75 m. para nuestro caso.

Por lo tanto, tomando en cuenta estas consideraciones como lo son la Máxima y Mínima Velocidad de la corriente del Río Napo, ( $0.5 \leq V_{\text{rio}} \leq 1.5 \text{ m/s}$ ) y el Nivel mínimo útil de la misma (Nivel mínimo =1.75 m), se llega a la conclusión de que la Turbina de Río no tendrá ningún inconveniente para satisfacer la potencia nominal en la generación de energía eléctrica.

## **2.9. Definición conceptual de la terminología empleada.**

### **2.9.1 Definición de Turbomaquina**

Una Turbomaquina hidráulica es un dispositivo que convierte la energía hidráulica en energía mecánica y viceversa; pueden ser motrices (turbinas), o generatrices (bombas), modificando el sentido del flujo de la energía. Todos los fenómenos que se estudian serán en régimen permanente, caracterizados por una velocidad de rotación de la máquina y un caudal, constantes.

En una máquina hidráulica, el agua intercambia energía con un dispositivo mecánico de revolución que gira alrededor de su eje de simetría; éste mecanismo lleva una o varias ruedas, (rodetes o rotores), provistas de alabes, de forma que entre ellos existen unos espacios libres o canales, por los que circula el agua. Los métodos utilizados para su estudio son, el analítico, el experimental y el análisis dimensional.

El método analítico se fundamenta en el estudio del movimiento del fluido a través de los alabes, según los principios de la Mecánica de Fluidos.

El método experimental, se fundamenta en la formulación empírica de la Hidráulica, y la experimentación.

El análisis dimensional ofrece grupos de relaciones entre las variables que intervienen en el proceso, confirmando los coeficientes de funcionamiento de las Turbomaquina, al igual que los diversos números adimensionales que proporcionan información sobre la influencia de las propiedades del fluido en movimiento a través de los órganos que las componen.

## **2.9.2. Clasificación de las Turbomaquina Hidráulicas**

### **2.9.2.1 Según la función que desempeñan**

#### **a) Turbo máquinas Motrices**

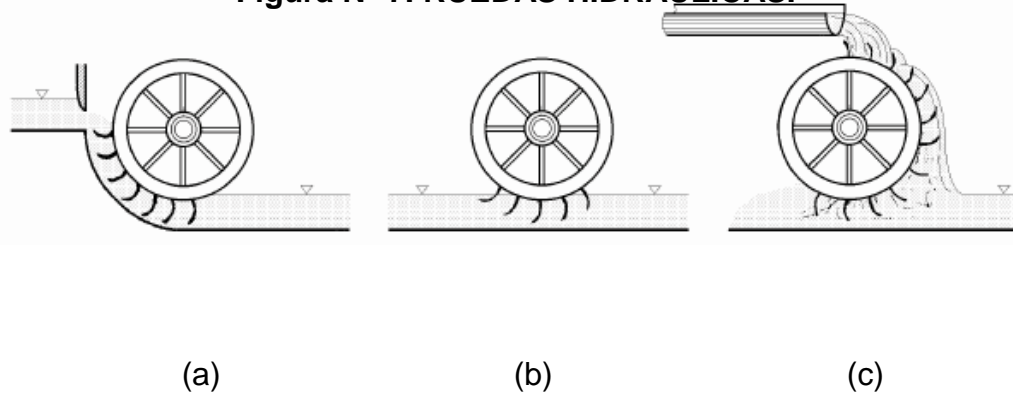
Recogen la energía cedida por el fluido que las atraviesa, y la transforman en energía mecánica, pudiendo ser de dos tipos:

Dinámicas o cinéticas: Ruedas Hidráulicas y Turbinas Hidráulicas.

Estáticas o de presión: Celulares (paletas), de engranajes, helicoidales, etc.

Las **ruedas hidráulicas** son máquinas capaces de transformar la energía del agua, cinética o potencial, en energía mecánica de rotación. En ellas, la energía potencial del agua se transforma en energía mecánica, como se muestra en la Fig.7(c), o bien, su energía cinética se transforma en energía mecánica, como se indica en la Fig. 7 (a) y (b).

**Figura N° 7. RUEDAS HIDRAULICAS.**



Se clasifican en:

- Ruedas movidas por el costado
- Ruedas movidas por debajo
- Ruedas movidas por arriba

Su diámetro decrece con la altura  $H$  del salto de agua. Los cangilones crecen con el caudal. Los rendimientos son del orden del 50% debido a la gran cantidad de engranajes intermedios. El número de rpm es de 4 a 8. Las potencias son bajas, y suelen variar entre 5 y 15 Kw., siendo pequeñas si se les compara con las potencias de varios cientos de MW conseguidas en las turbinas.

Por su parte, una Turbomaquina elemental o monocelular tiene básicamente, una serie de alabes fijos, (distribuidor), y otra de alabes móviles, (rueda, rodete, rotor). La asociación de un órgano fijo y una rueda móvil constituye una célula; una Turbomaquina monocelular se compone de tres órganos diferentes que el fluido va atravesando sucesivamente: el distribuidor, el rodete y el difusor.

El distribuidor y el difusor, (tubo de aspiración), forman parte del estator de la máquina, es decir, son órganos fijos; así como el rodete está siempre presente, el distribuidor y el difusor pueden ser en determinadas turbinas, inexistentes.

El distribuidor es un órgano fijo cuya misión es dirigir el agua, desde la sección de entrada de la máquina hacia la entrada en el rodete, distribuyéndola alrededor del mismo, (turbinas de admisión total), o a una parte, (turbinas de admisión parcial), es decir, permite regular el agua que entra en la turbina, desde cerrar el paso totalmente, caudal cero, hasta lograr el caudal máximo.

Es también un órgano que transforma la energía de presión en energía de velocidad; en las turbinas hélico – centrípetas y en las axiales está precedido de una cámara espiral (voluta) que conduce el agua desde la sección de entrada, asegurando un reparto simétrico de la misma en la superficie de entrada del distribuidor.

El rodete es el elemento esencial de la turbina, estando provisto de alabes en los que tiene lugar el intercambio de energía entre el agua y la máquina.

**b) Turbomáquinas generatrices**, que aumentan la energía del fluido que las atraviesa bajo forma potencial, (aumento de presión), o cinética; la energía mecánica que consumen es suministrada por un motor, pudiendo ser:

a) Bombas de alabes, entre las que se encuentran las bombas centrífugas y axiales

b) Hélices marinas, cuyo principio es diferente a las anteriores; proporcionan un empuje sobre la carena de un buque

**c) Turbomáquinas reversibles**, tanto generatrices como motrices, que ejecutan una serie de funciones que quedan aseguradas, mediante un rotor específico, siendo las más importantes:

Grupos turbina-bomba, utilizados en centrales eléctricas de acumulación por bombeo. Grupos Bulbo, utilizados en la explotación de pequeños saltos y centrales.

**d) Grupos de transmisión o acoplamiento**, que son una combinación de máquinas motrices y generatrices, es decir, un acoplamiento (bomba – turbina), alimentadas en circuito cerrado por un fluido, en general aceite; a este grupo pertenecen los cambiadores de par.

#### 2.9.2.2. Según la presión en el rodete

Las turbinas se clasifican en:

##### **a) Turbinas de acción o impulsión**

En las turbinas de acción el agua sale del distribuidor a la presión atmosférica, y llega al rodete con la misma presión; en estas turbinas, toda la energía potencial del salto se transmite al rodete en forma de energía cinética.

En las turbinas de acción, el empuje y la acción del agua coinciden. Ejemplo la Turbina Pelton.

**Figura N°8. Turbina de Acción.**



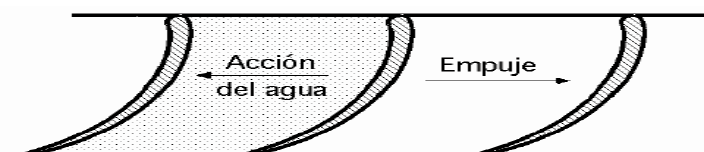
Fuente: Turbo máquinas: Mataiz.

### **b) Turbinas de reacción o sobrepresión**

En las turbinas de reacción el agua sale del distribuidor con una cierta presión que va disminuyendo a medida que el agua atraviesa los alabes del rodete, de forma que, a la salida, la presión puede ser nula o incluso negativa; en estas turbinas el agua circula a presión en el distribuidor y en el rodete y, por lo tanto, la energía potencial del salto se transforma, una parte, en energía cinética, y la otra, en energía de presión.

El difusor o tubo de aspiración, es un conducto por el que desagua el agua, generalmente con ensanchamiento progresivo, recto o acodado, que sale del rodete y la conduce hasta el canal de fuga, permitiendo recuperar parte de la energía cinética a la salida del rodete para lo cual debe ensancharse; si por razones de explotación el rodete está instalado a una cierta altura por encima del canal de fuga, un simple difusor cilíndrico permite su recuperación, que de otra forma se perdería. Si la turbina no posee tubo de aspiración, se la llama de escape libre. En las turbinas de reacción, el empuje y la acción del agua son opuestos. Este empuje es consecuencia de la diferencia de velocidades entre la entrada y la salida del agua en el rodete ( $w_1 - w_2$ ), según la proyección de la misma sobre la perpendicular al eje de giro.

**FIGURA N° 9 TURBINA DE REACCION.**



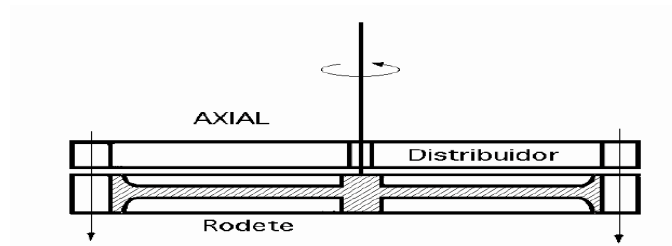
FUENTE: Turbomáquinas: Mataix

2.9.2.3. Según la dirección de entrada del agua  
Estas pueden clasificarse en:

**a) Turbinas Axiales**

En las axiales, (Kaplan, hélice, bulbo), el agua entra paralelamente al eje, tal como se muestra en la Fig. 3.4:

**FIGURA N° 10, Turbina Axial.**

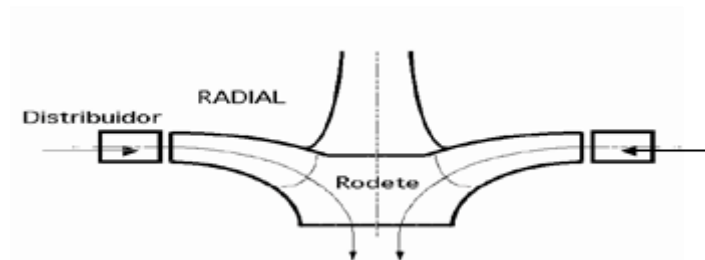


Fuente: Turbomáquinas: Mataix

**b) Turbinas Radiales (centrípetas y centrífugas)**

En las radiales, el agua entra perpendicularmente al eje, siendo centrífugas cuando el agua va de dentro hacia afuera, y centrípetas, cuando el agua va de afuera hacia adentro, (Francis).

**Figura N° 11. Turbina Radial.**

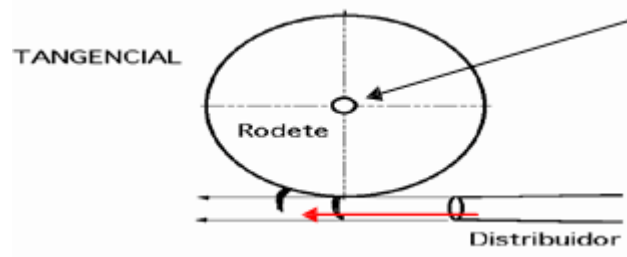


Fuente. Turbomáquinas: Mataix

**c) Turbinas Tangenciales**

En las tangenciales, el agua entra lateral o tangencialmente (Pelton) contra las palas, cangilones o cucharas de la rueda.

**Figura N° 12. Turbina tangencial.**



Fuente. Turbomáquinas: Mataix

### **2.10. Turbinas de Río o de Caída Cero**

La Turbina de Río no es más que un aerogenerador subacuático con un rotor de dos o tres palas. El rotor se suspende desde un pontón flotante, con la transmisión, generador, etc. por encima de la cubierta. Una turbina de río transforma la energía cinética de una masa fluida de agua. A diferencia de un esquema convencional, su instalación no requiere un trabajo de ingeniería civil aparte de un poste de amarre. Esta flexibilidad hace que la turbina sea conveniente para el uso en las corrientes de las mareas y estuarios. El diseño de la Turbina de Río desarrollado y mejorado es la turbina Garman, siendo el Cargador de Baterías, un complemento de esta. Además, dichas turbinas son generadoras de energía descentralizadas aplicables a ciertas áreas sin acceso a una gran red de distribución de energía. La Turbina de Río convierte la fuerza del agua en energía rotatoria del eje, una transmisión que utiliza faja y poleas aumenta la velocidad y un generador transforma la energía mecánica del eje en energía eléctrica.

#### **a) Turbina Garman**

La Turbina Garman fue diseñada originalmente como una máquina para el bombeo de agua, para el suministro de agua a las comunidades para uso agrícola en África del Norte. Posteriormente esta turbina se ha adaptado para generar electricidad y puede además ser utilizado como una máquina para un propósito doble, bombeo de agua o generación de electricidad. Dependiendo de la disponibilidad del recurso, puede producir por encima de los 2 Kw. de potencia generada (o de salida) y es un reemplazo para la bomba diesel (3HP) de tres pulgadas utilizada en muchas situaciones agrícolas.

### **b) Turbina Aquacharger o Cargador de Batería**

El Aquacharger (o cargador de batería) es una turbina para cargar baterías para el suministro de energía eléctrica doméstica o para el uso de los centros de salud del pueblo, las escuelas o instalaciones similares. Es más pequeño que la Turbina Garman y puede producir por encima de los 500W de energía eléctrica.

**Figura N°12 Turbina Aquacharger.**



**FUENTE:** Turbina de Río en la Amazonía, un proyecto demostrativo,

**ITDG, Lima – Perú, 1999.**



## **CAPÍTULO III**

### **3. MARCO METODOLÓGICO.**

#### **3.1. Tipo y diseño de la investigación.**

##### **3.1.1 Procedimiento de cálculo.**

- . Se considera al fluido, que en este caso es el agua, como un fluido incompresible.
- . Se consideran las pérdidas mecánicas de los engranajes o correas que se usen para la transmisión.
- . Se consideran las pérdidas eléctricas debidas a la conversión de energía.
- . Se consideran las pérdidas debidas al flujo no laminar detrás del rotor, estas son las denominadas pérdidas aerodinámicas (factor de ralentización).
- . Se considera la influencia del número de palas sobre el coeficiente de potencia.

Antes de empezar cualquier tipo de cálculo se debe tener en cuenta el perfil a usar. El perfil debe tener un alto coeficiente de sustentación y un bajo coeficiente de arrastre, estos coeficientes definen la fineza del álabe, la cual se relaciona con el rendimiento del álabe; es decir a mayor fineza mayor será el rendimiento del ala.

Teniendo en cuenta la diferencia en las densidades de los fluidos, agua y aire, junto con la teoría de aerogeneradores, y la ecuación 1.26, se puede concluir que ha igualdad de velocidad de corriente de agua y aire se tiene, idealmente, una mayor cantidad de potencia en el flujo de agua que en el flujo de aire.

Pero también se debe tener en cuenta que las velocidades de las corrientes de agua son menores que las velocidad de corrientes de aire.

#### **3.2. Teoría aerodinámica**

Para entender la teoría aerodinámica primero se debe conocer algunos conceptos básicos, tales como cuerda del perfil, intradós, extradós, fuerza de arrastre, fuerza de sustentación, etc. Estos conceptos se presentan a continuación y se explicarán con más detalle a lo largo de esta sección:

$c$  : Cuerda del perfil, línea imaginaria que une el borde de ataque y el borde de fuga.

$t$ : Longitud de la cuerda.

$l$ : Longitud del álabe.

Intradós: Coordenada del perfil ( $x, y$ ) por debajo de la cuerda; en conjunto forman el contorno del perfil por debajo de la cuerda.

Extradós: Coordenada del perfil ( $x, y$ ) por encima de la cuerda; en conjunto forman el contorno del perfil por encima de la cuerda.

Borde ataque: Zona que enfrentada a la corriente del fluido.

Borde de fuga o de salida: Zona opuesta al borde de ataque.

Ángulo de ataque $[\alpha]$ : Ángulo que se forma entre la dirección del flujo y la línea de cuerda del perfil aerodinámico.

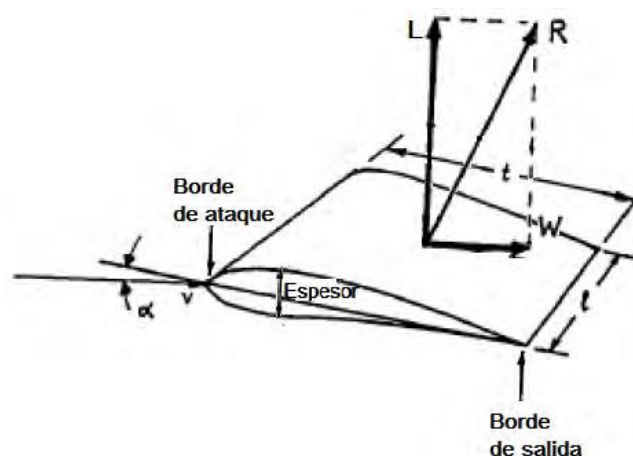
Ángulo de calado $[\delta]$ : Ángulo que forma la cuerda del perfil con el plano de rotación del rotor.

Espesor: Distancia entre los intradós y el extradós.

$L$ : Fuerza de empuje o sustentación.

$W$ : Fuerza de arrastre.

**Figura N°13. Esquema del perfil.**



Fuente. Diseño Aerodinámico de rotores de Aerogeneradores” Federico Vargas – Machuca Saldarriaga, Pontificia Universidad Católica del Perú.

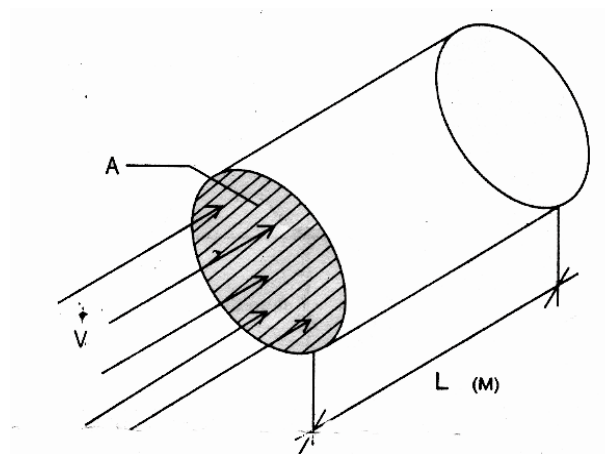
### 3.3. Hipótesis.

Será factible y económica la propuesta de diseñar, calcular y seleccionar los parámetros, conformantes de una turbina hidráulica, para la obtención de energía eléctrica, para zona rurales como es la comunidad de Puesta de Sol, Lonya Grande –Rio – Napo.?

#### 3.3.1. La Energía del Agua

Uno de los parámetros más importantes en el tratamiento de cualquier fuente energética es la potencia. En este caso, cuando se instala una turbina, lo que se hace es interceptar una cierta cantidad de agua en un área de tamaño “A” que viene a ser el área de la turbina, también se le llama área de barrido por la máquina.

**Figura N° 14 Área de barrido.**



Fuente:

En dicha área se produce la transformación de la energía cinética del agua ( $E_c$ ) en potencia mecánica ( $P$ ), que es entregada a través del eje de la turbina.

#### 3.3.2. Potencia Suministrada

La potencia suministrada por una Turbina de Río, depende de la superficie barrida por la hélice y, por tanto, de la longitud y del número de palas.

La energía cinética del agua, debida a la masa de agua en movimiento es:

$$E_c = (1/2) \times m \times v^2 \quad \text{Ec. 1}$$

$m$  = masa del agua, Kg.

$v$  = velocidad instantánea del agua, m/s,

La masa de esta cantidad de agua

Es:

$$m = \rho \times V$$

Ec. 2

Dónde:

$\rho$  = densidad del agua = 1000 kg/ m<sup>3</sup>

V = volumen del cilindro barrido m<sup>3</sup>.

Pero el volumen del cilindro es.

$$V = A \times L$$

Ec. 3

Siendo

A = superficie o área barrida m<sup>2</sup>

L = Longitud del cilindro, m

Además siendo L, un espacio representado por:

$$L = v \times t$$

Ec. 4

V = velocidad del agua m/s.

t = tiempo en s.

Al reemplazar en la Ecuación 1. La energía cinética del agua es.

$$Ec = \frac{1}{2} (\rho A v t) v^2 = \frac{1}{2} \rho A t v^3 \quad (\text{Joule})$$

Por tanto la Potencia teórica del agua (P) será:

$$P = Ec/t = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (\text{Joule/s} = \text{W})$$

En la práctica no es posible extraer toda la potencia disponible de una corriente de río por dos razones:

Primero, para que el agua ceda toda su energía cinética tendría que detenerse, lo que claramente no se puede hacer o lograr en un flujo libre.

Segundo, se debe usar alguna clase de rotor de turbina para convertir la energía cinética del agua en potencia del eje y este rotor está limitado a ser tema de fuerzas de arrastre que disiparan un poco de la energía.

Añadiendo una constante para representar la eficiencia de conversión del flujo del río en potencia en el eje de la turbina, la ecuación anterior se puede

Escribir: 
$$P = (1/2) \times \rho \times A \times v^3 \times C_p. \quad \text{Ec. 5}$$

Siendo  $C_p$  : Coeficiente de Potencia.

### **3.3.3. Factores que afectan la Potencia Suministrada**

A partir de la ecuación anterior se puede observar que hay tres factores que afectan la potencia de salida en el eje de la turbina:

#### **a) La velocidad de la corriente de agua ( $v$ río)**

La potencia del eje de la turbina es proporcional al cubo de la velocidad de la corriente aguas arriba. Esto significa que si se duplica la velocidad del agua, la potencia de salida del rotor será incrementada por un factor de ocho.

#### **b) Área de barrido del rotor ( $A_s$ )**

La potencia en el eje de la turbina es directamente proporcional al área de barrido del rotor.

#### **c) Coeficiente de Potencia ( $C_p$ )**

La potencia de salida es además directamente proporcional al coeficiente de potencia. Es imposible extraer toda la energía del agua fluente porque el agua que ha pasado por el rotor debe alejarse de este y por lo tanto debe aun tener alguna energía cinética. Se puede mostrar teóricamente que el máximo coeficiente de potencia ( $C_p$ . máx) es 0.59 para una máquina que opera sobre fuerzas de sustentación tales como un propulsor (o hélice) o un rotor Darrieus y el valor de 0.33 para una máquina que opera sobre fuerzas de arrastre tales como una rueda hidráulica que flota en una corriente libre.

De lo anterior se puede observar que para obtener la máxima potencia de salida en el eje deberíamos usar el tipo de rotor disponible más eficiente, logrando que este barra un área de sección transversal de corriente de agua tan grande como sea posible y más pretenciosamente, colocarlo en una velocidad de corriente más rápida que se pueda encontrar.

### 3.3.4 Componentes de una Turbina de Río

Para que una Turbina de Río pueda realizar la conversión de la energía cinética del río en energía eléctrica para consumo humano, requiere de un conjunto de componentes tales como: El rotor, las palas del rotor, la transmisión, el generador, el tablero de control, el regulador de carga, el banco de baterías y el convertidor de corriente alterna en continua (diodos rectificadores)

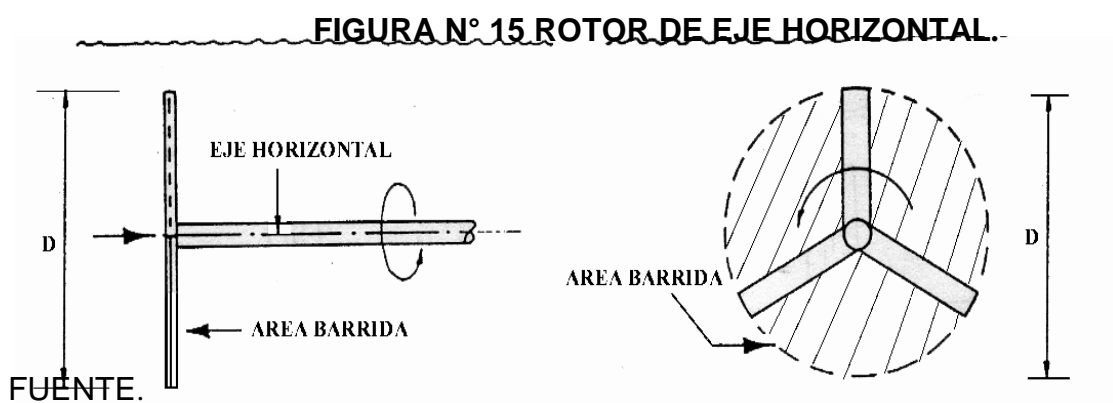
### 3.3.5. El Rotor

Es el componente más importante de la Turbina, su función es extraer del río una fracción de su energía cinética convirtiéndola en energía mecánica que será entregada luego a un generador eléctrico. El Rotor puede estar constituido por dos o tres palas con sección transversal en forma de perfil aerodinámico. Uno de los problemas más significativo en términos de la confiabilidad y larga duración de los rotores es el problema general de la fatiga. Las uniones son particularmente el foco de los problemas de fatiga local acelerados por la vibración que aparece cuando hay embalamiento.

#### a) Rotor de eje horizontal

Si el área barrida transversalmente es perpendicular a la horizontal:

$$A = \pi \times (D^2/4) \quad (\text{m}^2)$$



Siendo D el diámetro del círculo barrido por las palas (m), por lo que la potencia disponible será:

$$P = (1/8) \times \rho \times \pi \times D^2 \times v^3 \times C_p \text{ (W)}$$

Ec. 6

Dónde:

$C_p$  = coeficiente de potencia del rotor de la turbina ó eficiencia del eje de la turbina, adimensional ( $0 \leq C_p \leq 0.592$ )

P = Potencia en el Eje de la Turbina, (W).

Para propósitos de cálculo del diámetro de las palas del rotor, la potencia de diseño será aquella potencia de salida del generador ( $P_g$ ).

Entonces

$$P_g = P \times \eta_g \times \eta_{tr} \quad (\text{W})$$

Donde,

$P_g$  = Potencia de salida del generador, (W).

$\eta_{tr}$  = eficiencia de la transmisión, (adimensional).

$\eta_g$  = eficiencia del generador, (adimensional).

Reemplazando:  $P_g = (1/8) \times \rho \times \pi \times D^2 \times v^3 \times C_p \times \eta_g \times \eta_{tr}$  Ec. 7

Despejando el diámetro D, Se tiene:

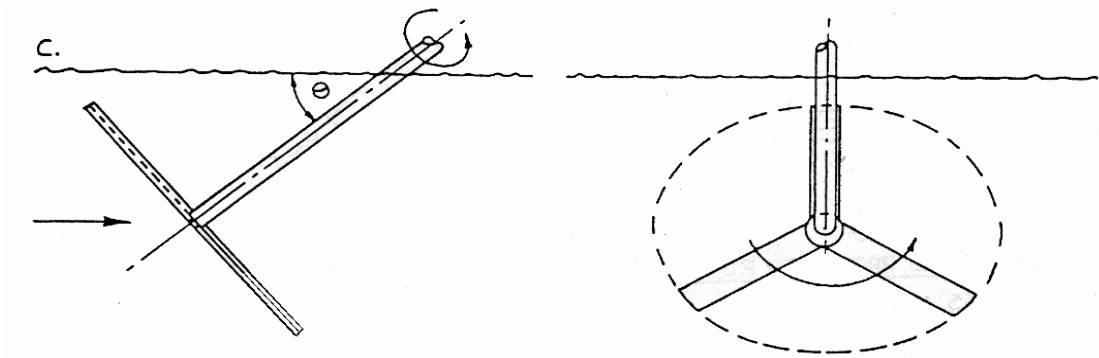
$$D = \sqrt[2]{\frac{2P_g}{\rho \pi v^3 C_p \eta_g \eta_{tr}}} \quad \text{Ec. 8}$$

### b) Rotor de Eje inclinado

Si el rotor es de eje inclinado con respecto del nivel del agua del río, entonces el área barrida perpendicular a la dirección de la corriente del río será

$$A = \pi D^2/4 \cos \theta \quad (\text{m}^2) \quad \text{Ec. 9}$$

Figura N° 16 Rotor de eje inclinado.



Dónde:  $\theta$  es el ángulo formado por el eje de la turbina y el nivel del agua (grados sexagesimales).

Entonces, la potencia disponible será:

$$P = (1/8) \times \rho \times \pi \times D^2 \times \cos(\theta) \times v^3 \times C_p. \quad \text{Ec. 9}$$

Reemplazando al igual que en la ecuación 8 se tiene:

$$D = \sqrt{2 P g / \rho \pi v^3 \cos \theta C_p \eta g \eta_{tr}} \quad \text{Ec.10}$$

#### 3.3.5.1. Las palas o alabes del rotor

Son los elementos encargados de extraer parte de la energía cinética del río y transformarla en energía mecánica en el eje de transmisión a través del giro de las mismas palas.

### a) Dimensionamiento del alabe de la turbina

Para los alabes de la Turbina de Río, generalmente se usan perfiles estándares como lo son los perfiles NACA.



Asimismo, debido a la alta velocidad que requieren para ser acoplados a los generadores eléctricos, se hace necesario hacer un cálculo hidrodinámico cuidadoso y su cálculo se hace en forma iterativa y sección por sección para diferentes posiciones del alabe, a lo largo del radio. Sin embargo, con buena precisión y para fines prácticos se pueden usar las ecuaciones de la teoría del diferencial de pala antes expuestos, y que para el caso de pequeñas maquinas son lo suficientemente precisas. Esta teoría del diferencial de pala simplificada se utiliza cuando el requerimiento de potencia no es muy grande y la velocidad de diseño del río no es mayor de 1.5 m/s. Para este caso, se usa una celeridad de diseño o relación de velocidad en la punta de la pala  $\lambda_0$  de 5, que se convierte en un dato de entrada. Una vez conocido el diámetro de la turbina, que resulta de la ecuación de potencia, sigue el dimensionamiento de las palas y para esto se hace necesario tomar algunas decisiones adicionales sobre: el número de palas a utilizar, el tipo de sección estándar que se usará para la fabricación de la pala entre otros. Tabla 3.

**Tabla N° 3 NUMERO DE PALAS EN FUNCION A LA CELERIDAD**

<b>Celeridad (<math>\lambda_0</math>)</b>	<b>N°de alabes recomendados (Z)</b>
<b>1</b>	<b>6-20</b>
<b>2</b>	<b>4-12</b>
<b>3</b>	<b>3-6</b>
<b>4</b>	<b>2-4</b>
<b>5-8</b>	<b>2-3</b>
<b>8-15</b>	<b>4-2</b>

#### **b) La Linealización del alabe**

Este concepto viene siendo utilizado por los diseñadores y fabricantes desde comienzos de la década de los 80's (siglo pasado); que consiste en transformar tanto a la cuerda C del alabe como al ángulo ( $\beta$ ) en parámetros lineales dependientes de la posición del radio.

Cuando se realizan los cálculos se puede notar que el ángulo del alabe tiene una torsión a lo largo del radio. Del mismo modo, la cuerda hace que las secciones del alabe no varíen uniformemente a lo largo del radio, lo cual conlleva serias dificultades en la fabricación del alabe cuando no se cuenta con tecnología avanzada.

A fin de dar solución a las dificultades constructivas mencionadas, actualmente se aplica el concepto de la Linealización de la pala que consiste en convertir la variación del ángulo  $\beta$  y la cuerda  $C$  en dos rectas trazadas a partir de los puntos  $r = 0.5 R$  y  $r = 0.9 R$ . Como resultado de la linealización del perfil, cuya geometría hidrodinámica fue calculada teóricamente se obtienen nuevos valores de  $\beta$  ( $^\circ$ ) y  $C$  (cm) y se los tabula.

Es importante señalar que el cambio de un diseño de alabe teórico a uno linealizado no implica una pérdida significativa de potencia, esto es explicable por cuanto el mayor aporte en la generación de potencia en el rotor se da en la zona más alejada de su centro ya que los cambios tanto de  $C$  como de  $\beta$  no son significativos en el rango  $0.5 R \leq r \leq 0.9 R$ , lo contrario sucede cerca de la raíz del alabe.

Las rectas de linealización toman como puntos de paso  $r = 0.5R$  y  $r = 0.9R$ . Luego a partir de las rectas obtenidas se procede al cálculo de la cuerda y ángulo definitivos.

### **c) Consideraciones sobre la Velocidad Angular de la Turbina**

Los parámetros que influyen en la velocidad angular de las turbinas son:

- El tamaño del rotor, en términos del diámetro del rotor.
- La celeridad  $\lambda_0$ , que se escoge a conveniencia del diseño a desarrollar. Para generar electricidad se trabaja con valores de  $\lambda$  de al menos 5, mientras que para bombeo de agua, se usan valores de alrededor de 10.

#### **3.3.5.2. El eje de transmisión.**

Se cuenta con un árbol hueco de transmisión de acero galvanizado de 1.5 plg., de diámetro nominal el cual esta acoplado directamente al rotor, este tubo va encapsulado en otro de las mismas características con 2.5 plg., de diámetro nominal que sirve de soporte y protección. Se muestra la tabla que contiene algunos diámetros comerciales para tubos de acero galvanizado en el anexo, Tabla1.

### **Rodamientos del Rotor**

El eje del rotor debe ser sostenido en rodamientos o cojinetes que lo sostiene en la posición correcta relativa a la corriente del río y permiten que éste gire tan libremente como sea posible.

Si se tiene que sostener el eje en cada extremo por un rodamiento montado sobre una estructura, al menos uno de los rodamientos debe permitir algún movimiento axial para soportar la flexión de la estructura y ambos deben permitir algún desajuste para compensar los errores del montaje.

El rotor Propulsor de eje inclinado tiene un rodamiento por encima del agua por lo que es conveniente un cojinete de una sola hilera de bolas. El rodamiento utilizado es del tipo auto alineado y sellado o montado en una polea de hierro fundido tan comúnmente utilizado en maquinaria agrícola. Este rodamiento proporciona una ubicación axial para el eje del rotor, además conduce el empuje axial hacia el rotor. Además, se tiene un rodamiento en el otro extremo del eje ubicado dentro del agua, el cual presenta las mismas características que el anterior rodamiento

### **La Transmisión**

Es el elemento encargado de transmitir la potencia mecánica del rotor al generador eléctrico. Su función consiste en elevar la velocidad del rotor desde unos cuantos rpm hasta velocidades de cientos rpm que son las requeridas usualmente por los generadores comunes. Como elementos de transmisión se utilizan fajas y poleas.

Se dispone de una fracción de la energía de la corriente del río extraída por el rotor de la turbina en el eje que gira el cual ejerce un torque (o fuerza que la hace rotar) en contra de una carga. Las fajas planas montadas sobre superficies convexas de la polea son de difícil desgaste, no son muy afectados por el sol y la lluvia y toleran un desajuste. La eficiencia de la transmisión por faja plana para nuestro caso es alrededor del 85 %, dando un alineamiento razonable del eje.

#### **3.3.5.3 El Generador Eléctrico**

Es el componente productor de la energía eléctrica que se acopla directa o indirectamente al eje de la turbina. Es la parte encargada de transformar la energía mecánica recibida por el rotor en energía eléctrica útil. Existen dos tipos de generadores, en general, los de corriente alterna CA y los de corriente continua CC.

Siendo más usados los de CA debido a que trabajan bien a distintas rpm, mientras que los de CC necesitan de rpm casi constantes y altas velocidades de rotación lo cual no es muy fácil de conseguir con una Turbina de Río debido a la naturaleza variable de la velocidad del río que provoca también la variación de la velocidad de giro del rotor.

#### **a) Características de los generadores**

##### **• Voltaje**

En nuestro medio se venden generadores monofásicos con voltajes de salida de 12, 24, 120 y 240 V, y generadores trifásicos que utilizan 240/415 V. Cuando no se considera el uso de transformadores de voltaje, entonces los equipos y los aparatos que se conectaran al sistema deberán ser compatibles en voltaje.

##### **• Perdidas por conversión de energía**

Esto se debe a que cada componente del sistema pierde energía en forma de fricción, calor, ruido, etc. La eficiencia de los generadores para producir energía útil varía entre 60% para pequeños generadores de corriente alterna, 80% para rangos entre 5 – 10 Kw. y 90% para equipos mayores a 50 Kw.

##### **• Potencia de salida**

Es la potencia que queda luego de haber considerado todas las perdidas en el sistema, está en función de la eficiencia del equipo completo. Conociendo la eficiencia de los generadores, se puede predecir con aproximación la potencia de salida del generador que se desea utilizar. Sin embargo, estos datos deben ser suministrados por el proveedor de estos equipos al momento de su venta.

##### **• Factor de potencia ( $\cos\phi$ )**

Si el circuito externo es solamente resistivo, entonces la corriente y el voltaje se hallan en fase, el valor de uno es directamente proporcional al del otro y el factor de potencia es  $\cos\phi = 1$ . Ya que el voltaje y la corriente varían con el tiempo, en la siguiente expresión se trata del valor promedio de la potencia de salida del generador.

$$P_o = E_o \times I_o$$

Ec. 11

Dónde:

$P_o$  = Potencia efectiva, (W)

$E_o$  = Voltaje efectivo (V)

$I_o$  = corriente efectiva (A)

Para cargas resistivas, el valor de la potencia en volt – amperios o vatios es el mismo. Por ejemplo, si un generador de 220 V genera una corriente de 25 A, tendría una potencia de salida de  $220 \text{ V} \times 25 \text{ A} = 5.5 \text{ Kw}$ .

### **b) Generadores de Corriente Alterna**

Los generadores de corriente alterna o simplemente alternadores pueden ser de tipos: monofásicos y trifásicos. Comercialmente se pueden adquirir generadores monofásicos para cubrir todos los rangos de potencia, mientras que los trifásicos cubren los rangos de 2– 3 Kw. Sin embargo, la generación monofásica se utiliza en esquemas menores a 10 – 15 Kw. ya que, por debajo de esta potencia nominal, las cargas individuales representarían un gran porcentaje del total de la capacidad del generador y balancear las cargas se tornaría muy difícil.

Entre los generadores de velocidad constante se tiene el síncrono aplicable para potencias medias y altas, el de inducción para potencias pequeñas y el de magnetización permanente (imanes permanentes), para potencias muy pequeñas.

#### **3.3.5.4. El tablero de Control**

Cuenta con los instrumentos de medición básicos (voltímetro y amperímetro), y los respectivos diodos rectificadores de corriente alterna en continua para 12 V.

#### **a) El convertidor**

Es el componente encargado de convertir la corriente continua proveniente de las baterías en corriente alterna. Los dispositivos convertidores se caracterizan por su elevado costo y por su reducida eficiencia por lo que deberían ser los más pequeños posibles.

Los convertidores pueden ser rotativos y estáticos; el rotativo o dinámico es un motor de CC que gira a una velocidad constante y que está conectado a un generador de CA, su eficiencia es del orden de 50 a 75% y presenta una corriente de vacío de 15 a 20%.

El convertidor estático de estado sólido convierte la CC en CA de 60 Hz. a través de medios electrónicos, su eficiencia es del 85% y solo lleva una corriente de vacío de 2 a 4%. Los convertidores rotativos cuestan menos que los estáticos y cuando compiten en función de la carga no hay mucha diferencia entre ambos en lo que respecta a pérdidas. Sin embargo, el uso de este dispositivo no es recomendable en la presente aplicación por ser de naturaleza doméstica.

### **b) El regulador de carga**

Es importante conocer el funcionamiento de un regulador o controlador de carga, porque éste es necesario cuando se utilizan baterías. El controlador de carga es un dispositivo electrónico que regula el estado de carga entre límites preestablecidos. El voltaje de las baterías se mide y se toma como factor principal para estimar el estado de carga, además del voltaje, algunos controladores miden la temperatura de la batería. Es muy importante el uso de un controlador de carga para incrementar la vida útil de las baterías.

### **c) La batería**

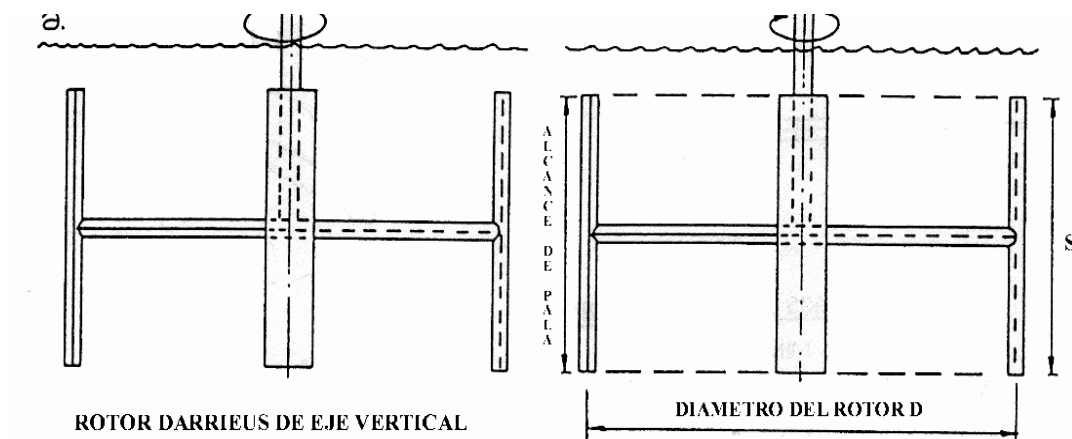
Es la parte encargada de almacenar la energía eléctrica producida por el generador en forma de corriente continua. Existen dos grandes tipos de baterías para el almacenamiento de electricidad, la de plomo – ácido y la batería alcalina (tanto la de níquel – hierro como la de níquel –cadmio).

### **3.3.6. Selección del Rotor**

La función del rotor de la turbina es convertir tanto como sea posible del flujo la energía cinética a través de este en potencia útil del eje. Hay dos tipos básicos de rotor que operan bajo diferentes principios: Las máquinas que tienen sus superficies efectivas moviéndose en la dirección de la corriente y que son empujados por el arrastre del agua (resistencia al avance).

Por ejemplo una rueda hidráulica y las maquinas que tienen sus superficies efectivas moviéndose a un ángulo de la dirección del agua y que opera bajo fuerzas de sustentación, por ejemplo el rotor de propulsión (o de hélice) y el rotor Darrieus como lo muestran las Figuras en varios dispositivos alternativos.

**Figura N° 18. Esquemas de Rotores de Turbinas alternativas**



Mínimo de 4 palas

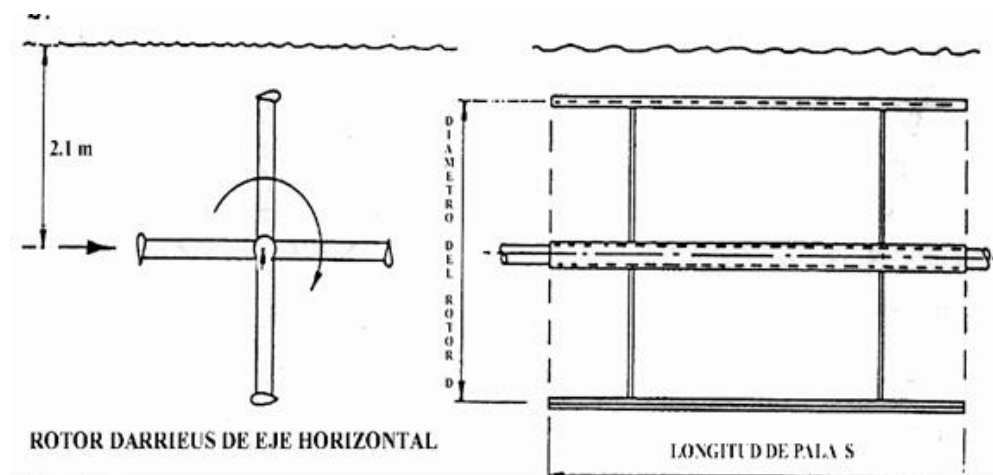
Profundidad requerida = 2.1 m

R.P.M a velocidad de 1 m/s = 13.5

Área de barrido =  $s \times d$

$S = 1,25 \text{ m}$  ;  $d = 2.2 \text{ m}$

$A_s = 2.72 \text{ m}^2$



Mínimo de 4 palas

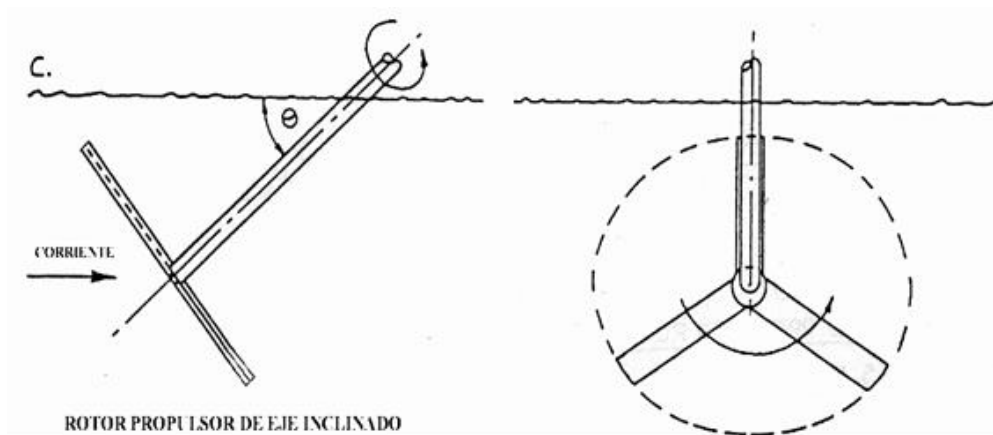
Profundidad requerida = 2.1 m

R.P.M a velocidad de 1 m/s = 32

Área de barrido =  $s \times d$

$S = 2,2 \text{ m}$  ;  $d = 1,25 \text{ m}$

$A_s = 2.72 \text{ m}^2$



Mínimo de 3 palas

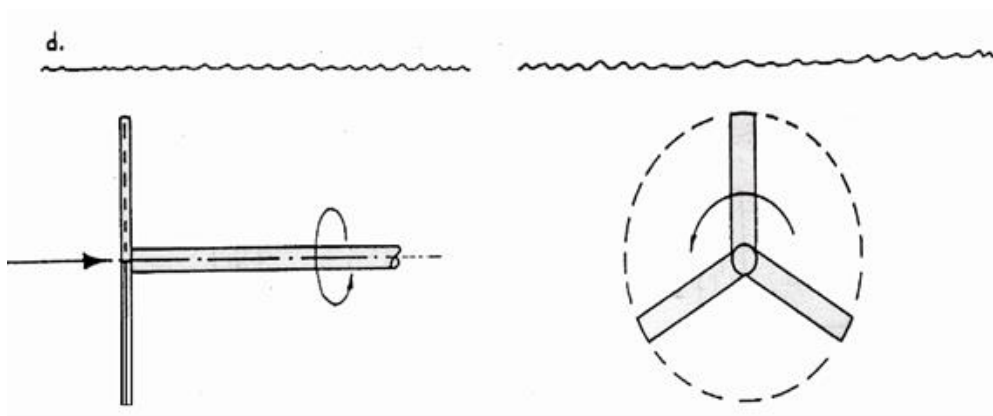
Profundidad requerida = 1,75 m

R.P.M a velocidad de 1 m/s = 48

Área de barrido =  $\pi d^2 \cos \theta / 4$

$\theta = 30^\circ$  ;  $d = 2,0 \text{ m}$

$A_s = 2.72 \text{ m}^2$





### Rotor propulsor de eje horizontal

Mínimo de 3 palas

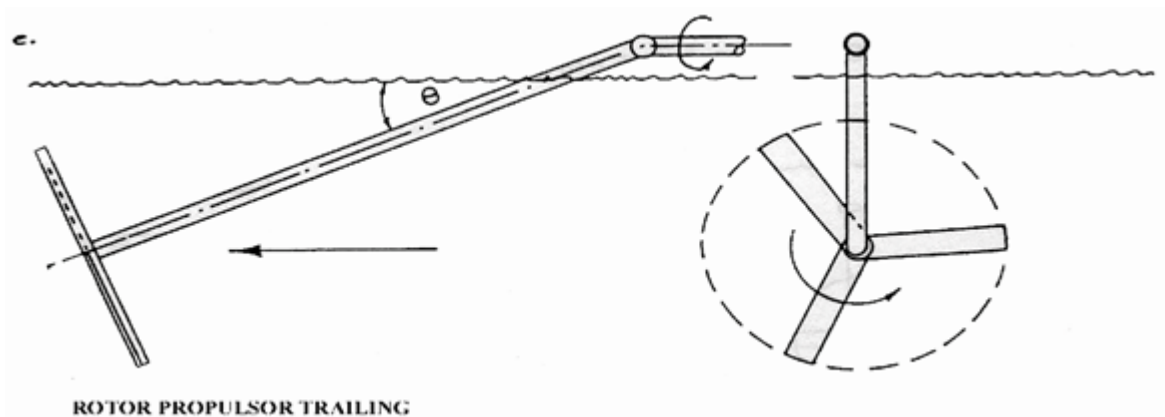
$$\text{Área de barrido} = (\pi/4) \times d^2$$

Profundidad requerida = 3 m

$$d = 1.86 \text{ m}$$

R.P.M a velocidad de 1 m/s = 48

$$As = 2.72 \text{ m}^2$$



Mínimo de 3 palas

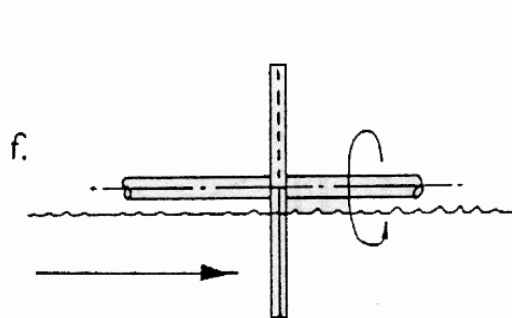
$$\text{Área de barrido} = (\pi/4) \times d^2 \times \cos\theta$$

Profundidad requerida = 2.9 m

$$\theta = 20^\circ, d = 1.92 \text{ m}$$

R.P.M a velocidad de 1 m/s = 25.5

$$As = 2.72 \text{ m}^2$$



Mínimo de 4 palas

$$\text{Área de barrido} = (\pi) \times (d^2/8) - 0.1d$$

Profundidad requerida = 2.1 m

$$d = 2.76 \text{ m}$$

R.P.M a velocidad de 1 m/s = 15

$$As = 2.72 \text{ m}^2$$

Las diferentes turbinas alternativas de la Fig. 18, muestran las dimensiones y la profundidad del agua requerida para cada uno de los rotores para producir la potencia de salida que se muestra. Por comparación se asume que todos los rotores mostrados tienen el mismo coeficiente de potencia pero que de los diseños probados por ITDG el rotor de propulsión fue el más eficiente.

### **3.3.7. Materiales para la Construcción del Rotor**

Se ha empleado mucho tiempo y esfuerzo en la investigación de los diferentes materiales para la construcción del rotor. Durante este periodo han sido probados los siguientes materiales:

- Acero Inoxidable
- Aleación de Aluminio Sólido.
- Madera Noble (Dura) laminada revestida con plástico reforzado de fibra de vidrio.
- Madera Noble sin tratamiento.
- Concreto Armado (a) Sin tratamiento, (b) Pintada, (c) Forrada con una lámina de aleación de aluminio.

De todas estas alternativas, todas han sido probadas satisfactoriamente en la parte estructural excepto el de la madera sin tratamiento, la cual se deforma y se raja en el agua. A partir del punto de vista del funcionamiento el acabado superficial es crítico, y cualquier deterioración causa una reducción drástica de la potencia en el eje. Los únicos materiales que mantuvieron su acabado superficial y gran nivel de funcionamiento fueron las de acero inoxidable y las aleaciones de aluminio. Es esencial eliminar todas las huellas de pintura y del imprimante del metal, puesto que el contacto entre el imprimante y el agua puede originar una seria corrosión en la superficie.

### **3.4. Selección del Lugar**

Las turbinas de corriente de río son una tecnología específica del lugar, además el diámetro del rotor de la máquina dependerá de la velocidad de la corriente del río.

Es necesario inspeccionar el lugar sugerido para la máquina para proporcionar la siguiente información básica:

- La máxima y mínima velocidad de la corriente del río para los meses que la máquina será utilizada.
- La mínima profundidad del río en la posición donde la turbina operara y la mínima profundidad en la orilla del río. Riesgos medioambientales tales como escombros flotantes, circulación del río, etc.

#### **3.4.1 Mínima Velocidad de Corriente Útil**

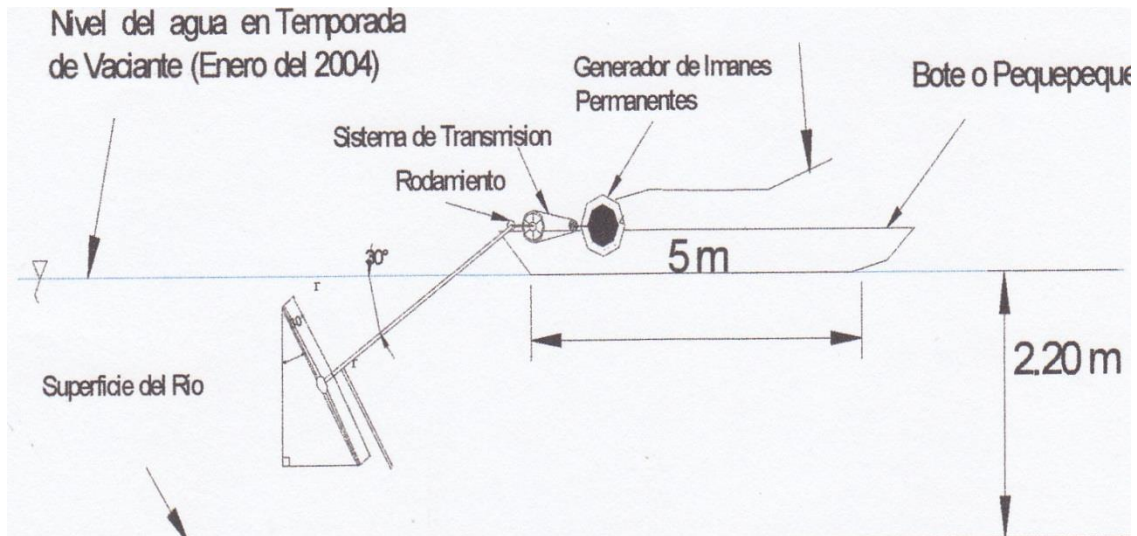
Para extraer una cantidad dada de potencia la máquina se vuelve más grande a medida que la velocidad de corriente disminuye. Una máquina a una velocidad de corriente de 0.5 m/s tendría que ser ocho veces el tamaño de una máquina a una velocidad de corriente de 1 m/s para producir la misma potencia en el eje. Como se puede tener en cuenta que la mínima velocidad de corriente útil es la de diseño e igual a 1 m/s.

#### **3.4.2 Profundidad Mínima Útil**

La profundidad requerida del agua será menor en velocidades de corrientes más rápidas debido al área reducida de barrido (es decir un rotor más pequeño) apropiado para la máquina. En una velocidad de corriente de 1.8 m/s se requiere una profundidad del agua de 1.6 metros para extraer una potencia hidráulica de salida de 800 Watts de la máquina.

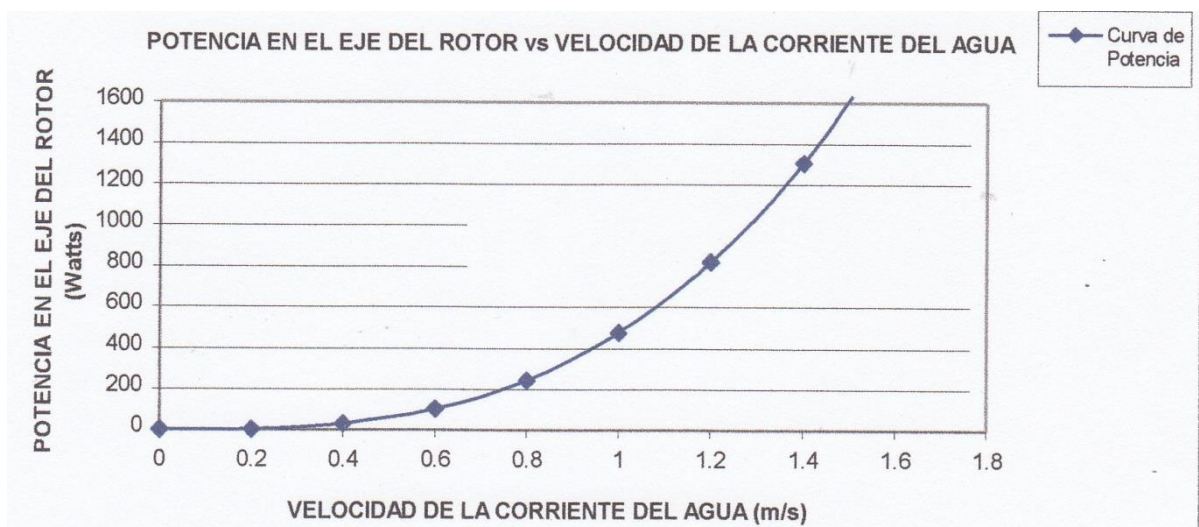
De lo anterior podemos concluir que una corriente de agua debe tener una velocidad de al menos 0.8 m/s y una profundidad de al menos 1.75 metros antes de que se puedan extraer cantidades convenientes de potencia por turbinas que operan en corriente libre.

**Figura N° 19. Instalación de la Turbina de Río.**



**FUENTE: ELABORACION PROPIA.**

**FIGURA N° 20 POTENCIA VS, VELOCIDAD DEL RIO**



**FUENTE: ELABORACION PROPIA.**

**AREA DE BARRIDO: 2,72m<sup>2</sup>**

**Coeficiente de potencia ( $C_p = 0.35$ )**

### 3.5. Sistema de Anclaje

El sistema de anclaje a la maquina en la corriente del río cuando éste esta funcionando y permite que esta sea fácilmente traída o regresada a la orilla para mantenimiento. La reacción del agua en las quillas o timones proporciona la fuerza necesaria para mantener a la turbina en la corriente. Para proporcionar la fuerza, las quillas deben ser mantenidas en un ángulo a la dirección del flujo y esto se hace dividiendo el cable de amarre delante de la máquina y uniendo un extremo del estribo en cada lado del centro de arrastre. Alterando la longitud relativa a los cables es posible ajustar la distancia de la turbina de la orilla. El área de la quilla debe ser al menos tan grande como el área de barrido del rotor para evitar que el pontón tenga que ser colocado en un ángulo grande a la dirección de la corriente el cual disminuirá el área efectiva de barrido del rotor.

Si los cables son arreglados correctamente la turbina puede ser fácilmente traído o empujado hacia la orilla por medio de la soga o cable de control. Jalando esto moverá las quillas paralela a la corriente y la maquina se dejara llevar por la corriente despacio hacia la orilla. Si el agua cerca de la orilla es superficial primero será necesario elevar el rotor. La máquina es regresada a su posición en el río simplemente empujando el extremo aguas arriba del pontón en la corriente.

### 3.6. Eficiencia Total y Pérdidas en una Turbina de Río

#### a) Eficiencia Total del Sistema ( $\eta$ total)

$$\eta_{\text{total}} = C_p \times \eta_{tr} \times \eta_g \dots \quad \text{Ec. 12}$$

Dónde:

$C_p$  = Coeficiente de Potencia

$\eta_{tr}$  = Eficiencia de la transmisión

$\eta_g$  = Eficiencia del generador

#### b) Pérdidas en una Turbina de Río

### **A la entrada del rotor ( $\Delta P_1$ )**

PDisp = Potencia disponible del río.

$$PDisp = (1/2) \times \rho \times A \times v^3 = (1/8) \times \rho \times \pi \times D^2 \times \cos(\theta) \times v^3, \quad \text{Ec. 13}$$

Peje = Potencia en el eje de transmisión

$$Peje = PDisp \times C_p = (1/8) \times \rho \times \pi \times D^2 \times \cos(\theta) \times v^3 \times C_p. \quad \text{Ec. 14}$$

Entonces:

$$\Delta P_1 = PDisp - Peje = PDisp - PDisp \times C_p = PDisp (1 - C_p)$$

### **En la transmisión ( $\Delta P_2$ )**

Peje = Potencia en el eje de transmisión

$$Peje = PDisp \times C_p$$

Peg = Potencia a la entrada del generador

$$Peg = PDisp \times C_p \times \eta_{tr}$$

Entonces:

$$\Delta P_2 = Peje - Peg = PDisp \times C_p - PDisp \times C_p \times \eta_{tr} = PDisp \times C_p (1 - \eta_{tr}) \quad \text{Ec.15}$$

### **En el generador ( $\Delta P_3$ )**

Peg = Potencia a la entrada del generador

$$Peg = PDisp \times C_p \times \eta_{tr}$$

Psg = Potencia a la salida del generador

$$Psg = PDisp \times C_p \times \eta_{tr} \times \eta_g$$

Luego:

$$\Delta P_3 = Peg - Psg = PDisp \times C_p \times \eta_{tr} - PDisp \times C_p \times \eta_{tr} \times \eta_g$$

$$\Delta P_3 = PDisp \times C_p \times \eta_{tr} (1 - \eta_g) \quad \text{Ec.16}$$

### **3.7 Análisis Estadístico e interpretación de los datos.**

Este capítulo se refiere a la definición de los parámetros tecnológicos para el diseño de ingeniería de la Turbina de Río.

#### **3.7.1. Del Diseño Conceptual**

En lo tecnológico queda conceptualmente definido a diseñar la Turbina de Río con las siguientes características:

- a) Máquina “lenta” y con baja velocidad de diseño, ello permite más horas de trabajo al año, este criterio afecta especialmente el diseño de la turbina el cual tendrá una vida útil más larga.
- b) Fabricación en serie, siendo para ello lo más conveniente el uso de fibra de vidrio para los alabes (palas), ya que se puede trabajar con modelos y moldes que facilitan su producción en serie.
- c) Generador eléctrico de imanes permanentes, la principal ventaja de este tipo de generadores es que trabaja en un amplio rango de velocidades de giro y por lo tanto se acoplan muy bien con las turbinas de río las cuales giran acorde a la velocidad del río existente en la zona.
- d) Simplicidad para la instalación, operación y mantenimiento.
- e) Almacenamiento de la energía generada, utilizando baterías automotrices de 12V por ser las más comerciales y baratas.
- f) Se debe tener en cuenta todas las facilidades de instalación y la necesidad de la menor intervención posible de personal especializado en el montaje de la turbina, de tal forma que pueda ser instalado por agentes locales.

#### **3.7.2 Del Diseño de Ingeniería**

El diseño de esta máquina fue desarrollado utilizando las ecuaciones aerodinámicas correspondientes, utilizando perfiles estandarizados para la sección de los alabes (palas) y la necesaria compatibilidad entre los parámetros de la turbina con los del generador.

### 3.7.2.1 Cálculo del Diámetro del Rotor

Para este cálculo se utilizó la ecuación de potencia de las turbinas de río con eje inclinado. Ecuaciones 9 y 10.

$$P = (1/8) \times \rho \times \pi \times D^2 \times \cos(\theta) \times v^3 \times C_p$$

$$D = \sqrt{2 P g / \rho \pi v^3 \cos \theta C_p \eta g \eta t r}$$

D: Diámetro del rotor de la turbina de río, (m).

P: Potencia de diseño de la turbina, (W).

$\rho$  : Densidad del agua, 1000 kg/m<sup>3</sup> a nivel del mar.

v: Velocidad del río, (m/s).

C<sub>p</sub>: Coeficiente de potencia, (adimensional).

$\eta$  g: Eficiencia del generador, (adimensional.)

$\theta$  : Es el ángulo formado por el eje de la turbina y el nivel del agua, (° ).

Utilizando la ecuación de potencia (9), y ecuación (10) del diámetro, con un C<sub>p</sub> = 0.35, velocidad del río igual a la velocidad de diseño de 1 m/s, densidad del agua de 1000 kg/m<sup>3</sup>, potencia de diseño de 250 W a la salida del generador y una eficiencia del 66% para el generador (valor aceptable en pequeños generadores de imanes permanente), y un ángulo de inclinación con respecto al nivel del agua de 30° se obtiene un diámetro de aproximadamente 2 m.

**TABLA N° 4.VARIACION DEL DIAMETRO VS. VELOCIDAD.**

VELOCIDAD (m/s)	RADIO (m)	DIAMETRO (m)
0.5	2.74	5.47
0.6	2.08	4.16
0.7	1.65	3.30
0.8	1.35	2.70
0.9	1.13	2.27
<b>1</b>	<b>0.97</b>	<b>1.93</b>
1.1	0.84	1.68
1.2	0.74	1.47
1.3	0.65	1.31
1.4	0.58	1.17
1.5	0.53	1.05

FUENTE PROPIA CON DATOS DE VELOCIDAD.



Además, considerando que la celeridad, ( $\lambda$ ) es:

$$\lambda = v_t / v_o$$

Ec. 17

$v_t$  = velocidad tangencial al extremo de la pala m/s =  $\pi D N/60$

$v_o$  = velocidad de diseño m/s.= 1 m/s

D = diámetro de la pala en m. = 1.93 m

N = rpm de la pala

Arreglando, se tiene:  $\lambda = \pi D N / 60 v_o$

Seleccionando un valor de 5, para la celeridad ( $\lambda$ ) de la tabla N°3. (pg.37)

Se tiene:  $N = 60 \times 1 \text{ m/s} \times 5 / \pi \times 1,93 \text{ m} = 47 \text{ rpm}$

**TABLA N° 5. CALCULO DE LAS RPM**

Radio (m)	Diámetro(m)	Velocidad	V0	w (rad/s)	N (rpm)
2.74	5.47	0.50	0.43	0.79	7.56
2.08	4.16.	0.60	0.52	1.25	11.92
1.65	3.30	0.70	0.61	1.83	17.52
1.35	2.70	0.80	0.69	2.56	24.47
1.13	2.27	0.90	0.78	3.44	32.84
<b>0.97</b>	<b>1.93</b>	<b>1.00</b>	<b>0.87</b>	<b>4.48</b>	<b>47,0</b>
0.84	1.68	1.10	0.95	5.68	54.24
0.74	1.47	1.20	1.04	7.06	67.42
0.65	1.31	1.30	1.13	8.62	82.36
0.58	1.17	1.40	1.21	10.38	99.12
0.53	1.05	1.50	1.30	12.33	117.78

FUENTE: PROPIA .ELABORADA CON DATOS DE VELOCIDAD.

El valor seleccionado para la celeridad de diseño, es un valor moderado, conveniente para zonas de regímenes de velocidades de río moderados, como es el caso de la mayoría de zonas de posible aplicación de esta turbina, se puede considerar también como un valor conservador.

### 3.7.2.2. Cálculo de la sección del alabe y selección del perfil

Para el cálculo de la sección del alabe se utilizaron las siguientes ecuaciones.<sup>1</sup>, de la 18 a la 21.

<sup>1</sup>Las Ecuaciones se obtienen a partir del análisis de la Teoría de la Turbina Eólica.

$$\lambda r = \lambda_o r / R \quad \text{Ec. 18}$$

$$\varphi = 2/3 \text{ Arc tag } (1/\lambda r) \quad \text{Ec 19}$$

$$C = 8 \pi r (1 - \cos \varphi) / Z C_1 \quad \text{Ec. 20}$$

$$B = \varphi - \alpha \quad \text{Ec. 21}$$

Dónde:

$\lambda r$  = Celeridad local para el radio  $r$ , adimensional

$\lambda_o$  = Celeridad de diseño, adimensional

$r$  = Distancia del centro del rotor a la sección evaluada, cm.  $R$  = Radio de la turbina, cm.

$\varphi$  = Angulo formado por la velocidad relativa con el plano de rotación del rotor, (°)

$C$  = Cuerda de la sección del alabe, cm.

$Z$  = Número de alabes o palas, adimensional

$C_1$  = Coeficiente de sustentación del alabe, adimensional

$\beta$  = Angulo formado por el alabe con el plano de giro o rotación, (°)

$\alpha$  = Angulo de ataque, depende del perfil seleccionado, (°)

Utilizando las ecuaciones de la 18 a la 21, para una turbina tripala,  $\alpha = 4^\circ$  y  $C_1 = 0.8$ , ambos valores tanto el ángulo de ataque como el coeficiente de sustentación se obtienen de la gráfica  $C_1$  vs  $C$  del perfil seleccionado previamente, para el presente caso, es el NACA 4412. Para diferentes valores de radio " $r$ ", se obtiene los valores del ángulo de posición y la longitud de cuerda respectivas.

Los resultados de los cálculos indicados nos dan valores variables no lineales, tanto para la cuerda como para ángulo de posición, lo cual hace complicado el proceso de fabricación de los alabes, para simplificar esto se adopta el concepto de linealización del alabe. Se ha seleccionado el estándar NACA 4412 por su buen coeficiente de sustentación, su facilidad para la fabricación y porque tiene una sección relativamente gruesa que permite soportar los esfuerzos en la raíz del alabe, aunque esta rigidez tiene que ver también con los materiales que se utilizan.

**TABLA N° 6. LINEALIZACION DEL ALABE DEL PERFIL NACA**

Sección	Radio (cm)	$\lambda$	$\phi$ (°)	$\beta$ (°)	Cuerda (cm)
1	25	1.2	25.77	21.77	26.0
2	30	1.5	22.46	18.46	23.8
3	35	1.7	19.83	15.83	21.7
4	40	2.0	17.71	13.71	19.8
5	45	2.2	15.97	11.97	18.2
6	50	2.5	14.53	10.53	16.7
7	55	2.7	13.32	9.3	15.5
8	60	3.0	12.29	8.2	14.4
9	65	3.2	11.40	7.4	13.4
10	70	3.5	10.63	6.6	12.5
11	75	3.7	9.9	5.9	11.8
12	80	4.0	9.3	5.3	11.1
13	85	4.2	8.8	4.8	10.5
14	90	4.5	8.3	4.3	10.0
15	95	4.7	7.9	3.9	9.5
16	10	5.0	7.5	3.5	9.0

FUENTE: ELABORACION PROPIA .BASADO EN LA TEORIA DE TURBINA EOLICA.

### 3.7.2.3. De la linealización del alabe

#### a) Linealización de la Cuerda

Se linealizará las cuerdas y los ángulos de pala entre  $r = 0.5 R$  y  $r = 0.9 R$  Se sabe que:

$$C = \alpha_1 r + \alpha_2$$

Ecuación de la Cuerda Linealizada.

Porcentaje ( %)	r ( cm)	Cuerda ( cm )
50	50	16.76
90	90	10

Obtenido de la tabla N°16 entre el rango de 50 a 90.

Luego:  $C_{50} = \alpha_1 r_{50} + \alpha_2 \quad \dots (1)$

$$C_{90} = \alpha_1 r_{90} + \alpha_2 \quad \dots (2)$$

Al reemplazar los valores en (1) y (2), se obtienen.

$$\alpha 1 = - 0.169 \quad y \quad \alpha 2 = 25.21$$

Luego, al reemplazar estos valores en la Ecuación de la Cuerda Linealizada, se obtiene:

$$C = - 0. 169 \, r + 25.21$$

### b) Linealización del ángulo beta

Se sabe que:  $\beta = \alpha 3r + \alpha 4$  Ecuación del Ángulo Beta Linealizado

Porcentaje ( % )	r ( cm )	Beta ( ° )
50	50	10.53
90	90	4.35

Obtenido de la tabla N°16,

Luego:

$$\beta 50 = \alpha 3r50 + \alpha 4 \quad (3) \quad y$$

$$\beta 90 = \alpha 3r90 + \alpha 4 \quad (4)$$

Al reemplazar los valores en ( 3 ) y ( 4 ), se obtienen:

$$\alpha 3 = -0.154 \quad y \quad \alpha 4 = 18.261$$

Luego, al reemplazar estos valores en la Ecuación del Angulo Beta Linealizado, se obtiene:

$$\beta = - 0.154 \, r + 18.261$$

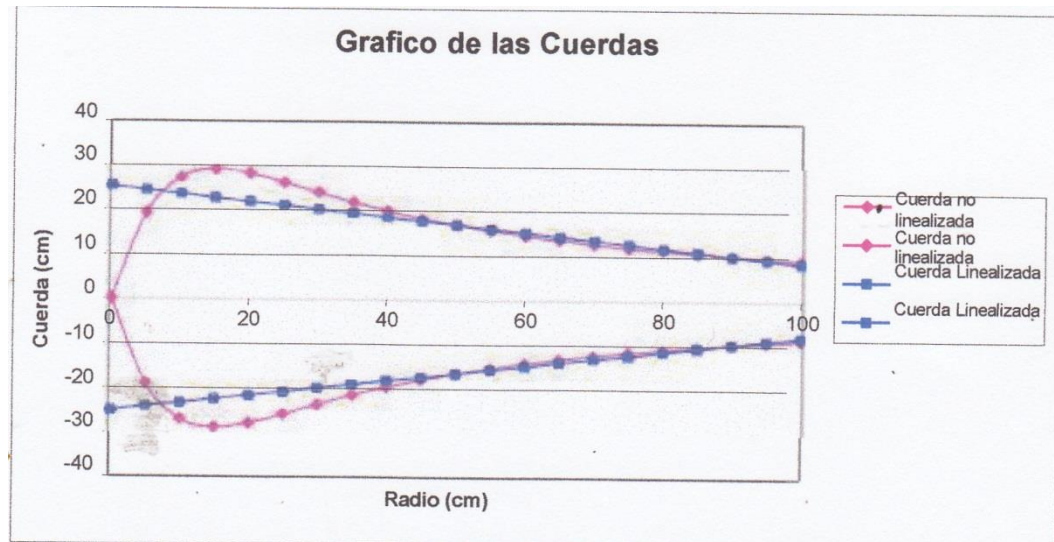
Para diferentes valores del porcentaje de radio, se obtiene la siguiente tabla con los valores de las Cuerdas Linealizadas y de los Ángulos Betas Linealizados:

**Tabla N°7 VALORES DE CUERDA Y ANGULO  $\beta$  LINEALIZADOS.**

Sección	Radio (cm)	$\lambda$	$\phi$ (°)	$\beta$ (°)	Cuerda (cm)	$\beta$ Line (°)	Cuerda L. (cm)
1	25	1.25	25.77	21.77	26.04	14.40	20.98
2	30	1.50	22.46	18.46	23.83	13.63	20.14
3	35	1.75	19.83	15.83	21.73	12.85	19.29
4	40	2.00	17.71	13.71	19.85	12.08	18.45
5	45	2.25	15.97	11.97	18.20	11.31	17.60
6	50	2.50	14.53	10.53	16.76	10.53	16.76
7	55	2.75	13.32	9.32	15.50	9.76	15.91
8	60	3.00	12.29	8.29	14.40	8.99	15.07
9	65	3.25	11.40	7.40	13.43	8.22	14.22
10	70	3.50	10.63	6.63	12.58	7.44	13.38
11	75	3.75	9.95	5.95	11.82	6.67	12.53
12	80	4.00	9.36	5.36	11.15	5.90	11.69
13	85	4.25	8.83	4.83	10.54	5.13	10.84
14	90	4.50	8.35	4.35	10.00	4.35	10.00
15	95	4.75	7.93	3.93	9.50	3.58	9.15
16	100	5.00	7.54	3.54	9.05	2.81	8.31

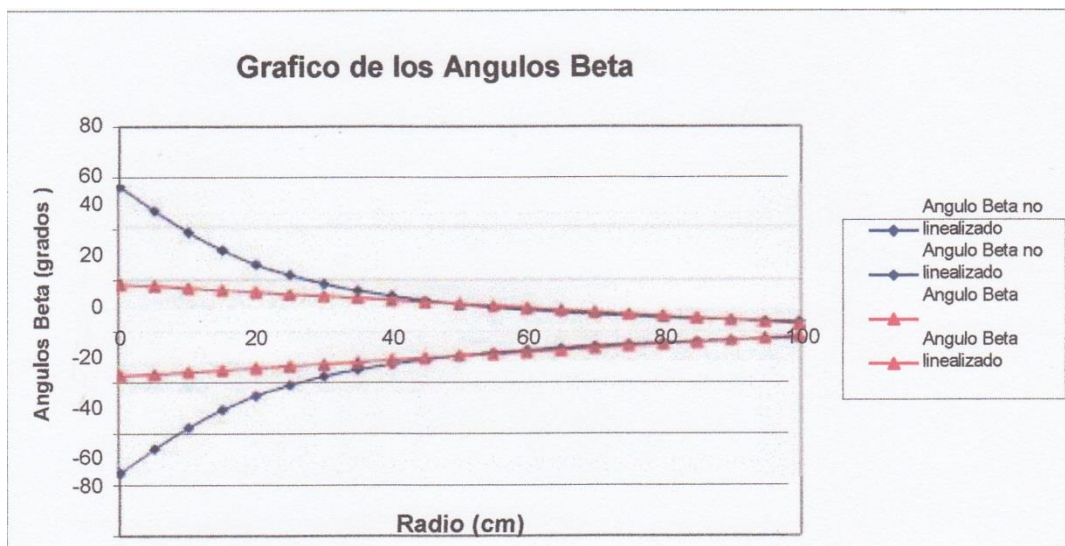
FUENTE: ELABORACION PROPIA.

**FIGURA N° 21. CUERDAS Vs RADIOS.**



Fuente: Elaboración propia con Resultados de tabla N° 17.

**FIGURA N° 22. Ángulos  $\beta$  Vs. Radio**



Fuente : Elaboración propia en base a datos de tabla N° 17.

### 3.7.2.4. De la Eficiencia total y perdidas del sistema

#### a) De la Eficiencia total

De la Ec.12, y considerado en el titulo 3.7.2.1,( Pg.51)

$$\eta_{total} = C_p \times \eta_{tr} \times \eta_g$$

$$C_p = 0.35; \quad \eta_{tr} = 0.85; \quad \eta_g = 0.66$$

Entonces:  $\eta_{total} = 0.35 \times 0.85 \times 0.66$

$\eta_{total} = 0.19 = (19\%)$

### **b) De las Pérdidas**

A la entrada del rotor

De la Ec. 13:

Reemplazando valores:

$\rho = 1000 \text{ kg/ m}^3$

$D = 2 \text{ m}$

$\theta = 30^\circ$

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

$C_p = 0,35$

$P_{Disp} = 1/8 \times 1000 \times \pi \times 2^2 \times \cos 30^\circ \times 1^3 = 1\,359,65 \text{ W}$

$P_{eje} = P_{Disp} \times C_p = (1/8) \times \rho \times \pi \times D^2 \times \cos(\theta) \times v^3 \times C_p$  de Ec 14

$P_{eje} = 1359.65 \times 0,35 = 475,87 \text{ W}$

$\Delta P_1 = P_{Disp} - P_{eje} = 1359.65 \text{ W} - 475.87 = 883,78 \text{ W}$

### **En la transmisión**

De la Ec (14):  $P_{eg} = P_{Disp} \times C_p \times \eta_{tr}$

$P_{eg} = 1\,359,65 \times 0,35 \times 0.85 = 404,49 \text{ W}$

$\Delta P_2 = P_{eje} - P_{eg} = 475.87 \text{ W} - 404.49 = 71.38 \text{ W}$

### **En el generador**

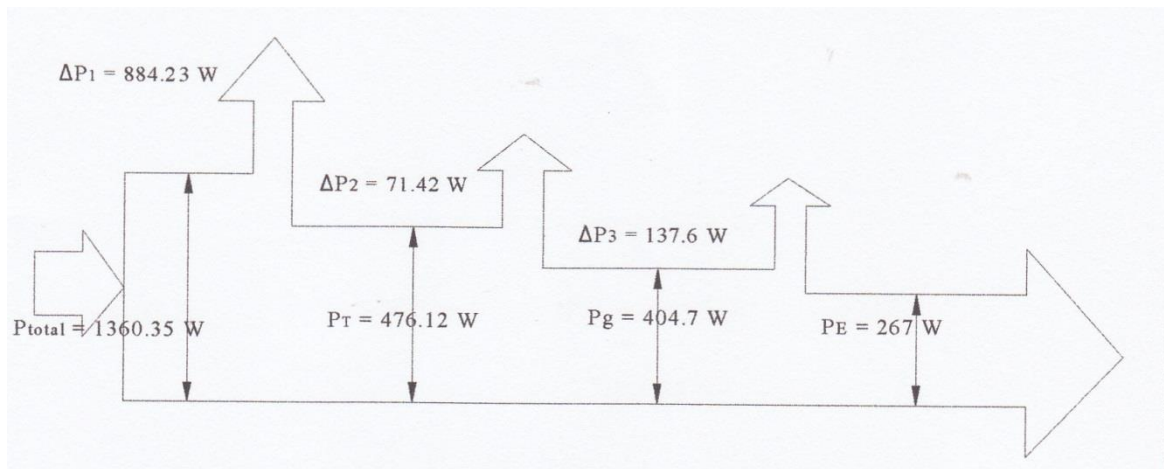
De la Ec (15):  $P_{sg} = P_{Disp} \times C_p \times \eta_{tr} \times \eta_g$

$P_{sg} = 1\,359,65 \times 0,35 \times 0.85 \times 0.66 = 266,97 \text{ W}$

$\Delta P_3 = P_{eg} - P_{sg} = 404.49 - 266.97 = 137.52 \text{ W}$

**FIGURA N° 23, Gráfico de Sankey que representa las pérdidas en el grupo**

**Turbina – Generador**



FUENTE: PROPIA CON DATOS OBTENIDOS EN EL CALCULO.



## CAPITULO IV

### 4.0 ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS.

#### 4.1 Resultados en tablas y gráficos.

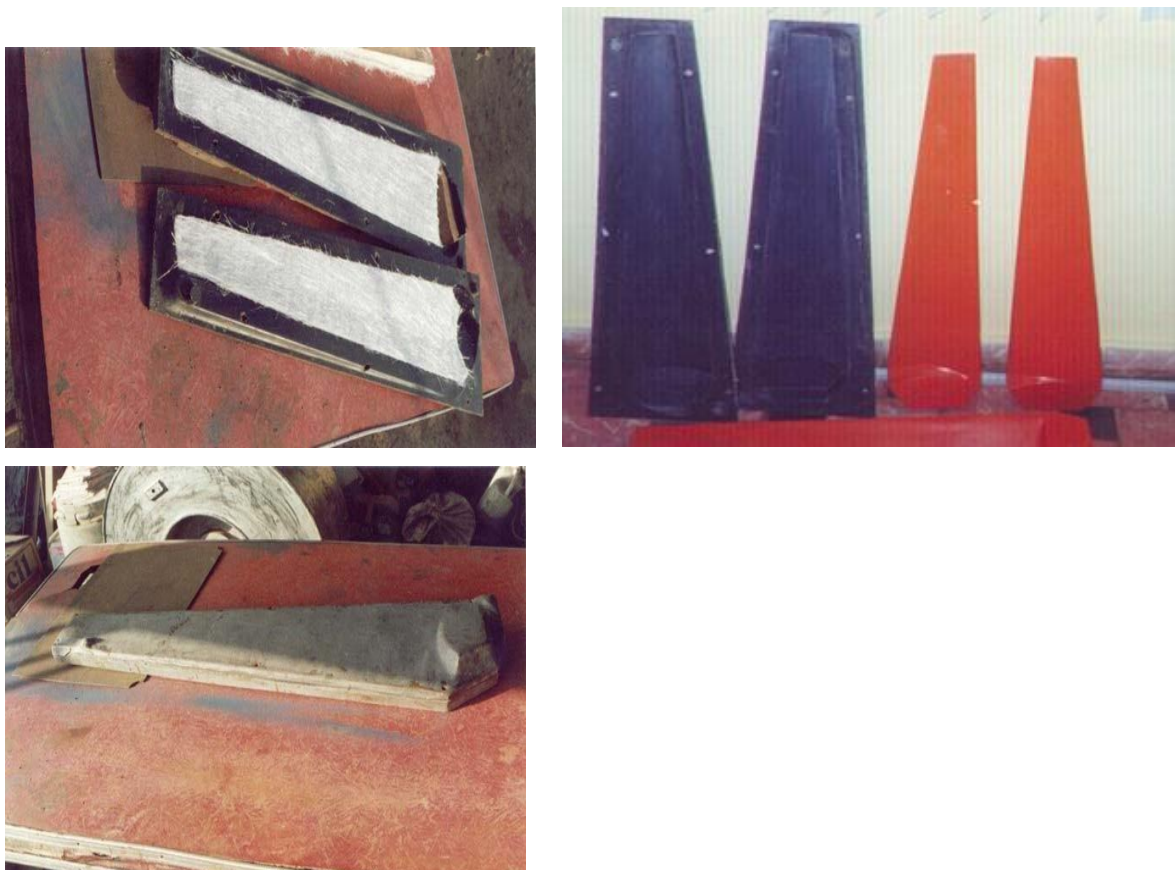
##### 4.1.1. De la Fabricación del Alabe

El diseño en general y los procesos de fabricación de la turbina de río han considerado dos aspectos fundamentales:

- a) Un diseño que permita la construcción de la máquina en pequeños talleres
- b) Que a pesar de ser fabricados en pequeños talleres, debe permitir su fabricación en serie o al menos algunos componentes en serie.

De este modo, se han fabricado modelos (en madera) y moldes del alabe (en fibra de vidrio y aluminio). De igual forma se prepararon moldes para facilitar la fabricación del generador que permitan una producción en serie.

**FIGURA N° 24. PREPARACION DEL MOLDE DEL ALABE CON FIBRA DE VIDRIO.**



**FUENTE: ELABORACION PROPIA.**

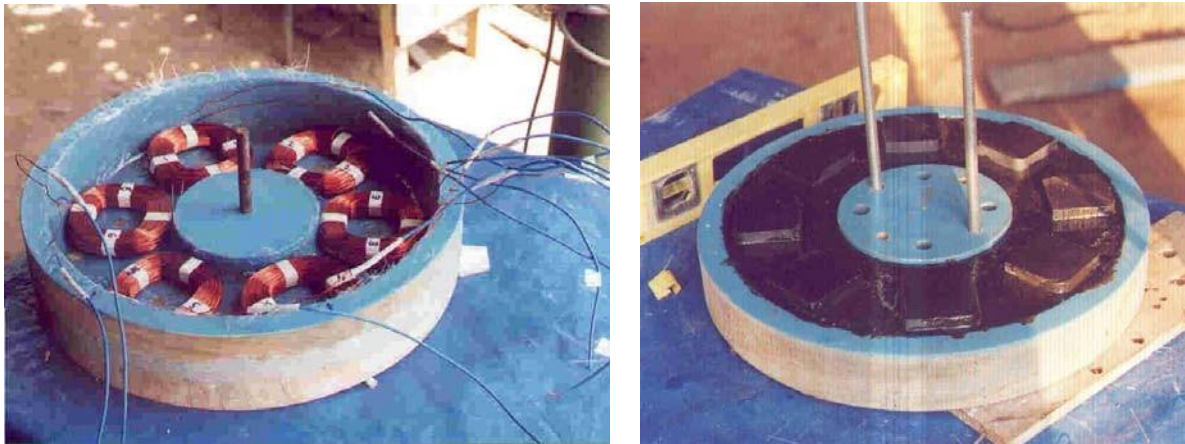
#### 4.1.2. Del Generador Eléctrico

El generador eléctrico que se utiliza es de imanes permanentes, su elección se debe principalmente al hecho de que este tipo de generadores trabajan muy bien a velocidades de giro variables y por lo tanto compatibilizan con las velocidades de giro que se pueden obtener en una Turbina de Río y además son para bajas potencias.

Para el diseño del generador de imanes se consideraron los siguientes parámetros:

- Velocidad nominal igual a la de la turbina (360 r.p.m.)
- Ocho pares de imanes
- Generación de corriente alterna y rectificada a través de diodos a corriente continua.
- Poco peso y fácil construcción (aproximadamente 15 Kg.).

**Figura N° 25. Fabricación del generador de imanes (bobinas e imanes).**



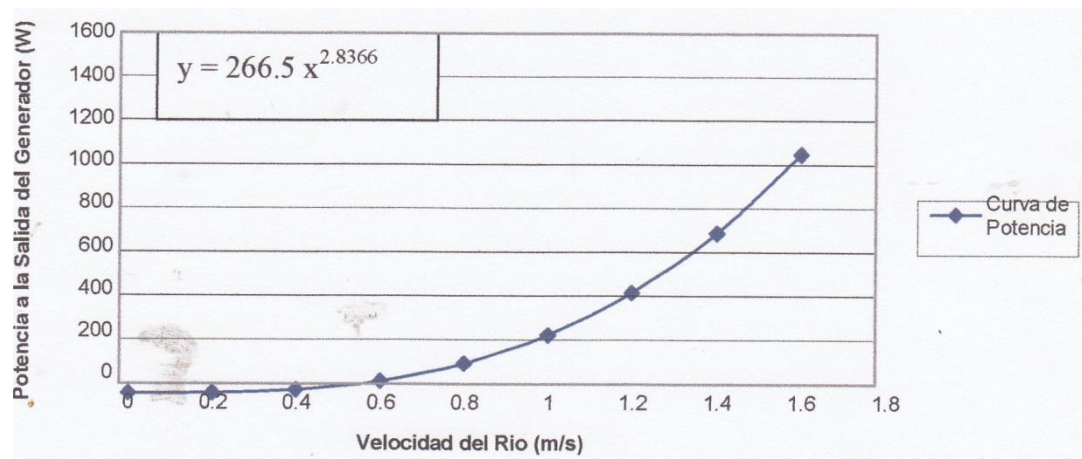
FUENTE: ELABORACION PROPIA.

Algunos aparatos y equipos, como los focos, los calentadores y las herramientas eléctricas pueden funcionar con corriente continua. Sin embargo, la mayoría de los aparatos electrónicos como los tocadiscos y los televisores están diseñados para corriente alterna y para estos será necesario emplear algún tipo de alternador.

#### 4.1.3. Ensayos de Campo

Para los ensayos de campo se instaló una Turbina de Río prototipo en la comunidad Puesta de sol, en Lonya Grande, rio Napo, los resultados obtenidos se pueden observar en la Fig.26. Los datos han sido ajustados a una ecuación potencial con un exponente cercano a 3 (2.8366).

**FIGURA N°26 Potencia a la Salida del Generador vs Velocidad del Río**



FUENTE: PROPIA.

## 4.2. COSTOS DE FABRICACIÓN DE LA TURBINA

Se presentan los costos de fabricación de la turbina que incluyen al rotor y a las palas, al sistema de transmisión, los rodamientos, las fajas y poleas planas, el generador (de imanes permanentes), el tablero de control del sistema, el regulador de carga y finalmente el costo de la balsa flotante y el Sistema de Amarre.

### 4.2.1 Rotor axial

El rotor está constituido por los siguientes elementos:

- El rotor propiamente dicho, que consta de tres alabes o palas fabricadas en una combinación de fibra de vidrio y resina.
- Dos platos de sujeción en acero inoxidable para el montaje de los alabes.

Se obtuvo la cotización de los moldes de los alabes y del rotor a cargo de la empresa Tepersac quienes nos alcanzaron los siguientes valores:

**Tabla N°8. COSTO DE ROTOR Y ALABES.**

Descripción	Cantidad	Costo Unitario US\$	Total US\$ sin IGV
Alabes de fibra de vidrio y resina	3	50	150
Platos de sujeción en acero inoxidable	2	50	100

Fuente: Tepersac.

### 4.2.2. La Transmisión

#### 4.2.2.1 El Árbol de transmisión

El árbol de transmisión esta constituidos por los siguientes elementos:

- Dos tubos de acero galvanizado de 1.5" y 2.5"de diámetro nominal respectivamente. El primero esta acoplado directamente al rotor y además va encapsulado en el segundo que tiene las mismas características, y que además sirve de soporte y protección.

**TABLA N° 9. COSTO DE TUBOS. PARA TRANSMISION.**

Descripción	Cantidad	Costo Unitario US\$	Total US\$ sin IGV
Tubo de acero galvanizado de 1.5 ”	1	20	20
Tubo de acero galvanizado de 2.5 ”	1	30	30

FUENTE: ELABORACION PROPIA. BASADO EN PRESUPUESTO.

#### 4.2.2.2. Componentes intermedios de transmisión

Son componentes que se ubican entre el árbol de transmisión y el generador. Está constituido por los siguientes elementos:

- Rodamientos de tipo auto alineado.
- Poleas y fajas planas, accesorios (llámese pernos, etc.).

**TABLA N° 10, COMPONENTES INTERMEDIOS.**

Descripción	Cantidad	Costo Unitario US\$	Total US\$ sin IGV
Rodamientos	2	80	160
Poleas y fajas, accesorios	2	50	100

#### 4.2.3 Generación de Energía

##### 4.2.3.1. Generador de Imanes Permanentes

El Generador de Imanes Permanentes es un generador trifásico comercial fabricado por la ONG ITDG – Perú de neodimio ferrítico, que consta de 8 pares de polos, doble conexión en estrella y eficiencia del 66%

Descripción	Cantidad	Costo Unitario US\$	Total US\$ sin IGV
Generador de Imanes Permanentes	1	300	300

#### 4.2.3.2 Tablero de Control

Cuenta con los instrumentos de medición básicos (voltímetro y amperímetro) y los respectivos diodos rectificadores de 12 V y 25 A cada uno, además de cableado trifásico.

Descripción	Cantidad	Costo Unitario US\$	Total US\$ sin IGV
Tablero Electrónico de Control	1	200	200

#### 4.2.3.3 Regulador de Carga

Este dispositivo se encarga de controlar los límites de carga de la batería.

Descripción	Cantidad	Costo Unitario US\$	Total US\$ sin IGV
Regulador de carga	1	100	100

#### 4.2.4 Soporte del Sistema

##### 4.2.4.1 Balsa Flotante

De fabricación local, también se le denomina pequepeque.

Descripción	Cantidad	Costo Unitario US\$	Total US\$ sin IGV
Balsa flotante de madera de 5 m	1	800	800

##### 4.2.4.2 Sistema de Amarre

Se dispone de un sistema de amarre que consta de un poste, accesorios como sogas o cables para la fijación del mismo

Descripción	Cantidad	Costo Unitario US\$	Total US\$ sin IGV
Poste de acero para fijación del sistema, accesorios	1	100	100

#### 4.3. Costo total del grupo turbina – generador

El costo total del grupo turbina – generador es:

**Tabla N°11. COSTO TOTAL DEL PROYECTO**

<b>Descripción</b>	<b>Subtotal US\$</b>	<b>Total US\$ con IGV</b>
<b>Rotor axial</b> 3 Alabes de fibra de vidrio y 2 platos de sujeción de acero.	250	295
<b>La transmisión</b> 2 tubos de acero galvanizado, 2 rodamientos, 2 poleas y fajas.	310	365,8
<b>Generación de Energía</b> 1 Generador de Imanes Permanente ; 1 Tablero Electrónico de Control y un Regulador de carga	600	708
<b>Soporte del Sistema</b> Balsa flotante de madera de 5 m, Poste de acero para fijación del sistema, accesorios.	900	1062
		<b>2430,8</b>

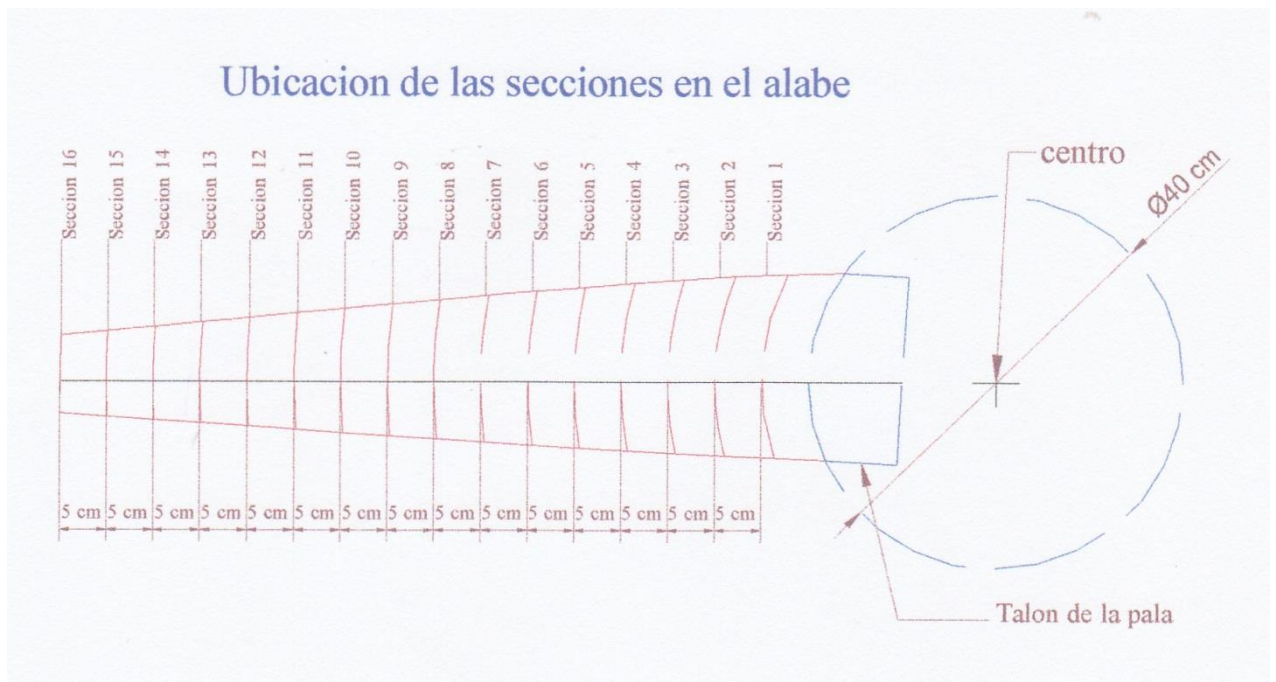
La fabricación y ensamblaje del grupo turbina – generador tiene un costo de:

**US\$ 2 430.80** esto incluye el IGV (18%).

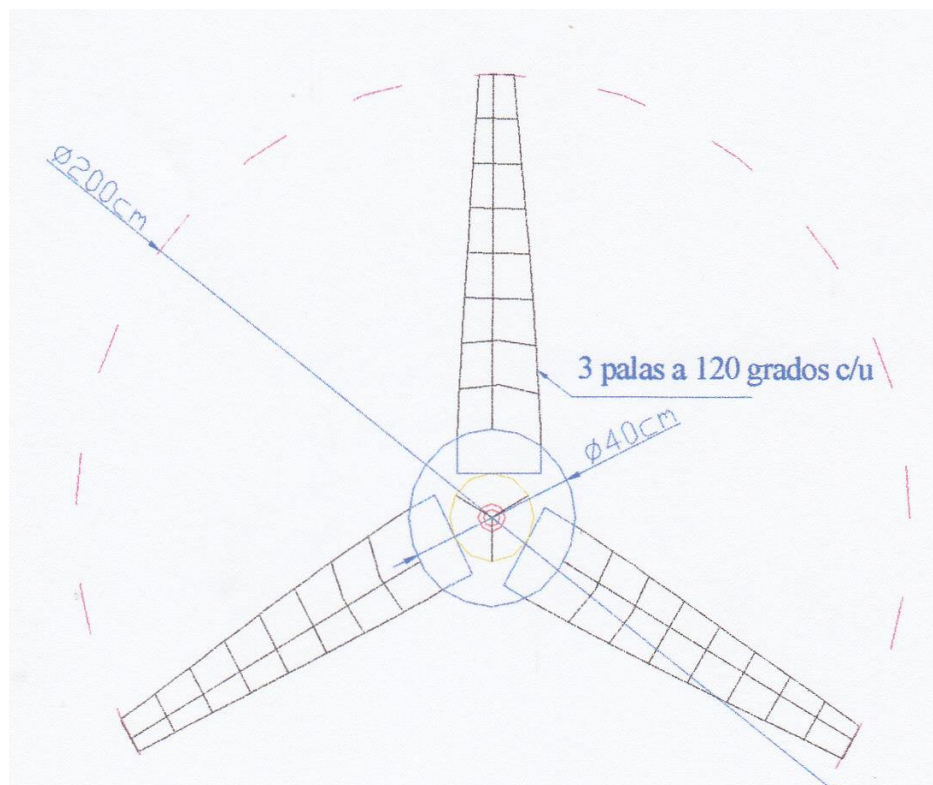


## PROPUESTA DE LA SECCION DE LAS PALAS.

**FIGURA N°27 . VISTA EN SECCION LONGITUDINAL DE LA PALA**



## VISTA EN SECCION FRONTAL DE LAS PALAS.



FUENTE: ELABORACION PROPIA.



## **CAPITULO V**

### **5.1. CONCLUSIONES.**

1. Se ha logrado desarrollar y probar con éxito un prototipo de la Turbina de Río, el que después de 6 meses de instalado viene funcionando sin ningún problema beneficiando a los pobladores de Puesta de sol, y comunidades vecinas con el servicio de carga de baterías.
2. Se pronosticó obtener 250 W, y mediante nuestros cálculos realizados se obtuvo 267 W, lo que demuestra que se ha cumplido con el objetivo obteniéndose una reserva de 17 W.
3. La selva peruana cuenta con importantes recursos hídricos para la aplicación de esta tecnología la misma que puede satisfacer las demanda básica de energía de los pobladores rurales de la zona que difícilmente podrían contar con un servicio de energía en el mediano y largo plazo. Además de que las características hidrográficas de toda esta zona se adaptan perfectamente a este sistema.
4. La organización de un Comité de Administración y Gestión ha permitido fortalecer a la comunidad, dotándole de habilidades y destrezas en el manejo económico y en la planificación de sus servicios.
5. La Amazonía no es el único lugar en Perú donde se pueden instalar estas turbinas, basta con encontrar ríos de muy baja pendiente y considerable velocidad (hasta de 1.5 m/s) y así realizar el sueño de muchas familias, que es dotarse de servicios básicos y por ende mejorar su calidad de vida.
6. La comunidad comprendió que este tipo de tecnología es una opción real para acceder a la energía eléctrica, por tanto el entusiasmo por continuar investigando conjuntamente con la ONG ITDG – Perú fue en aumento.
7. El costo del servicio de cargado de baterías en comunidades vecinas había bajado sustancialmente, en Puesta de sol, por ejemplo el costo inmediatamente se redujo al 50%.

## **5.2. RECOMENDACIONES**

1. Es necesario continuar el trabajo de investigación y desarrollo de esta tecnología, puesto que quedan pendientes responder a importantes preguntas sobre el comportamiento de las maquinas a largo plazo, especialmente tratándose de ríos cuyos caudales varían fuertemente durante épocas de lluvias y estiaje.
2. El comportamiento de las maquinas frente a arrastre de sólidos flotantes de gran tamaño (frecuentes en estos ríos), las implicancias sobre la navegación y otros puntos deben ser también analizados.

## CAPITULO VI

### BIBLIOGRAFÍA

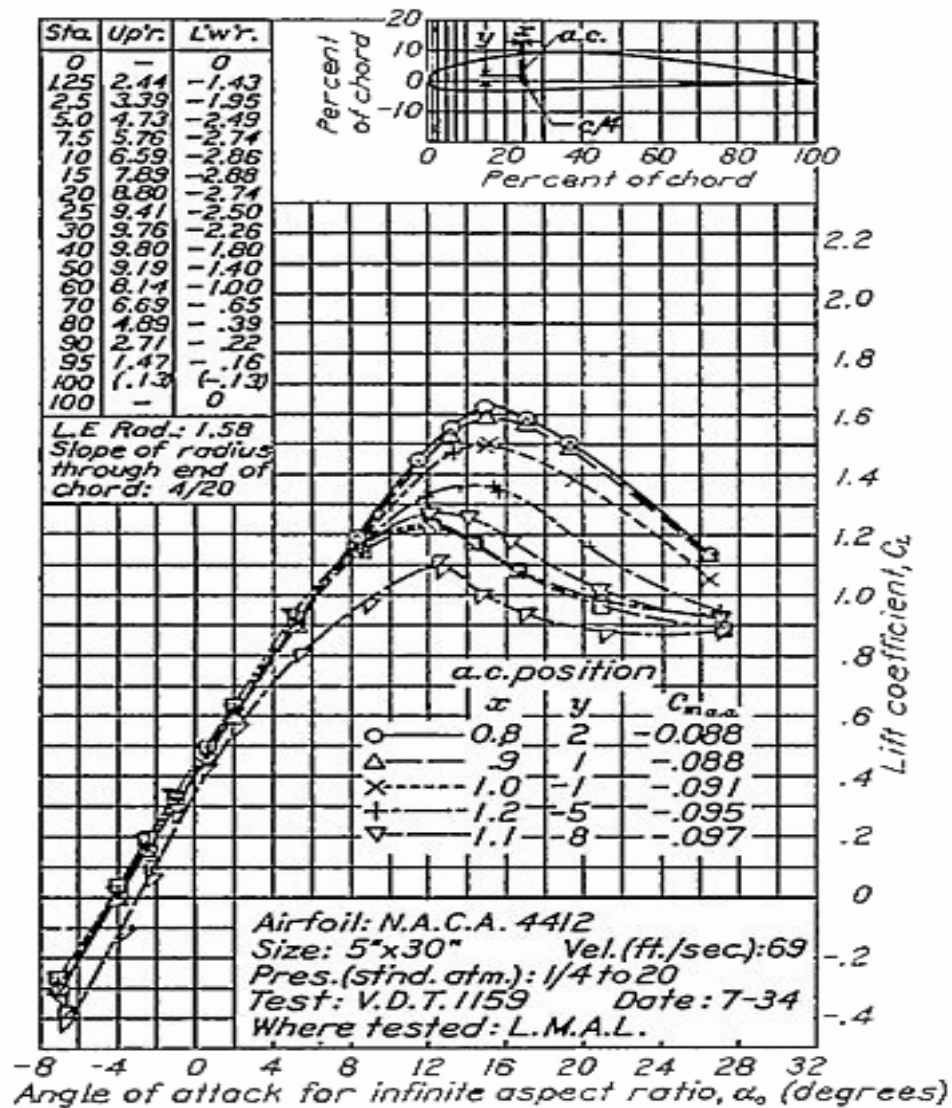
1. **Albert Betz**-La energía eólica y su aprovechamiento mediante molinos de viento, 1926.EditorialGöttingenVandenhoeck&Ruprecht.
2. **Claudio Mataix** –Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas, 2 edición, 1986. Ediciones del Castillo S.A
3. **Fabián Riveros Moyano**- Diseño aerodinámico, estructural y determinación del sistema de fabricación de una pala en fibra de vidrio de un aerogenerador de pequeña potencia, 2010.
4. **Francisco Maldonado Quispe**, Tesis “Diseño de una turbina de río para la generación de electricidad en el distrito de Mazán-Región Loreto”, 2005.
5. **Federico Vargas – Machuca Saldarriaga** “Criterio para el Diseño Aerodinámico de rotores de Aerogeneradores”. Pontificia Universidad Católica del Perú.
6. Informes del proyecto conjunto con PROPERU Electrificación de un centro educativo y una posta médica en Paraíso-Iquitos. ITDG, Lima – Perú, 2002.
7. Informe final del proyecto Turbina de Río en la Amazonía, un proyecto demostrativo, ITDG, Lima – Perú, 1999.
8. **Manuel Franqueza Voneschen**- Introducción a la teoría de las turbinas eólicas, 2009.
9. **Piero Pérez Pantoja** - Tesis Pontificia Universidad Católica del Perú - Grupo de generación Kaplan tubular para 3 kW de capacidad, 2011
10. **Robert C. Juvinal** - Fundamentos de diseño para Ingeniería Mecánica, primera edición, 1991. Editorial Limusa S.A.
11. **Teodoro Sánchez C.** Tesis para optar el grado de Ingeniero Mecánico, “Bombas de desplazamiento positivo para molinos de viento”, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú, 1986.

# **ANEXOS**

## ANEXO -1 Diámetros comerciales para tubos de acero galvanizado

DIAMETRO COMERCIAL	DIAMETRO REAL		CALIBRE	ESPESOR MM.	PESO KG/M.L.	PESO KG/PZA
PULGADAS	MILIMETROS					
1 3/8"	1.315	33.4	18	1.24	1.02	6.12
			20	0.93	0.77	4.62
1 1/2"	1.500	38.1	18	1.24	1.16	6.96
			20	0.93	0.89	5.34
1 5/8"	1.660	42.2	18	1.24	1.29	7.74
			20	0.93	0.98	5.88
2"	1.900	48.3	14	1.92	2.27	13.62
			16	1.54	1.83	10.98
			18	1.24	1.48	8.88
			20	0.93	1.13	6.78
2 1/2"	2.375	60.3	14	1.92	2.84	17.04
			16	1.54	2.29	13.74
			18	1.24	1.85	11.10
3"	2.875	73.0	14	1.92	3.42	20.52
			16	1.54	2.78	16.68
			18	1.24	2.23	13.38
1"	1.000	25.4	16	1.55	0.96	5.7
			18	1.25	0.77	4.6
			20	0.95	0.58	3.5

ANEXO -2. Angulo de Ataque vs Coeficiente de Sustentación en perfil Naca 4412.



### **ANEXO -3 FOTOGRAFIAS**



**Montaje del prototipo.**



**Primer prototipo en funcionamiento**



### **Alabes del Rotor**



### **Generador de Imanes Permanentes**



### **INSTALACION ACTUAL DE LA TURBINA DE RIO.**





**APROVECHAMIENTO Y APLICACIÓN DE LA TURBINA DE RIO.**