

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**

**Facultad de Ciencias e Ingeniería**



**DISEÑO DE GENERADOR HIDROELÉCTRICO PORTABLE  
PARA ZONAS RURALES**

**Tema de Tesis para optar por el Título de Ingeniero Mecatrónico, que  
presenta el bachiller:**

**Mendoza Yupanqui, Paul Yampier**

**ASESOR: Cataño Sanchez, Miguel Angel**

**Lima, mayo del 2017**



© 2017, Paul Yampier Mendoza Yupanqui

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos a través de cualquier medio o procedimiento siempre y cuando incluya la cita bibliográfica del documento.



*A Dios, mis padres, familiares, amigos y profesores  
por su constante apoyo.*

## AGRADECIMIENTOS

En esta sección deseo manifestar mi profundo agradecimiento a todas las personas que hicieron que esto fuera posible, tanto en mi vida académica universitaria como personal.

En primer lugar, doy gracias a mi familia por su constante apoyo y motivación.

A la familia Aldave Becerra por su aliento incondicional.

A mis amigos y profesores por sus consejos y confianza depositada en mí.

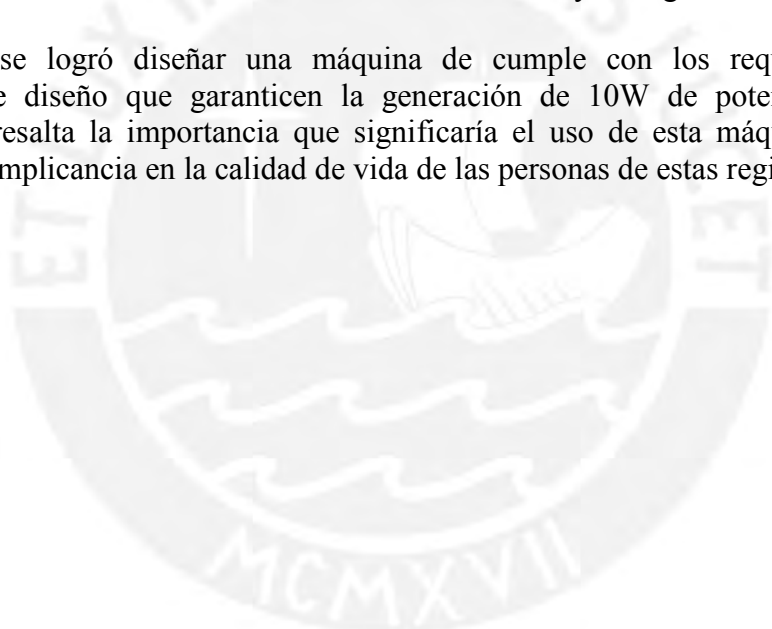


## RESUMEN

El uso de la energía eléctrica es indispensable en la vida diaria de las personas. Demográficamente, gran parte del sector urbano cuenta con acceso a este servicio; sin embargo, en el sector rural existen grupos humanos que no tienen acceso a este recurso. Dada esta necesidad, se ha ido impulsando el uso tecnologías renovables, entre las cuales la hidroeléctrica se presenta como la más viable, teniendo en cuenta la geografía del país, con la finalidad de facilitar el acceso a este tipo de energía.

En el presente trabajo, utilizando el método de la matriz morfológica, se diseñó un sistema generador hidroeléctrico portable que aprovecha el desplazamiento de masas de agua en canales como fuente de energía cinética. Para ello se empleó una turbina hidrocínética, la cual adquiere un movimiento rotatorio al paso del fluido con la finalidad de convertir la energía cinética en mecánica. Asimismo, gracias a un generador de imanes permanentes acoplado al eje de la turbina en movimiento se puede generar electricidad alterna. Luego, esta corriente fue acondicionada para la carga de dispositivos electrónicos mediante un circuito rectificador y un regulador de tensión.

Por último, se logró diseñar una máquina de cumple con los requerimientos y exigencias de diseño que garanticen la generación de 10W de potencia eléctrica. Además, se resalta la importancia que significaría el uso de esta máquina en zonas remotas y la implicancia en la calidad de vida de las personas de estas regiones.





**TEMA DE TESIS PARA OPTAR  
EL TÍTULO DE INGENIERO MECATRÓNICO**

Título : DISEÑO DE GENERADOR HIDROELÉCTRICO PORTABLE  
PARA ZONAS RURALES

Asesor : CATAÑO SANCHEZ, MIGUEL ANGEL

Alumno : MENDOZA YUPANQUI, PAUL YAMPIER

Código : 20111271

Tema N° : 4134

Fecha : 30/06/16



**Descripción y Objetivos**

El uso de la energía eléctrica es indispensable en la vida diaria de las personas. Demográficamente, gran parte del sector urbano cuenta con acceso a este servicio; sin embargo, en el sector rural existen grupos humanos que no tienen acceso a este recurso. Dada esta necesidad, se ha ido impulsando el uso tecnologías renovables, entre las cuales la hidroeléctrica se presenta como la más viable teniendo en cuenta la geografía del país.

En el presente trabajo se diseñará un generador hidroeléctrico portable que aproveche el agua en movimiento de canales como fuente de energía cinética. Para ello se hará uso de una turbina, la cual adquiere un movimiento rotatorio al paso del fluido con la finalidad de convertir la energía cinética en mecánica. Asimismo, gracias a un generador acoplado al eje de la turbina se puede generar electricidad para la carga de dispositivos electrónicos de baja potencia.

El contenido del trabajo parte con el planteamiento del problema, luego se realiza un estudio acerca del funcionamiento de máquinas afines, a continuación se evalúan las funciones que requiere el sistema para la realización de posibles soluciones, seguidamente se realiza el diseño y cálculos de la máquina y finalmente se hace una estimación del costo total, conclusiones y recomendaciones del trabajo presentado.

*Máximo: 100 páginas*

*Enrique P. Rodríguez R.*



*[Signature]*

*[Signature]*

## ÍNDICE

	Pág.
RESUMEN.....	iv
APROBACIÓN DE TEMA DE TESIS.....	v
ÍNDICE.....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	viii
ÍNDICE DE TABLAS.....	x
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xi
INTRODUCCIÓN.....	1
I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	2
1.1 - CONTEXTUALIZACIÓN.....	2
1.2 - OBJETIVOS GENERALES.....	4
1.3 - OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	4
1.4 - ALCANCE DEL DISEÑO.....	4
1.5 - RESULTADOS DESEADOS.....	4
II. ESTADO DEL ARTE.....	5
2.1 - TURBINAS.....	5
2.1.1 - PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO.....	5
2.1.2 - TIPOS DE TURBINAS HIDRÁULICAS.....	6
2.1.3 - ASPECTOS TEÓRICOS DE LA TURBINA.....	9
2.1.3.1 - NÚMERO DE REYNOLDS.....	9
2.1.3.2 - ESTUDIO AERODINÁMICO.....	13
2.1.3.3 - PARÁMETROS DE DISEÑO DEL ROTOR.....	15
2.2 - GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA.....	19
2.2.1 - GENERADOR DE CORRIENTE CONTINUA.....	19
2.2.2 - GENERADOR DE EXCITACIÓN O SÍNCRONO.....	19
2.2.3 - GENERADOR DE INDUCCIÓN O ASÍNCRONO.....	20
2.2.4 - GENERADOR DE IMANES PERMANENTES.....	20
2.3 - CARGA DE DISPOSITIVOS ELÉCTRICOS.....	21
2.4 - MÁQUINAS AFINES.....	22
2.4.1 - HIDRO BEE.....	23
2.4.2 - BLUE FREEDOM.....	23
2.4.3 - GENERADOR DE AGUA DE TURBINA.....	24
2.4.4 - AMPAIR UW100.....	25
III. DISEÑO CONCEPTUAL DEL GENERADOR HIDROELÉCTRICO.....	26
3.1 - CONCEPTUALIZACIÓN DEL DISEÑO.....	26
3.1.1 - CAJA NEGRA.....	26
3.1.2 - PROCESOS.....	26
3.1.3 - ESTRUCTURA DE FUNCIONES.....	27
3.2 - PARÁMETROS DEL GENERADOR HIDROELÉCTRICO.....	28
3.2.1 - REQUERIMIENTOS MECÁNICOS.....	28
3.2.2 - REQUERIMIENTOS ELECTRÓNICOS.....	28
3.3 - MATRIZ MORFOLÓGICA.....	29
3.4 - CONCEPTO ÓPTIMO DE SOLUCIÓN.....	29

IV.	DISEÑO Y CÁLCULO DE LOS ELEMENTOS PRINCIPALES.....	31
4.1	- ANÁLISIS DEL PROPELLER.....	31
4.1.1	- CÁLCULO DEL DIÁMETRO.....	31
4.1.2	- CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE POTENCIA.....	33
4.2	- ANÁLISIS DE RESISTENCIA DE MATERIALES.....	33
4.2.1	- ANÁLISIS DEL DIÁMETRO DEL EJE.....	33
4.2.2	- ANÁLISIS DE LA CARCAZA.....	34
4.2.3	- ANÁLISIS DEL DISCO.....	34
4.2.4	- ANÁLISIS DEL SOPORTE DEL SISTEMA.....	35
4.3	- CÁLCULOS ELÉCTRICOS.....	35
4.3.1	- DISEÑO GENERADOR DE IMANES PERMANENTES.....	35
4.3.2	- DISEÑO CIRCUITO RECTIFICADOR Y REGULADOR.....	38
V.	ESTIMADO DE COSTOS.....	42
	CONCLUSIONES.....	43
	RECOMENDACIONES.....	44
	CRÉDITOS DE FIGURAS.....	45
	CRÉDITOS DE TABLAS.....	47
	BIBLIOGRAFÍA.....	48
Anexo A	CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES.....	5
Anexo B	PARÁMETROS DE DISEÑO.....	6
Anexo C	ELABORACIÓN Y SELECCIÓN DEL CONCEPTO DE SOLUCIÓN.....	7
Anexo D	INFORMACIÓN DE LA ZONA DEL PROYECTO.....	12
Anexo E	NÚMERO DE PALAS.....	13
Anexo F	SELECCIÓN DE TURBINA HIDROKINÉTICA.....	15
Anexo G	ESTIMACIÓN DEL COEFICIENTE DE POTENCIA DEL PROPELLER.....	18
Anexo H	ANÁLISIS DE RESISTENCIA DE MATERIALES.....	19
Anexo I	DISEÑO DEL GENERADOR DE IMANES PERMANENTES.....	26
Anexo J	RECTIFICACIÓN Y REGULACIÓN DE TENSIÓN.....	30
Anexo K	SISTEMA DE PROTECCIÓN DEL PROPELLER.....	33
Anexo L	ESTIMACIÓN DE COSTOS.....	34
Anexo M	CATÁLOGOS.....	36
Anexo N	PLANOS MECÁNICOS Y ELECTRÓNICOS.....	37



## ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1 Evolución del coeficiente de electrificación rural (1993-2015).....	2
Figura 2.1 Giro rotativo de álabes por acción de un fluido.....	6
Figura 2.2 Campo de utilización de los diferentes tipos de turbinas.....	6
Figura 2.3 Turbina tipo rueda hidráulica del GRUPO RURAL PUCP.....	7
Figura 2.4 Turbinas sumergibles.....	7
Figura 2.5 Turbina Garman usada para bombeo de agua.....	8
Figura 2.6 Prueba de una turbina de río “aquacharger”.....	9
Figura 2.7 Comportamiento de la capa límite sobre un cuerpo.....	10
Figura 2.8 Capa límite sobre una placa plana.....	10
Figura 2.9 Comportamiento de la capa límite a diferentes Número de Reynolds.....	11
Figura 2.10 Ecuación de Bernoulli aplicada a un flujo.....	11
Figura 2.11 Fuerzas aerodinámicas actuando sobre un perfil.....	12
Figura 2.12 Separación de capa límite y pérdida de sustentación.....	12
Figura 2.13 Tipos de pérdida de sustentación.....	13
Figura 2.14 Nomenclatura del perfil aerodinámico.....	13
Figura 2.15 Sustentación, arrastre y momento sobre el perfil aerodinámico.....	13
Figura 2.16 Variación de CL y CD con el ángulo de ataque $\alpha$ - perfil NACA 4415.....	16
Figura 2.17 Relación entre $C_p$ y $\lambda$ dependiendo del tipo de máquina.....	17
Figura 2.18 Rotor basculante de máquina bipala.....	17
Figura 2.19 Estructura de un generador de imanes permanentes.....	20
Figura 2.20 Pines del puerto USB.....	22
Figura 2.21 Hydro Bee.....	23
Figura 2.22 Funcionamiento del Hydro Bee.....	23
Figura 2.23 Blue Freedom.....	23
Figura 2.24 Funcionamiento del Blue Freedom.....	23
Figura 2.25 Generador de agua de turbina.....	24
Figura 2.26 Ampair UW100.....	25
Figura 3.1 Caja Negra.....	26
Figura 3.2 Estructura de funciones.....	27
Figura 3.3 Matriz morfológica.....	29
Figura 3.4 Gráfica del criterio de evaluación.....	30
Figura 3.5 Concepto de solución óptimo.....	30

	Pág.
Figura 4.1 Diámetro vs velocidad para distintas potencias.....	32
Figura 4.2 Propeller W01 SP 24 - Ampair.....	32
Figura 4.3 Eje del sistema.....	33
Figura 4.4 Análisis de deformación del soporte de la carcasa.....	34
Figura 4.5 Análisis del disco.....	34
Figura 4.6 Soporte del sistema.....	35
Figura 4.7 Generador de imanes permanentes monofásico.....	35
Figura 4.8 Triángulo de potencias.....	36
Figura 4.9 Distribución de bobinas en el estator.....	37
Figura 4.10 Distribución de imanes en el rotor.....	37
Figura 4.11 Análisis del rizado.....	38
Figura 4.12 Circuito esquemático rectificador.....	39
Figura 4.13 Fuente switching Step-Down.....	39
Figura 4.14 Circuitos rectificador y regulador impresos.....	40
Figura 4.15 Tarjeta PCB simulada en 3D.....	40
Figura 4.16 Vista isométrica del sistema propuesto.....	41

## ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1.1 Desarrollo de los Recursos Energéticos Renovables (2014).....	2
Tabla 2.1 Comparación entre tipos de turbinas sumergibles.....	8
Tabla 2.2 Comparación entre tipos de turbinas hidrocinéticas.....	9
Tabla 2.3 Clasificación de la capa límite según el número de Reynolds.....	11
Tabla 2.4 Valores de celeridad para máquinas de viento de eje horizontal.....	18
Tabla 2.5 Comparación entre generadores eléctricos.....	21
Tabla 2.6 Comparación entre versiones de puerto USB.....	21
Tabla 2.7 Consumo energético de dispositivos con puerto USB.....	22
Tabla 2.8 Características del Hydro Bee.....	23
Tabla 2.9 Características del Blue Freedom.....	24
Tabla 2.10 Características del generador de agua de turbina.....	24
Tabla 2.11 Características del AMPAIR UW100.....	25
Tabla 3.1 Criterio de evaluación técnico.....	30
Tabla 3.2 Criterio de evaluación económico.....	30
Tabla 4.1 Valores de diámetro del rotor.....	31
Tabla 4.2 Velocidad del giro del eje de la turbina.....	32
Tabla 4.3 Cálculo de vueltas del bobinado.....	37
Tabla 4.4 Características del generador de imanes permanentes monofásico.....	38
Tabla 4.5 Cálculo de componentes para el diseño de la fuente switching.....	39
Tabla 4.6 Valores de velocidad máxima y mínima del río.....	40
Tabla 5.1 Costo de materiales.....	42

## LISTA DE SÍMBOLOS

Re:	Número de Reynolds
$\rho$	Densidad del fluido ( $\text{kg/m}^3$ )
L	Longitud característica (m)
v	Velocidad del fluido (m/s)
$\mu$	Viscosidad dinámica (kg/ms)
P	Presión ( $\text{N/m}^2$ )
g	Gravedad ( $\text{m/s}^2$ )
h	Altura (m)
Cl	Coefficiente de sustentación
Cd	Coefficiente de arrastre
A	Área del rotor ( $\text{m}^2$ )
$\alpha$	Ángulo de ataque ( $^\circ$ )
$\tau_w$	Esfuerzo cortante ( $\text{N/m}^2$ )
dA	Diferencial de área ( $\text{m}^2$ )
$\Lambda$	Relación de aspecto
$C_m$	Coefficiente de momento
c	Cuerda del perfil (m)
$\lambda$	Índice de celeridad o TSR
R	Radio del propeller (m)
w	Velocidad angular del propeller (rad/s)
m	masa (kg)
$C_p$	Coefficiente de potencia de la turbina
$C_t$	Coefficiente de transmisión de potencia
$C_g$	Coefficiente del generador
T	Torque (N.m)
Fp	Factor de potencia
f	Frecuencia eléctrica (Hz)
p	Número de polos
$E_A$	Voltaje inducido (V)
$N_C$	Número de vueltas del bobinado del estator
$\Phi$	Flujo magnético (Wb)
B	Remanencia magnética (T)
$V_r$	Tensión de rizado (V)
I	Intensidad de corriente (A)
C	Capacitancia del condensador (F)
R	Resistencia eléctrica ( $\Omega$ )
L	Inductancia (H)

## INTRODUCCIÓN

La falta de una fuente de generación eléctrica es un problema constante en las zonas rurales debido a que éstas se encuentran lejos de las grandes represas que abastecen a las ciudades de este importante insumo.

Las limitaciones al acceso de un recurso básico como la electricidad crean barreras sociales que impiden el desarrollo de las comunidades y/o poblaciones rurales. Por lo tanto, se deben buscar sistemas generadores de electricidad que operen de forma autónoma y aislada para un consumo relativo de baja potencia.

Actualmente existen diversas formas de generación eléctrica; sin embargo, muchas de ellas son perjudiciales y contaminan el medio ambiente. Por ello, se debe proponer una solución que, además de tener una fuente renovable, también deberá tener nulo o casi nulo impacto ambiental.

En el presente trabajo se describirán los aspectos relacionados a la generación de energía hidroeléctrica a partir del movimiento de corrientes de agua. Además, se brinda una alternativa que puede solucionar la problemática planteada.

El informe se divide en las siguientes partes:

El capítulo 1 está enfocado en el planteamiento del problema.

El capítulo 2 comprende el estudio de la tecnología actual aplicada a las turbinas, generadores y máquinas existentes afines.

El capítulo 3 comprende el diseño conceptual del generador hidroeléctrico portable, parámetros de la máquina y el concepto de solución óptimo.

El capítulo 4 analiza el diseño de la máquina y se muestran los cálculos mecánicos y eléctricos realizados.

El capítulo 5 muestra una estimación de costos de fabricación de la máquina.

## CAPÍTULO 1.- PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

### 1.1 - CONTEXTUALIZACIÓN

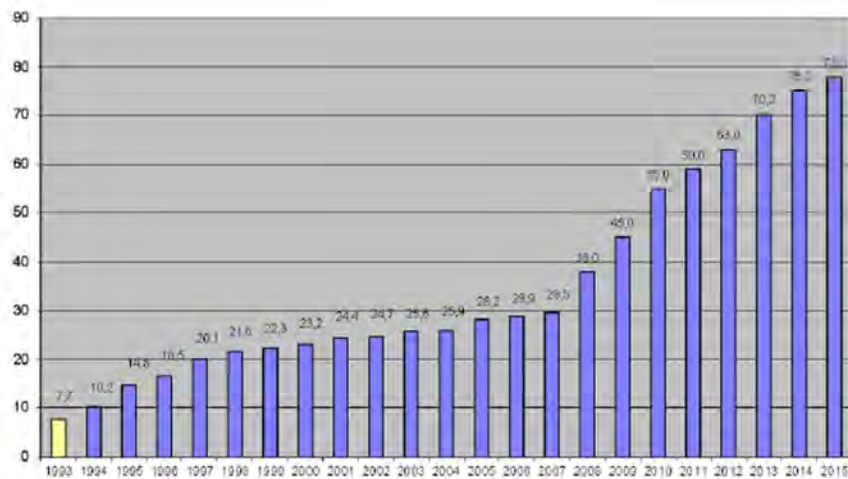
El Perú cuenta con diversas fuentes de energía renovable, entre las cuales destacan la tecnología hidroeléctrica, eólica y solar [1]. Sin embargo, parte de este potencial energético no es aprovechado debido a factores como la alta dispersión poblacional, la escasa promoción de tecnologías de aprovechamiento de recursos renovables y la falta del desarrollo de proyectos de aprovechamiento energético a pequeña escala [2].

**Tabla 1.1** - Desarrollo de los Recursos Energéticos Renovables (2014)

Tecnología	Potencia (MW)
Hidroeléctricas < 20 MW	391
Eólicas	232
Solares	96
Otros	27
<b>Total</b>	<b>746</b>

Fuente: MINEM

Demográficamente, en el sector urbano, gran parte de la población cuenta con acceso al servicio eléctrico. De acuerdo al Ministerio de Energía y Minas (MEM), al año 2015, este sector tenía cobertura del 93.3% de la población. Sin embargo, en el sector rural la cobertura sólo ha llegado hasta el 78% [3].



**Figura 1.1** - Evolución del coeficiente de electrificación rural (1993-2015)

La falta de una fuente de generación eléctrica renovable y limpia en las zonas rurales es una problemática actual que afecta al medio ambiente y la sociedad. En las zonas rurales no resulta económicamente viable la construcción de grandes represas debido al alto costo de inversión y al bajo consumo eléctrico. Por ello se requieren sistemas generadores eléctricos aislados que funcionen regularmente, de bajo impacto

ambiental y representen una alternativa al uso de combustibles fósiles, quienes tienen uso extendido en zonas rurales. De esta forma se usaría energía renovable y se reduciría el impacto ambiental generado por la emisión de gases tóxicos [2].

Además, la falta del servicio eléctrico incide negativamente en la calidad de vida de las personas e incrementa la brecha de desigualdad existente entre estas comunidades y el resto del país. A continuación se detallan los aspectos que generaría el acceso al suministro eléctrico: [2]

- Mayor productividad debido a que sería innecesario el desplazamiento para la compra de combustible o recarga de baterías.
- Aumento de horas de trabajo gracias a la iluminación.
- Uso de dinero destinado a la compra de combustibles fósiles para otros fines.
- Mayor uso de dispositivos electrónicos que faciliten el acceso a la información.

El sistema de generación que se presenta como la opción más viable es el hidroeléctrico ya que debido a factores económicos y geográficos presenta ventajas en comparación al resto (termoeléctrico, eólico y solar), las cuales se mencionan a continuación.

La diferencia más resaltante entre un grupo de generación hidroeléctrica sobre la termoeléctrica es que la segunda tiene un elevado costo de consumo debido a que utiliza combustibles fósiles, mientras que la primera lo único que requiere es agua en movimiento. Al compararla con la energía eólica, debido a la accidentada geografía del país, es difícil encontrar zonas planas donde poder instalar los aerogeneradores; sin embargo, el Perú cuenta con innumerables ríos y lagos que pueden ser aprovechados para la generación de energía eléctrica. Finalmente, al compararla con un panel solar, este necesita de la luz del día para poder funcionar, tienen elevado costo y poca eficiencia; mientras que un generador hidroeléctrico puede funcionar a cualquier hora del día [4].

Por ello, se propone el uso de un generador hidroeléctrico portable que transforme la energía de un fluido (río) en movimiento en electricidad, suficiente para poder cargar dispositivos que requieran de poca potencia.

El sistema propuesto es un primer avance para el desarrollo de sistemas generadores de energía eléctrica en zonas remotas. Debido a las dimensiones de la máquina, puede presentar inconvenientes para su traslado; sin embargo, a corto plazo se desea optimizar el sistema reduciendo su tamaño.

Con ello, se busca que cada vez más personas del sector rural cuenten con alternativas renovables para satisfacer sus necesidades y mejorar su calidad de vida.

## 1.2 - OBJETIVOS GENERALES

- Diseñar un generador portable hidroeléctrico para uso en zonas rurales.

## 1.3 - OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Diseño de sistema mecánico-eléctrico para transformación de energía.
2. Diseño de sistema electrónico para regulación y control de fuentes de voltaje.
3. Diseño de carcasa portátil y ergonómica.

## 1.4 - ALCANCES DEL DISEÑO

Para el diseño de la máquina generadora hidroeléctrica portable se realizará el estudio del estado del arte y tecnología de mecanismos similares tomando en cuenta el contexto geográfico y social de aplicación del proyecto. Una vez realizado ello, se elaborará una propuesta que resuelva la problemática descrita.

Se presentará un informe técnico en el cual estarán incluidos cálculos y planos de la máquina a diseñar.

## 1.5 - RESULTADOS DESEADOS

- Diseño de sistema capaz de generar energía eléctrica de 10 W.
- Diseño de sistema de casi nulo impacto ambiental
- Portabilidad del sistema.



## **CAPITULO 2.- ESTADO DEL ARTE**

En la actualidad, existe un movimiento en el mundo para el desarrollo de energías renovables, entre las cuales tenemos la eólica, hidráulica y solar. Los beneficios de utilizar este tipo de energía son diversos, entre los cuales destacan su disponibilidad, accesibilidad y escaso impacto ambiental.

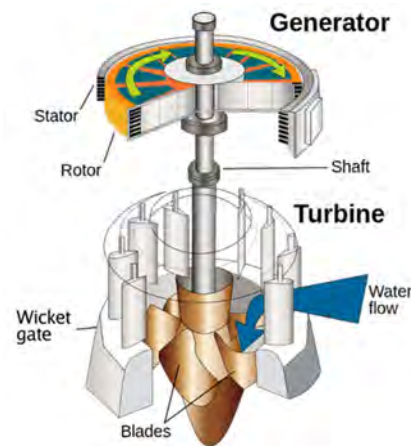
El recurso hídrico es abundante en todo el planeta, el cual es utilizado para generar electricidad. Por lo tanto, para construir un sistema generador hidroeléctrico es necesario conocer previamente todos los procesos que intervienen en su funcionamiento. Dado que el campo de aplicación del sistema es para zonas rurales, se tomará en cuenta el consumo energético realizado por una persona para alimentar dispositivos como celulares, GPS, linternas y otros. En este capítulo se estudiará cada parte necesaria para la obtención de energía eléctrica a partir de la energía cinética del agua.

### **2.1 - TURBINAS**

Las turbinas son definidas como máquinas que transforman la energía contenida en un fluido en movimiento a energía mecánica [5]. Históricamente, es probable que las primeras construcciones de ruedas hidráulicas (tipo de turbina) hayan tenido sus inicios en Asia, China e India hace aproximadamente 2200 años. Su uso se extendió por Egipto y Europa. Fue el francés Parent quien estudió por primera vez el funcionamiento de estas ruedas y posteriormente Leonard Euler publicó, en 1754, la ecuación fundamental de las turbomáquinas, marcando así una época en la que se inicia el estudio de las turbomáquinas hidráulicas. En 1827, Fourneyron construyó el primer prototipo de turbina hidráulica [5]. A continuación se estudiarán los conceptos relacionados a la turbina necesarios para el diseño de la máquina hidroeléctrica portable.

#### **2.1.1 - PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO**

Las turbinas tienen un elemento móvil rotativo que tiene el nombre de álabe, el cual se encarga de transmitir la energía del fluido a su eje. Como resultado de esta acción se obtiene un momento de torque, el cual puede ser aplicado para distintos usos: obtener electricidad a partir de un generador eléctrico, accionar bombas hidráulicas, entre otros [5].

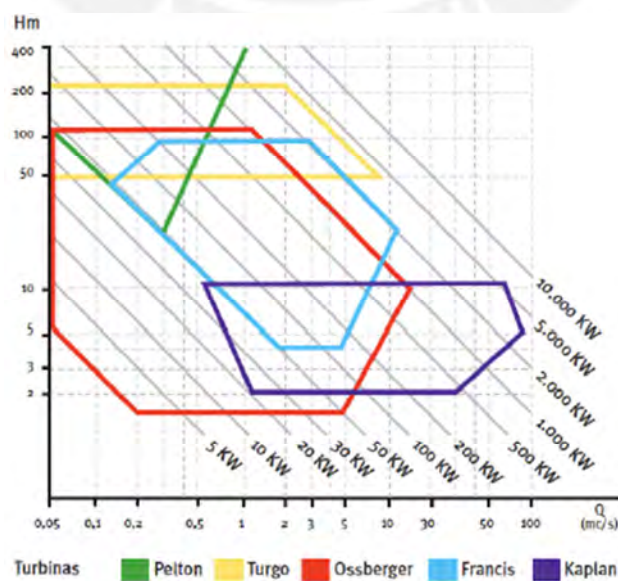


**Figura 2.1.** - Giro rotativo de álabes por acción de un fluido

### 2.1.2 - TIPOS DE TURBINAS HIDRÁULICAS

Existen diversos tipos de turbinas hidráulicas, entre las más empleadas tenemos: Kaplan, Pelton y Francis. Para utilizar estas turbinas debe haber una diferencia de alturas mínima de casi 2 m entre la toma y el desfogue de agua. A esta diferencia de alturas se le conoce como salto hidráulico, el cual sirve para definir la forma en que se aprovechará la energía y analizar la capacidad de generación de energía.

Debido a que no siempre existe un salto hidráulico de magnitud considerable, se recurre al uso de otro tipo de turbinas que en la que la altura de agua es casi la misma en la entrada y salida. A este tipo de turbinas se les conoce como turbinas de corriente libre o hidrocinéticas. Para el estudio de este tipo de turbinas se aplica el mismo análisis de los aerogeneradores [7].



**Figura 2.2.** - Campo de utilización de los diferentes tipos de turbinas

A continuación se mencionarán los distintos tipos de turbinas de corriente libre.

- **RUEDA HIDRÁULICA**

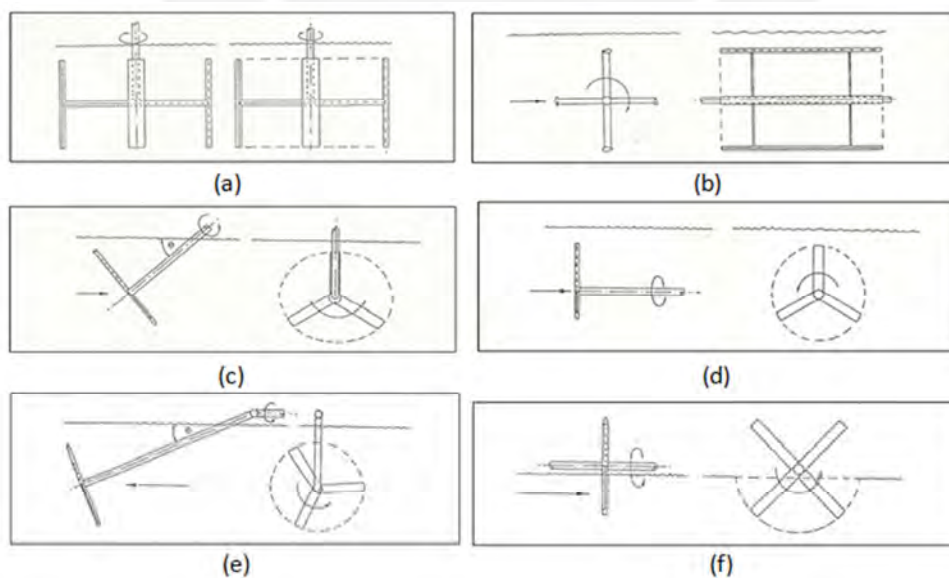
Tipo de turbina cuyos álabes se mueven en la misma dirección del fluido debido a la fuerza de arrastre originada por el movimiento de agua. Está construida de anillos metálicos concéntricos que sostienen a los álabes. La rueda hidráulica es una de las turbinas más simples en cuanto a construcción. No requiere de mantenimiento elaborado, pero es de gran tamaño y de baja eficiencia. [8]



**Figura 2.3.** - Turbina tipo rueda hidráulica del GRUPO RURAL PUCP

- **TURBINAS SUMERGIBLES**

Turbina cuyo rotor tiene una superficie efectiva que forma un ángulo con la superficie. Este tipo de turbinas tienen perfil aerodinámico, en contraste con la rueda hidráulica. A continuación se muestran seis tipos de turbinas sumergibles. [7]



**Figura 2.4.** - (a) Rotor Darrieus de eje vertical, (b) Rotor Darrieus de eje horizontal, (c) Rotor propeller de eje inclinado, (d) Rotor propeller de eje horizontal, (e) Rotor propeller arrastrado, (f) Rotor propeller sumergido a la mitad.

**Tabla 2.1.** - Comparación entre tipos de turbinas sumergibles

	<b>Rotor Darrieus de Eje Vertical</b>	<b>Rotor Darrieus de Eje Horizontal</b>	<b>Rotor Propeller de Eje Inclinado</b>	<b>Rotor Propeller de Eje Horizontal</b>	<b>Rotor Propeller Arrastrado</b>	<b>Rotor Propeller Sumergido a la mitad</b>
<b>NÚMERO MÍNIMO DE PALAS</b>	4	4	3	3	3	4
<b>PROFUNDIDAD REQUERIDA (M)</b>	2.1	2.1	1.75	3	2.4	2.1
<b>RPM A 1M/S</b>	13.5	32	48	48	25.5	15

Los sistemas de generación de electricidad de corriente libre utilizan mayormente turbinas con eje horizontal; sin embargo, también se utilizan turbinas de eje inclinado, las cuales son conocidas como turbina Garman, y su variante, la Aquacharger. A continuación se hace una breve descripción acerca de ellas.

#### ▪ **TURBINA GARMAN**

Utilizada inicialmente para bombear agua y posteriormente adaptada para generar electricidad a baja potencia, por encima de 2kW y puede ser usada para sustituir una bomba Diesel de 3HP. El sistema tiene el eje inclinado aproximadamente  $30^\circ$  respecto a la horizontal y opera a una velocidad de corriente de 0.6 hasta 1.9 m/s. Este tipo de turbina tiene una eficiencia del 15 al 18%. [7]



**Figura 2.5.** - Turbina Garman usada para bombeo de agua

#### ▪ **TURBINA AQUACHARGER**

Turbina empleada especialmente para energizar baterías y generar electricidad de consumo doméstico. Similar a la turbina Garman, pero de menor longitud de pala y capacidad de generación de energía. La turbina es sumergida a una profundidad mayor a 1.75m y opera en velocidades de corriente entre 0.45 y 1.5 m/s. Utilizado en lugares en los cuales viven comunidades dispersas cerca de ríos y canales. [7]



Figura 2.6. - Prueba de una turbina de río “aquacharger”

Tabla 2.2. - Comparación entre tipos de turbinas hidrocínéticas

	Eficiencia	Tipo De Construcción	Dimensión	Mantenimiento	Capacidad Para Evitar Desechos
<b>RUEDA HIDRÁULICA</b>	Baja	Sencilla	Grande	Simple	Muy mala
<b>TURBINA SUMERGIBLE</b>	Media	Complicada	Mediana	Complejo	Regular

### 2.1.3 - ASPECTOS TEÓRICOS DE LA TURBINA

Una vez conocidos los tipos de turbinas hidráulicas, se requiere hacer un estudio sobre ellas para comprender de una mejor manera su funcionamiento. Se aplicará el mismo principio de análisis de los aerogeneradores a las turbinas hidrocínéticas como se mencionó anteriormente.

El objetivo de esta sección es conocer los parámetros necesarios que determinarán el análisis de los factores para la selección del propeller para el sistema generador hidroeléctrico.

#### 2.1.3.1 - NÚMERO DE REYNOLDS [8]

##### a) DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE REYNOLDS

El número de Reynolds es un parámetro adimensional que nos la relación entre fuerzas inerciales y viscosas del flujo. Para determinarlo, se considera:

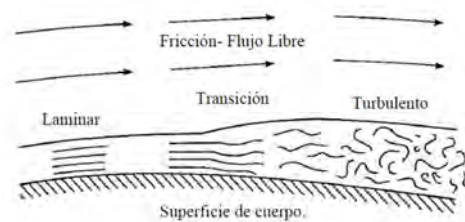
**Ecuación de Reynolds:**

$$Re = \frac{\rho * D * L}{\mu} = \frac{\text{Fuerzas inerciales}}{\text{Fuerzas viscosas}} \quad (2.1)$$

Si el fluido es ideal (no viscoso), el número de Reynolds sería infinito y no sería útil para el análisis. Sin embargo; si es real (viscoso),  $Re$  proporcionará información sobre la naturaleza del flujo, separación y otras características.

## b) CAPA LÍMITE-FLUJO LAMINAR Y TURBULENTO

El fluido que transita sobre un cuerpo puede ser dividido en dos zonas: una donde los efectos de la fricción son despreciables y otra donde la fricción tiene un impacto significativo. Esta zona es la que se encuentra próxima a la superficie del cuerpo y tiene por nombre capa límite. La capa límite puede ser laminar, de transición y turbulenta.



**Figura 2.7.** - Comportamiento de la capa límite sobre un cuerpo

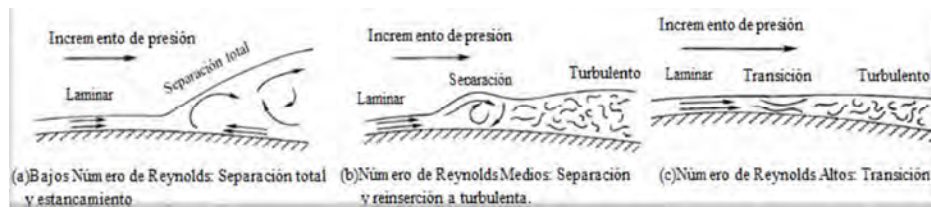
En cada capa se generan fuerzas de fricción, siendo en la capa laminar donde se genera la mínima fricción y en la capa turbulenta la mayor fricción. Es por esta razón que se desea que la totalidad de la superficie esté cubierta por una capa laminar, ya que con ello se reduce la fuerza de fricción, y por consiguiente, la fuerza de arrastre.

## c) FLUJO SOBRE UNA PLACA PLANA



**Figura 2.8.** - Capa límite sobre una placa plana

En la figura mostrada se aprecia que inicialmente, por el extremo izquierdo, hay una capa límite delgada que va aumentando a medida que recorre mayor distancia. Cuando llega hasta la longitud crítica, la capa entra en estado de transición. Este cambio está afectado por parámetros como las condiciones de corriente libre, rugosidad de la superficie y gradiente de presión. Además, a partir de este punto se generan remolinos de masa de fluido que generan turbulencia.



**Figura 2.9.** - Comportamiento de la capa límite a diferentes Número de Reynolds

El criterio para establecer el número de Reynolds de la capa límite es el siguiente:

**Tabla 2.3.** - Clasificación de la capa límite según el número de Reynolds

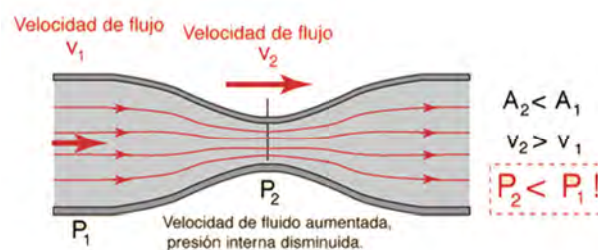
Número de Reynolds	Descripción
$Re > 3 \cdot 10^6$	Altos números de Reynolds
$5 \cdot 10^5 < Re < 3 \cdot 10^6$	Medios números de Reynolds
$Re < 5 \cdot 10^5$	Bajos números de Reynolds

Si se obtiene un número de Reynolds bajo, la capa límite es más estable y resistente a la separación. En el caso contrario, si se tiene un número de Reynolds alto, la capa límite es menos estable y la transición a flujo turbulento ocurre de forma precipitada.

#### d) GRADIENTES DE PRESIÓN

Los perfiles aerodinámicos son diseñados con la finalidad de obtener una fuerza de sustentación. Esta fuerza es generada por la diferencia de presiones entre la superficie interior y exterior del ala. Para entenderlo mejor, se analizará la ecuación de Bernoulli:

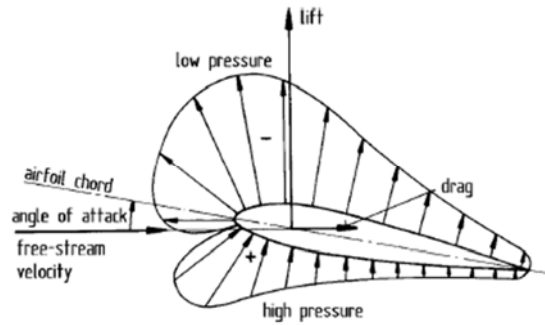
$$P_1 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_1^2 + \rho \cdot g \cdot h_1 = P_2 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_2^2 + \rho \cdot g \cdot h_2 \quad (2.2)$$



**Figura 2.10.** - Ecuación de Bernoulli aplicada a un flujo

Al analizar los puntos 1 y 2, Bernoulli se percató que en la parte donde había mayor velocidad (punto 2), la presión era menor que en el punto 1. De ello concluyó que cuando un fluido cambia

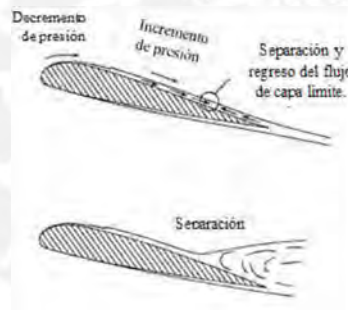
de sección y se mueve a una mayor velocidad, la presión en ese mismo punto disminuye. Este principio también se aplica para los perfiles aerodinámicos.



**Figura 2.11.** - Fuerzas aerodinámicas actuando sobre un perfil

Debido a la geometría de la parte superior del perfil aerodinámico, las partículas del fluido transitan a mayor velocidad que en la parte inferior. Estableciendo una analogía con Bernoulli, en la parte superior habrá menor presión que en la parte inferior. Esta diferencia de presiones origina una fuerza de sustentación perpendicular a la dirección del fluido y una fuerza de arrastre en la misma dirección del fluido.

#### e) PÉRDIDA DE SUSTENTACIÓN “STALL”



**Figura 2.12.** - Separación de capa límite y pérdida de sustentación

Cuando un flujo se separa del cuerpo que transita en un punto, se dice que ha habido pérdida de sustentación (“stall”) y aumento de la fuerza de arrastre. Esta separación puede cubrir parte o toda la superficie inferior y superior del perfil.

El número de Reynolds y el gradiente de presión son factores determinantes, ya que de ambos depende la estabilidad del perfil. Si se tiene un número de Reynolds bajo y un adecuado gradiente de presión, habrá mayor estabilidad y sustentación; si se tiene un número de Reynolds alto y gradiente de presión adverso ocurrirá lo contrario.



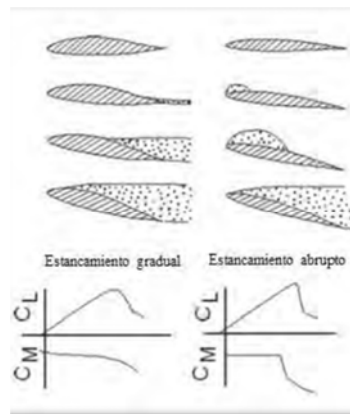


Figura 2.13. - Tipos de pérdida de sustentación

### 2.1.3.2 - ESTUDIO AERODINÁMICO [8]

#### a) ESTUDIO DEL PERFIL AERODINÁMICO

Las turbinas de aire utilizan perfiles aerodinámicos para desarrollar energía mecánica. Específicamente, los álabes tienen como sección transversal estos perfiles aerodinámicos.

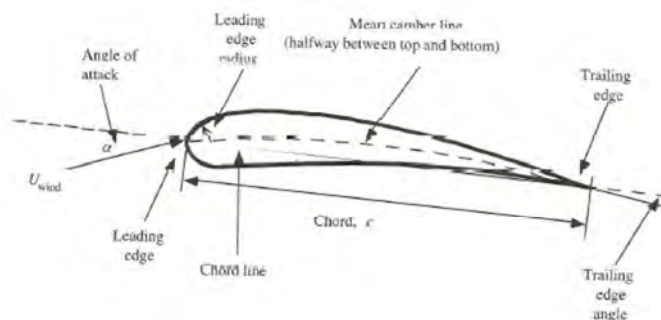


Figura 2.14. - Nomenclatura del perfil aerodinámico

El flujo de aire produce una distribución de fuerzas sobre el la superficie del perfil. Como resultado de esa distribución de fuerzas, aparecen la fuerza de sustentación, la fuerza de arrastre y un momento torsor, perpendicular a la sección transversal del perfil.

#### b) FUERZA DE SUSTENTACIÓN, ARRASTRE Y MOMENTO

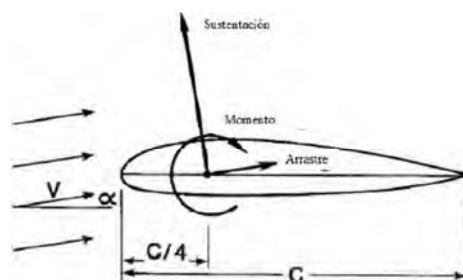


Figura 2.15. - Sustentación, arrastre y momento sobre el perfil aerodinámico

### I. FUERZA DE SUSTENTACIÓN (L)

Fuerza perpendicular a la dirección del flujo. Esta fuerza es generada por el paso de la corriente a sobre el perfil aerodinámico a un determinado ángulo de ataque.

$$L = \frac{1}{2} * C_l * \rho * A * v^2 \quad (2.3)$$

Dependiendo del ángulo de ataque, la fuerza de sustentación varía.

### II. FUERZA DE ARRASTRE (D)

Fuerza cuya dirección es paralela al flujo. Tiene tres componentes:

- **Fuerza de arrastre por fricción:**

Fuerza generada por fricción en la capa límite.

$$D = \int \tau_w \cdot dA \quad (2.4)$$

- **Fuerza de arrastre por presión:**

Fuerza generada por la diferencia de presiones entre la capa superior e inferior.

$$D = \int P \cdot dA \quad (2.5)$$

- **Fuerza de arrastre inducido:**

Fuerza generada por remolinos en la punta del ala cuando la relación entre ésta y el ancho del perfil no es suficientemente grande.

$$D = \frac{c_l^2}{\pi * \Lambda} \quad (2.6)$$

Por lo tanto, la ecuación de arrastre quedaría forma de la siguiente manera:

$$D = \int \tau_w \cdot dA + \int P \cdot dA + \frac{c_l^2}{\pi * \Lambda} \quad (2.7)$$

En la elaboración de los perfiles aerodinámicos de túneles de viento se considera una relación de aspecto infinita entre el ala y el ancho del perfil, por lo tanto, la última componente se desprecia. La ecuación quedaría determinada de la siguiente forma:

$$D = \int \tau_w \cdot dA + \int P \cdot dA \quad (2.8)$$

### III. MOMENTO DE CABECEO “PITCHING MOMENT” (M)

Momento generado por la variación de presiones sobre el perfil aerodinámico. El valor del momento depende del valor de sustentación y del punto del cual se toma el momento. Existe un punto en que el valor del coeficiente del momento se mantiene constante, llamado centro aerodinámico (25% de la cuerda aerodinámica).

$$M = \frac{1}{2} * C_M * \rho * c^2 * v^2 \quad (2.9)$$

El perfil aerodinámico de un álabe es diseñado para tener en máximo coeficiente de sustentación. La relación entre coeficientes de sustentación (Cl) y el de arrastre (Cd) nos permiten seleccionar un determinado perfil. Cuanto mayor sea esta relación, mayor será la sustentación del perfil para un ángulo de ataque determinado.

#### 2.1.3.3 - PARÁMETROS DE DISEÑO DEL ROTOR [8]

Para realizar el análisis de los álabes que conforman el rotor es necesario conocer los parámetros de diseño. A través de los años, estos han sido estudiados en la industria de los aerogeneradores con la finalidad de obtener la mayor eficiencia y sustentación posible, teniendo en cuenta al mismo tiempo la robustez y ligereza del propeller.

Es necesario mencionar que el alcance de este trabajo no requiere el diseño de los álabes del propeller, sino solamente se seleccionará la turbina que cumpla con los parámetros requeridos.

##### a) **ÍNDICE DE CELERIDAD ( $\lambda_0$ , TSR, TIP SPEED RATIO)**

Término que sirve para relacionar la velocidad del punto más exterior del álabe y la velocidad del fluido. La fórmula se expresa de la siguiente forma:

$$\lambda_0 = \frac{\text{Velocidad tangencial de la pala}}{\text{Velocidad del viento}} = \frac{u}{v} = \frac{R * \omega}{v} \quad (2.10)$$

Lo óptimo sería obtener un índice de celeridad alto para un perfil dado, lo cual significaría que la velocidad de la corriente genera mayor número de revoluciones en el eje.

## b) RELACIÓN ENTRE EL COEFICIENTE DE SUSTENTACIÓN ( $C_L$ ) Y EL DE ARRASTRE ( $C_D$ )

El óptimo funcionamiento de álabes se da cuando la relación  $C_L/C_D$  es máxima para un ángulo de ataque  $\alpha$ . No siempre  $C_L$  es el mayor valor, teniendo en cuenta que el  $C_D$  debe ser el menor posible.

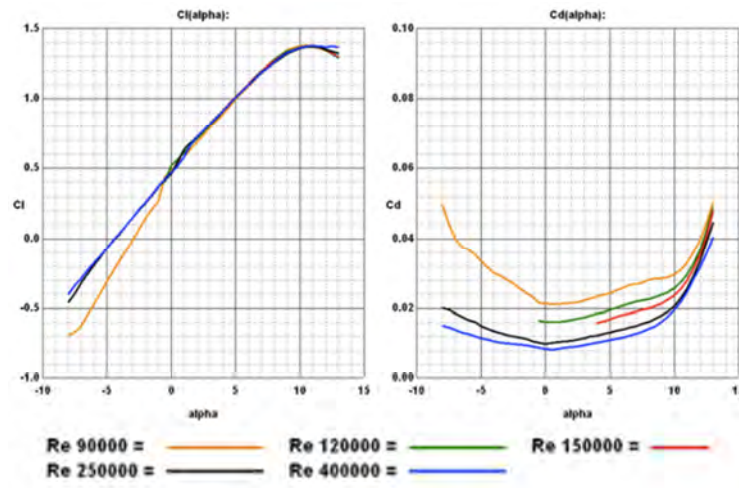


Figura 2.16. - Variación de  $C_L$  y  $C_D$  con el ángulo de ataque  $\alpha$  - perfil NACA 4415

## c) COEFICIENTE DE POTENCIA ( $C_P$ )

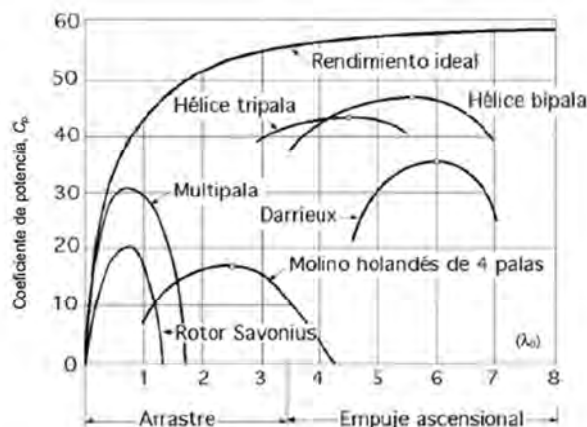
Es la relación entre la potencia generada respecto a la potencia de la corriente que atraviesa al rotor.

$$C_P = \frac{P}{P_{max}} = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho S v^3} \quad (2.11)$$

La ley de Betz establece que la máxima potencia extraíble de un fluido en movimiento es del 59.3%. Por lo tanto, para conseguir el máximo rendimiento posible, el valor de  $C_P$  debe ser lo más cercano a este valor.

## d) NÚMERO DE ASPAS

Dado que se desea absorber la máxima potencia, y por lo tanto tener el máximo  $C_P$ , se analizará la potencia que generan los distintos tipos de turbinas. En la figura mostrada, se observa que la hélice tripala, bipala y el tipo Darrieux tienen los mayores valores de  $C_P$ . Sin embargo, entre ellos, el rotor Darrieux, además de ser complicado de construir, no tiene una adecuada estructura para su uso en ríos.



**Figura 2.17** - Relación entre  $C_p$  y  $\lambda$  dependiendo del tipo de máquina

Los aerogeneradores modernos evitan utilizar un número par de palas debido a que el rotor puede dar problemas de estabilidad, además de necesitar mayor velocidad que los generadores tripala para generar la misma potencia. Las máquinas bipala requieren de un diseño más complicado, como el de un rotor basculante, el cual debe ser capaz de inclinarse con la finalidad de evitar sacudidas.



**Figura 2.18** - Rotor basculante de máquina bipala

Las turbinas eólicas que tienen muchos álabes son conocidas como turbina de alta solidez y las de pocos álabes como de baja solidez. Para extraer la máxima potencia, la turbina debe tener el mayor contacto posible con el fluido, por lo tanto, se podría concluir precipitadamente que a mayor número de álabes hay mayor eficiencia. Sin embargo, los mayores números de álabes hacen que un álabe deje una estela turbulenta que interfiere con las que se encuentran próximas a ella, lo cual genera pérdida de eficiencia. Por ello, las turbinas de baja solidez (tripala) son las más adecuadas.

En la gráfica presentada anteriormente, se aprecia que los aerogeneradores con mayor número de palas no funcionan por fuerza de sustentación, sino por fuerza de arrastre. En este tipo de turbinas generalmente no se utilizan perfiles aerodinámicos. Para la elección del valor de celeridad, se analizará la siguiente tabla:

**Tabla 2.4** - Valores de celeridad para máquinas de viento de eje horizontal

Tipo de máquina	$\lambda_0$ de diseño	Tipo de pala	$C_y/C_x$
Bombeo de agua	1	Placa plana	10
	1	Placa curvada	20-40
	1	Aspa de tela	10-25
Generadores eólicos pequeños	3-4	Perfil simple	10-50
	4-6	Perfil alabeado	20-100
	3-5	Aspa de tela	20-30
Generadores eólicos grandes	5-15	Perfil alabeado	20-100

De esta sección se puede concluir lo siguiente:

- Para valores bajos de índice de celeridad, los molinos multipala y Savonius tienen el máximo valor de  $C_p$ .
- La máxima potencia la brindan los propellers tripala, bipala y Darrieux.
- El  $C_p$  de los tipos de propellers está por debajo del límite de Betz. Si  $\lambda_0$  tiene a infinito,  $C_p$  tiende al límite de Betz.
- Para  $\lambda_0$  menor a 3.5 se trata de un sistema de arrastre, caso contrario, es un sistema de sustentación.

## **2.2 - GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

Para la generación de energía eléctrica se utilizan los generadores eléctricos. Este dispositivo es usado para convertir la energía mecánica en eléctrica mediante el giro del eje del generador accionado por un elemento rotatorio, en este caso una turbina, el cual le transfiere energía mecánica. En este capítulo se describirán los tipos de generadores utilizados para producir energía eléctrica.

### **2.2.1 - GENERADOR DE CORRIENTE CONTINUA [9]**

Un generador de corriente continua también es llamado dínamo, el cual es una máquina que puede funcionar tanto como motor y generador. Debido a que utiliza escobillas para la generación de electricidad, esto supone una desventaja porque requiere un mantenimiento constante.

Inicialmente la corriente inducida en las bobinas es alterna, pero la corriente rectificadora se obtiene mediante el giro de dos semianillos alrededor de dos escobillas colectoras. Estas escobillas limitan el nivel de corriente obtenido. El arranque del generador se realiza empleando el magnetismo que contienen los polos inductores.

La tensión depende directamente de la velocidad de giro y el número de polos, la intensidad de corriente depende de la tensión y la carga. Si se utiliza una batería, se deben evitar sobretensiones ya que pueden dañarlas. Para ello se utilizan reguladores tanto de tensión como de carga.

Para las especificaciones de la máquina a diseñar, se pueden encontrar generadores DC que pueden generar desde 2.8V a 500RPM hasta 24V a 5000RPM, potencia máxima entre 36 y 55W, peso entre 400g y 2.5Kg, y dimensiones desde 108x40x40mm y 90x100x100mm.

### **2.2.2 - GENERADOR DE EXCITACIÓN O SÍNCRONO [9]**

Máquina generadora de energía eléctrica alterna que necesita de corriente de excitación de tipo continua, el cual puede ser una fuente externa u otro generador síncrono con corriente rectificadora. Este tipo de generador proporciona más potencia y mayor rango de velocidades en comparación al dínamo. Los devanados dentro del estator actúan como reguladores de corriente, por lo tanto, no se producen sobreintensidades.

Este tipo de generador provee una corriente con una frecuencia que depende de la velocidad de rotación de la máquina. Por lo tanto, si se desea trabajar alrededor de una frecuencia dada se deben emplear sistemas de regulación muy precisos.

Si se desea conectar el generador a una red, se deberá realizar dicha conexión cuando la turbina alcance la velocidad de sincronismo, ya que a velocidades menores funcionaría como motor, lo cual generaría que

la máquina absorba potencia de la red. Estos generadores son empleados a escala industrial, ya que son utilizados para generar potencia hasta de 110kW, tensiones desde 220 a 15000V y operan de 150 a 3600rpm.

### 2.2.3 - GENERADOR DE INDUCCIÓN O ASÍNCRONO [9]

Este tipo de generador recibe como corriente de excitación una corriente del tipo alterna, el cual crea un campo magnético alterno con la misma frecuencia en el inductor.

La frecuencia de la corriente obtenida depende de la frecuencia de la corriente de excitación y la magnitud de la caída de la velocidad de giro respecto a la de sincronismo. La velocidad de sincronismo es en la que el rotor gira sin absorber o generar potencia. Este tipo de generador es empleado cuando se desea obtener frecuencias estables. Para conectar el generador a la red, se debe tener en cuenta que dicha conexión debe realizarse cuando la velocidad de giro del rotor sea mayor a la velocidad de sincronismo. Se debe desconectar el generador en caso contrario, ya que este funcionaría como motor absorbiendo potencia.

Las ventajas que presenta este generador son las siguientes: no necesita girar a una velocidad constante, basta que sea mayor a la de sincronismo y no necesita regulación. Los generadores síncronos pueden generar bastante potencia. Entre los generadores comerciales existen rangos que van desde 500 a 700W, 230V a 50Hz, velocidad hasta 2800RPM y corriente entre 3 y 3.7A.

### 2.2.4 - GENERADOR DE IMANES PERMANENTES [9]

Tipo de generador que se caracteriza porque la excitación se realiza por medio de imanes, por lo cual no tiene bobinas inductoras o electroimanes y no necesita de corriente de excitación. Esto supone una gran ventaja, pero sólo puede ser utilizado para generar energía eléctrica a bajas potencias debido a que el campo magnético que se obtiene de una bobina o un electroimán es siempre mayor a la de los imanes permanentes.

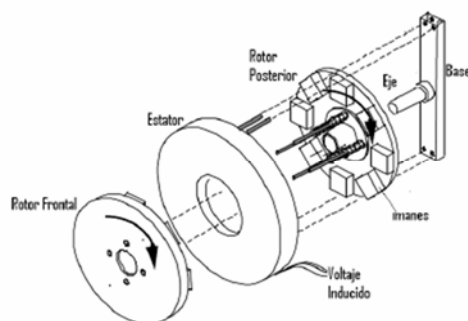


Figura 2.19. - Estructura de un generador de imanes permanentes



Este generador se puede construir de acuerdo a parámetros de operación y diseño, como RPM, potencia y número de fases. En la actualidad, para la generación de energía eléctrica en zonas remotas, el generador de imanes permanentes es el más utilizado debido a la facilidad de su construcción, sumergibilidad y baja disipación de calor.

**Tabla 2.5.** - Comparación entre generadores eléctricos

Tipo de generador	Tipo de corriente generada	Fuente de excitación	Dificultad de construcción	Eficiencia	Dimensión
<b>DÍNAMO</b>	DC	No necesita	Complicada	Baja	Mediana
<b>GENERADOR SÍNCRONO</b>	AC	DC	Complicada	Media	Mediana
<b>GENERADOR ASÍNCRONO</b>	AC	AC	Complicada	Media	Mediana
<b>IMANES PERMANENTES</b>	AC	No necesita	Sencilla	Media	Pequeña

### 2.3 - CARGA DE DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS

La corriente eléctrica obtenida del generador, indistintamente del tipo, debe ser dispuesta para la carga de dispositivos eléctricos de baja potencia. En esta sección se estudiará el tipo de conexión que tienen estos componentes con la finalidad de establecer los parámetros adecuados para su carga.

- **CONEXIÓN DE DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS**

Dada la necesidad de establecer un tipo de conexión estándar para los dispositivos electrónicos, los fabricantes consensuaron realizar una conexión estándar, a la cual denominaron USB (Universal Serial Bus). Mediante ella, se logra comunicar, conectar y proveer de energía a cualquier dispositivo. Existen diversas versiones de puerto USB, las cuales se describen a continuación:

**Tabla 2.6.** - Comparación entre versiones de puerto USB

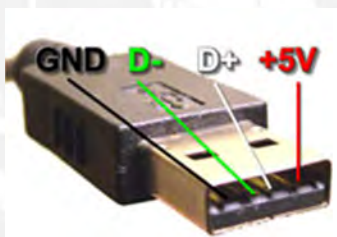
Versión	Velocidad de transmisión (Mbit/s)	Forma de envío de datos	Uso	Número de pines
<b>USB 1.0</b>	1.5	Unidireccional	-	4
<b>USB 1.1</b>	12	Unidireccional	-	4
<b>USB 2.0</b>	480	Unidireccional	Masivo	4
<b>USB 3.0</b>	6000	Bidireccional	Bajo	9

La tabla mostrada indica que los dispositivos actuales utilizan la versión USB2.0, la cual opera a 5V y 0.5A. Para calcular los parámetros de diseño de la máquina, se debe conocer cuál es la demanda de potencia a generar. Debido a requerimientos de diseño, se debe producir 10W de potencia. A continuación se muestra una tabla que muestra el consumo energético de gadgets que pueden usarse en las zonas rurales.

**Tabla 2.7.** - Consumo energético de dispositivos con puerto USB

	Voltaje	Amperaje	Tiempo de carga
<b>CELULAR</b>	5 V	0.5A	2 horas
<b>GPS</b>	5V	0.5A	2 horas
<b>LINTERNA LED</b>	5V	0.5A	15 min
<b>BATERÍA EXTERNA</b>	5V	0.5A	16 horas

La corriente está regulada por la resistencia interna de los dispositivos. Por lo tanto se harán cuatro salidas USB de 5V y 0.5A.



**Figura 2.20.** - Pines del puerto USB 2.0

## 2.4 - MÁQUINAS AFINES

Una vez conocidos los parámetros de funcionamiento de un sistema generador hidroeléctrico, se buscan máquinas que sean similares a la que se desea realizar. El funcionamiento de estos dispositivos es el siguiente: el movimiento del agua de un río permite el giro rotatorio de una turbina, la cual está unida al eje de un generador eléctrico. La corriente inducida en el generador es regulada por un circuito eléctrico. Finalmente el usuario podrá disponer de su uso. A continuación se mencionan algunos productos existentes afines a la máquina a diseñar:

### 2.4.1 - HYDRO BEE [10]

El dispositivo, hecho de plástico, es colocado sobre la superficie del río. Unas aletas adheridas a los costados le permiten flotar y es sujeta mediante una cuerda para su anclaje. Se orienta de acuerdo a la dirección del flujo del río. Permite la carga de celulares y dispositivos eléctricos con entrada USB 2.0. El sistema es fabricado por la compañía HydroBee y comercializado por vía web en la página Indiegogo.



Figura 2.21. - Hydro Bee



Figura 2.22. - Funcionamiento del Hydro Bee

Tabla 2.8. - Características del Hydro Bee

Características
Salida: 2 puertos USB 3.0, 5V x 2A, 5000 mAh.
Tamaño: lata de gaseosa estándar (EEUU) de 12 onzas.
Peso: 453 gr (1 lb).
Tiempo de carga: 3-4 horas dependiendo de la fuente de energía.

### 2.4.2 - BLUE FREEDOM [11]

Dispositivo que contiene una turbina en centro, la cual es desplegable. Esta turbina se sumerge totalmente debajo del agua y está unida al mango del disco mediante un cable. La energía generada por el giro de la turbina es transportada hacia un circuito contenido dentro del disco. Es utilizado en corrientes de agua de aproximadamente de 1m/s. El dispositivo es fabricado por la compañía Blue Freedom y comercializado por su propia página web.



Figura 2.23. - Blue Freedom



Figura 2.24. - Funcionamiento del Blue Freedom

**Tabla 2.9.** - Características del Blue Freedom

Características
Diámetro de la turbina: 12 cm (4.7in).
Potencia: 5W, 5V
Tipo de batería: Litio-Polímero, capacidad 5000 mAh, voltaje de 5V
Salida: puertos de 2A y 1A.
Temperatura de operación: 5 - 40° C (41°F - 104°F).
Altitud de operación: hasta 5000 m (16 400 ft.).
Tiempo de carga: 3 – 4 horas, velocidad de flujo de corriente: 1.2 m/s.
Peso: 600 g
Precio: \$ 339.00

### 2.4.3 - GENERADOR DE AGUA DE TURBINA [12]

-Generador sumergible de alta eficiencia, puede ser usado sin la necesidad de instalar una represa o tubería. Gran parte del sistema está fabricado de plástico de alto impacto. La turbina puede operar en corrientes rápidas con una gradiente de descenso de 10 grados. El dispositivo es fabricado por la compañía Alluvial Pacific y comercializado por distintas páginas web.

**Figura 2.25.** – Generador de agua de turbina**Tabla 2.10.** - Características del generador de agua de turbina

Características
Potencia: hasta 200W.
Máximo voltaje: 14V.
Máximo amperaje: 14A.
Velocidad de flujo: 3.2 m/s para 196W.
Tamaño impeler: 250 mm diámetro.
Tamaño del sistema: S300mm x 470mm.
Puede funcionar sin baterías (carga directa del generador)
Peso: 3.1 kg.
Costo: \$650.00

#### 2.4.4 - AMPAIR UW100 [13]

Generador de energía eléctrica usado preferentemente para cargar baterías. Tiene un propeller de 3 álabes que está unido mediante un eje horizontal a un generador de imanes permanentes y genera corriente alterna bifásica. El sistema cuenta externamente con un circuito que rectifica las ondas alternas y las acondiciona para poder energizar diversos dispositivos. Ideal para ser instalado en canales. Es fabricado por la empresa Seamap y comercializado por varias páginas web.



**Figura 2.26.** – Ampair UW100

**Tabla 2.11.** - Características del AMPAIR UW100

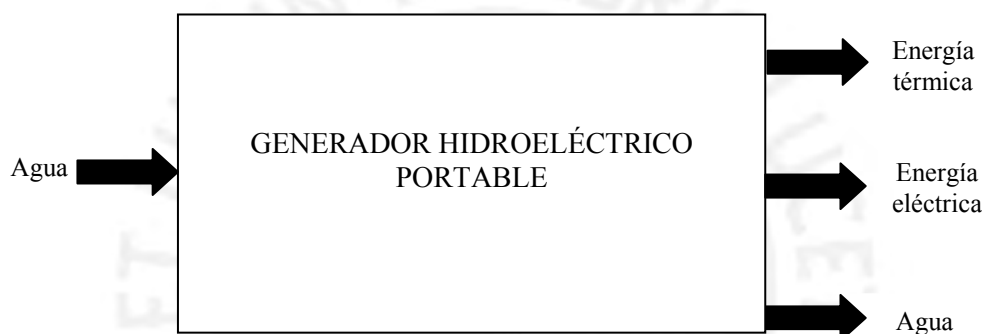
Características:
Potencia: hasta 100W
Voltaje de salida: 12 o 24 VDC
Velocidad de flujo: 1 a 4m/s
Tamaño impeler: 312 mm diámetro.
Tamaño del sistema: 367mm x 312mmx312mm.
Peso: 15kg
Costo: \$2200.00

## CAPÍTULO 3.- DISEÑO CONCEPTUAL DEL GENERADOR HIDROELÉCTRICO

### 3.1 - CONCEPTUALIZACIÓN DEL DISEÑO

En este capítulo se explicará la secuencia de operaciones de la máquina a diseñar para luego describir en un esquema el diagrama de funciones, lo cual permitirá tener un mejor entendimiento del funcionamiento del sistema.

#### 3.1.1 - CAJA NEGRA



**Figura 3.1.** - Caja Negra

- Definiciones:
- Caja negra: Generador Hidroeléctrico Portable
- Entrada:
  - Energía cinética de un río
- Salida :
  - Energía térmica
  - Energía eléctrica
  - Agua

#### 3.1.2 - PROCESOS

Teniendo en cuenta la información obtenida en el estado del arte se determinó la siguiente secuencia de operaciones:

A continuación se detallan los pasos a seguir del proceso [14]:

- 1.- La máquina es colocada en un río y el movimiento del agua permite el giro de la turbina.
- 2.- Mediante un eje, la energía mecánica es transmitida de la turbina hacia un generador. Para que el sistema opere de forma óptima, la velocidad del fluido debe ser aproximadamente de 1m/s.
- 3.- El giro del eje del generador realiza la conversión de energía mecánica en eléctrica.
- 4.- La energía eléctrica generada es acondicionada para proporcionar energía para dispositivos electrónicos.

### 3.1.3 - ESTRUCTURA DE FUNCIONES

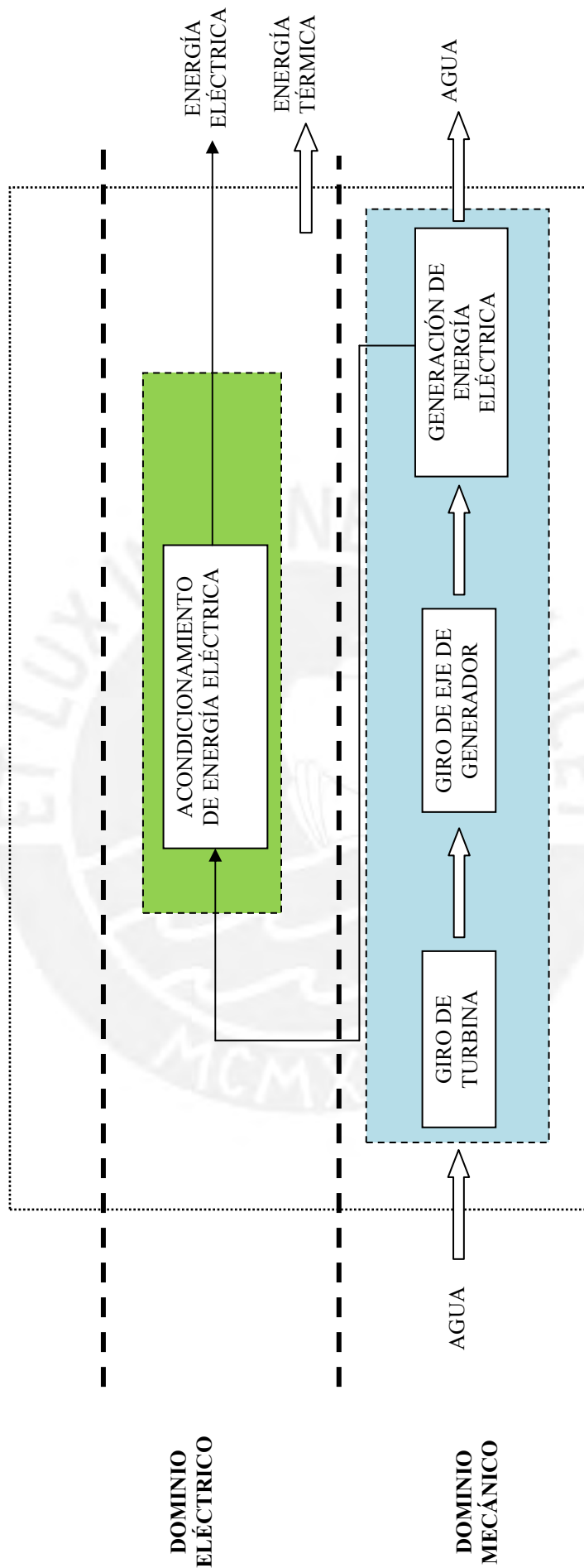


Figura 3.2. - Estructura de funciones

## **3.2 - PARÁMETROS DEL GENERADOR HIDROELÉCTRICO PORTABLE**

Teniendo en cuenta el estudio del arte realizado para sistemas generadores hidroeléctricos portables, se estableció la lista de requerimientos necesaria para el diseño de la máquina. A continuación se muestra la lista de exigencias que la máquina deberá cumplir. (Ver Anexo B)

### **3.2.1 - PARÁMETROS MECÁNICOS**

La máquina requiere de un sistema robusto que proteja a todos sus elementos internos, por ello se debe cumplir con los siguientes requerimientos:

- La máquina no debe exceder las dimensiones de 400 x 350 x 350 mm.
- El peso del sistema no debe ser mayor a los 15 kg-f.
- El sistema debe operar en corrientes de agua que tengan como velocidad aproximada de 1m/s.
- Capacidad de operación a cualquier hora del día.
- La máquina debe ser portable para 1 persona.

### **3.2.2 - PARÁMETROS ELÉCTRICOS**

Debido a que lo que se quiere obtener es energía eléctrica, el diseño de la máquina debe cumplir los siguientes requerimientos:

- Permitir la carga de dispositivos electrónicos con puerto USB a 5V y 0.5 A.
- Proporcionar 10W de potencia.
- Contar con un sistema generador que opere bajo el agua.
- Diseñar un circuito regulador de tensión.
- Eficiencia del sistema de 30%
- No se incluye sistema de control debido a la poca potencia generada.

## **3.3 - MATRIZ MORFOLÓGICA**

En la creación de la matriz morfológica se elaboraron 3 soluciones, las cuales fueron analizadas mediante una evaluación técnico-económica. (Ver Anexo C)



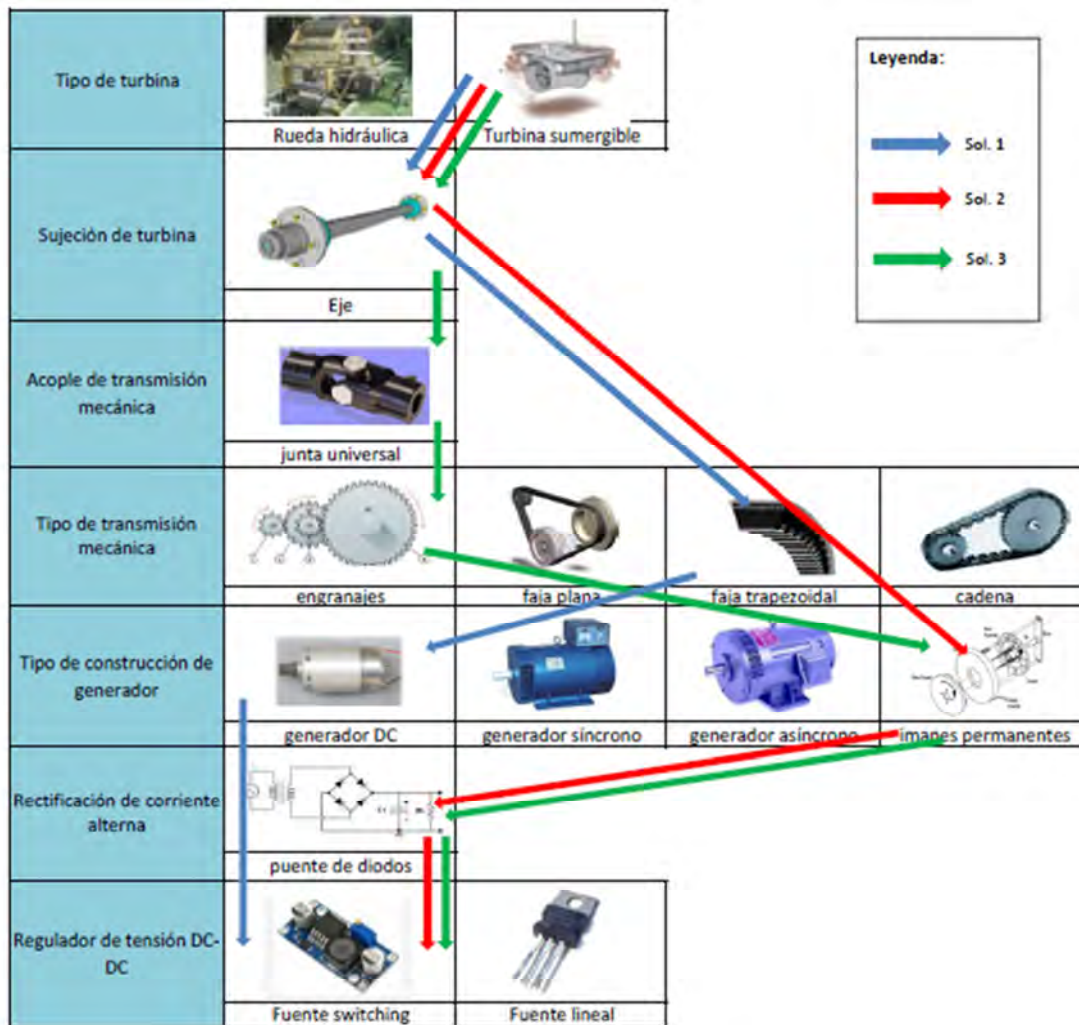


Figura 3.3 - Matriz morfológica

### 3.4 - CONCEPTO ÓPTIMO DE SOLUCIÓN

Una vez elaborada la matriz morfológica, se continuó con el análisis técnico-económico. Este método permite realizar una valoración técnica y económica de las soluciones propuestas con la finalidad de cuantificarlas y de esa manera elegir la alternativa más adecuada. Se estableció que mientras mayor sea el valor obtenido de la alternativa analizada, ésta se ajustaba mejor a la solución ideal. De acuerdo al criterio de evaluación técnica, los resultados arrojaron que la alternativa 1 alcanzó un valor de 37.5; la 2, 43; y la 3, 37.5. De la misma manera, se realizó el análisis mediante el criterio de la evaluación económica, del cual se extrajo lo siguiente: la solución 1 obtuvo un valor de 28.5; la 2, 28; y la última, 26.5. Siguiendo con la metodología de Zwicky, se procedió a colocar estos tres puntos como coordenadas en una gráfica, se realizó una aproximación lineal y se analizó qué solución se aproximaba más a la recta. Los resultados mostraron que la alternativa 2 era la más adecuada.

**Tabla 3.1.** - Criterio de evaluación técnico

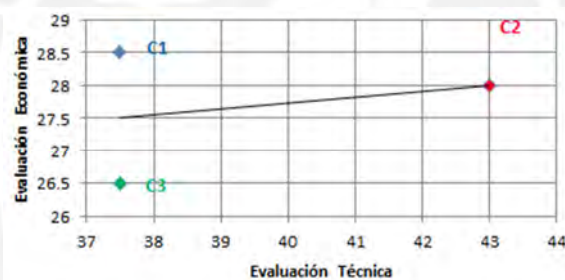
Nro	Criterio de Evaluación Técnico	Valor	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
1	Capacidad de generación de energía (W)	2.0	3	4	3
2	Transportabilidad	1.5	3	4	3
3	Facilidad de construcción	1.5	3	2	3
4	Seguridad	1.5	3	4	3
5	Estabilidad	1.5	3	4	3
6	Manipulación	1.5	3	3	3
7	Complejidad de diseño	1.0	3	4	3
8	Grado de contaminación del medio ambiente	1.0	4	4	4
9	Facilidad de mantenimiento	0.5	4	3	4
<b>Valor Ponderado</b>			<b>37.5</b>	<b>43</b>	<b>37.5</b>

Leyenda: El valor de las alternativas varían entre no satisface (0) a satisface satisfactoriamente (4)

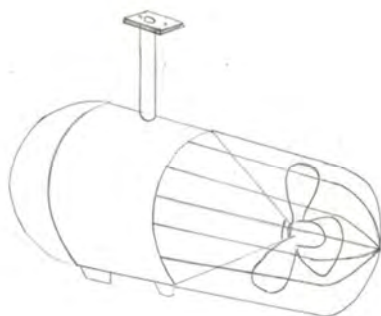
**Tabla 3.2.** - Criterio de evaluación económico

Nro	Criterio de Evaluación Económico	Valor	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
1	Número de piezas	2.0	4	4	3
2	Costo de la tecnología	1.5	3	4	3
3	Costo de operación	1.5	4	4	4
4	Costo de mecanización	1.0	3	2	3
5	Tiempo de adquisición de materiales	1.0	4	3	4
6	Costo de adquisición de materiales	0.5	3	2	3
7	Vida útil de los materiales	0.5	3	4	3
<b>Valor Ponderado</b>			<b>28.5</b>	<b>28</b>	<b>26.5</b>

Leyenda: El valor de las alternativas varían entre no satisface (0) a satisface satisfactoriamente (4)



**Figura 3.4.** - Gráfica del criterio de evaluación



**Figura 3.5.** - Concepto de solución óptimo

La máquina a diseñar toma como referencia al generador Ampair UW100, el cual consta de una turbina sumergible tripala. El eje de la turbina está acoplado directamente a un generador de imanes permanentes. La energía eléctrica obtenida del generador es del tipo alterna monofásica. Además, todo el sistema eléctrico se encuentra aislado y encapsulado para operar bajo el agua. Externamente, hay un sistema externo que rectifica la corriente y la regula para energizar dispositivos electrónicos. La máquina cuenta con un sistema de fijación para canales de agua. Este sistema se caracteriza por ser compacto y de buena eficiencia, aproximadamente del 30%.

## CAPÍTULO 4.- DISEÑO Y CÁLCULO DE LOS ELEMENTOS PRINCIPALES

Gracias a los requerimientos establecidos se han realizado los cálculos que justifican el diseño del sistema propuesto. En este capítulo se mencionan los principales componentes del sistema y el respectivo análisis realizado.

### 4.1 - ANÁLISIS DEL PROPELLER

El análisis del propeller nos permitirá establecer los parámetros necesarios para seleccionar el que cumpla con los requerimientos de diseño. Este subcapítulo presentará lo más resaltante del Anexo E, F y G.

#### 4.1.1 - CÁLCULO DEL DIÁMETRO DEL PROPELLER

Se establece que el propeller debe tener 3 álabes (ver anexo E). Además se realizó el cálculo del diámetro del propeller, lo cual nos permite obtener la medida del rotor para la generación de 12W. Utilizando la ecuación (F.7) del anexo se obtuvo que para la potencia requerida se necesita un propeller de 32.57 cm de diámetro.

Mediante el cálculo realizado se determinó lo siguiente:

-Para mayores velocidades de corriente, se requiere un diámetro mucho menor para generar la misma potencia.

-El Tip Speed Ratio ( $\lambda$ ) influye en la capacidad que tiene la turbina para obtener energía. El valor óptimo de  $\lambda$  depende del número de álabes de la turbina.

**Tabla 4.1** - Valores de diámetro del rotor para distintos valores de velocidad y potencia

Velocidad (m/s)	Diámetro 5 W (cm)	Diámetro 6 W (cm)	Diámetro 7 W (cm)	Diámetro 9 W (cm)	Diámetro 12 W (cm)	Diámetro 15 W (cm)
0.4	83.11297508	91.04570255	98.3405983	111.507757	128.758067	143.955896
0.6	45.24097332	49.55900323	53.5298415	60.697135	70.0870145	78.3596644
0.8	29.38487414	32.18951684	34.768652	39.4239457	45.5228513	50.896095
<b>1</b>	<b>21.02610435</b>	<b>23.0329433</b>	<b>24.8784222</b>	<b>28.2094792</b>	<b>32.5735008</b>	<b>36.418281</b>
1.2	15.99509951	17.52175363	18.925657	21.4596775	24.7795016	27.704325
1.4	12.69307254	13.90456431	15.018646	17.0295438	19.6640234	21.9850465
1.6	10.38912189	11.38071282	12.2925748	13.9384697	16.0947584	17.994487
1.8	8.706629376	9.537634618	10.3018228	11.6811691	13.4882522	15.0803244
2	7.433850484	8.143375198	8.79585051	9.97355701	11.5164716	12.8758067
2.2	6.443543937	7.058548729	7.624104	8.64492136	9.98229534	11.1605455
2.4	5.655121666	6.194875403	6.69123019	7.58714188	8.76087681	9.79495805
2.6	5.015321678	5.494009632	5.93420864	6.72876012	7.76970293	8.68679196
2.8	4.487678833	4.916005855	5.3098932	6.02085296	6.95228215	7.77288775
3	4.046475669	4.432692004	4.78785458	5.4289168	6.26877315	7.00870145

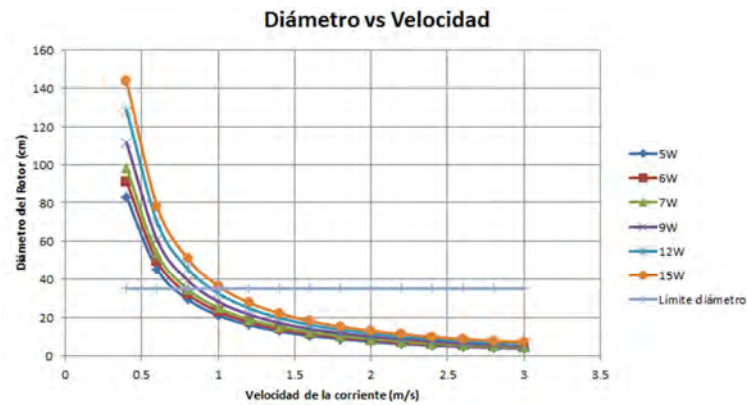


Figura 4.1 - Diámetro vs velocidad para distintas potencias

Además, para  $R = 16.2 \text{ mm}$  y  $\lambda = 4.5$ , se obtiene la siguiente tabla:

Tabla 4.2 - Velocidad de giro del eje de la turbina en función de la velocidad de la corriente.

v corriente (m/s)	$\omega$ (rad/s)	n (rpm)
0.4	11.0519284	105.538143
0.6	16.5778927	158.307214
0.8	22.1038569	211.076285
1	27.6298211	263.845356
1.2	33.1557853	316.614428
1.4	38.6817496	369.383499
1.6	44.2077138	422.15257
1.8	49.733678	474.921642
2	55.2596422	527.690713
2.2	60.7856065	580.459784
2.4	66.3115707	633.228855
2.6	71.8375349	685.997927
2.8	77.3634991	738.766998
3	82.8894633	791.536069

Se elegirá una turbina que opere a condiciones similares a las calculadas. La seleccionada es la turbina W01 SP 24 del catálogo de Ampair. Además, el fabricante muestra en una gráfica la relación entre RPM y la potencia. Se tiene que para 12W, la turbina gira a 250RPM.

Valores reales (Turbina Ampair):

- Diámetro = 312 mm
- Potencia ( $v=1\text{m/s}$ ) = 12W
- Peso= 3 kg
- Velocidad de giro= 250 RPM
- Índice de celeridad (TSR)=4



Figura 4.2. - Propeller W01 SP 24 - Ampair

## 4.1.2 - CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE POTENCIA DEL PROPELLER

Las turbinas tripala tienen un coeficiente de potencia ( $C_p$ ), el cual indica el porcentaje de potencia que puede absorber del fluido. El rango de  $C_p$  que tienen los equipos generadores comerciales va desde un 38% hasta un 42%. El coeficiente estimado de potencia del propeller W01 SP 24 es de 37.3%. (Ver Anexo G). Mediante el cálculo realizado se determinó lo siguiente:

-La potencia máxima que puede absorber una turbina tripala es del 45%. Sin embargo, si una turbina tiene ese coeficiente de potencia estará sometida constantemente a mayores cargas, por lo tanto, su tiempo de vida útil será menor.

## 4.2 - ANÁLISIS DE RESISTENCIA DE MATERIALES

En este subcapítulo se presentarán los resultados de los elementos del sistema. Es de vital importancia realizar un análisis adecuado ya que de ello depende el correcto funcionamiento de la máquina. (Ver anexo H)

### 4.2.1 - ANÁLISIS DEL DIÁMETRO DEL EJE

Este análisis es importante ya que el eje se encargará de unir las piezas principales del sistema (turbina y generador). El eje transmite el momento torsor generado por la turbina. Además, el eje está sujetado mediante dos rodamientos de bolas.

Los resultados obtenidos indican que el diámetro mínimo debe ser de 7mm, teniendo como factor de seguridad 2.7. El eje tiene dos secciones con diámetro distinto. La parte que va sujeta a la turbina tiene 15mm y la restante tiene 20mm. El material del eje es acero inoxidable ASTM A276.

También se realizó el análisis de deflexión, el cual mostró que el eje sufre una deformación mínima, en el rango de las micras. La sección con mayor deflexión es la que se encuentra en contacto con el peso de la turbina.



**Figura 4.3** - Eje del sistema

#### 4.2.2 - ANÁLISIS DE LA CARCAZA

La carcasa servirá para proteger a los componentes tales como el generador, rodamientos y demás elementos. Se eligió como material al ABS debido a su alta resistencia e impermeabilidad en ambientes acuáticos. La carcasa fue analizada mediante elementos finitos ante los esfuerzos generados por los elementos que soporta: uno de los dos rodamientos y el sistema de sujeción. Los resultados del análisis mostraron que la construcción tiene un factor de seguridad de 15 y una deformación total de  $2.4598 \times 10^{-6}$  m, por lo tanto, no fallará antes las cargas a la que está sometida.

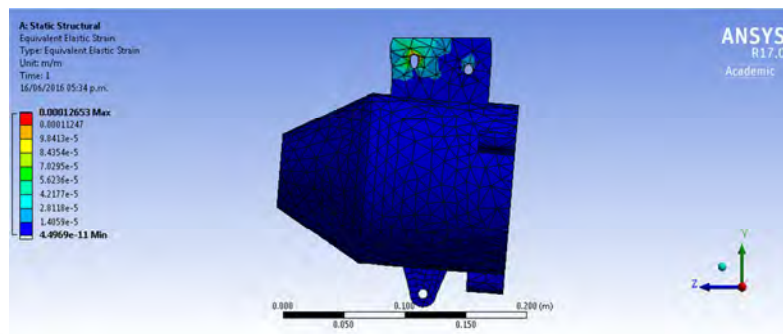


Figura 4.4. - Análisis de deformación del soporte de la carcasa

#### 4.2.3 - ANÁLISIS DEL DISCO

El disco empleado sirve para alojar a uno de los dos rodamientos que sostienen al eje. El material elegido es fundición gris debido su resistencia y fácil mecanización. El análisis realizado arrojó que este elemento tiene 2 de factor de seguridad, lo cual indica que es adecuado para el sistema.

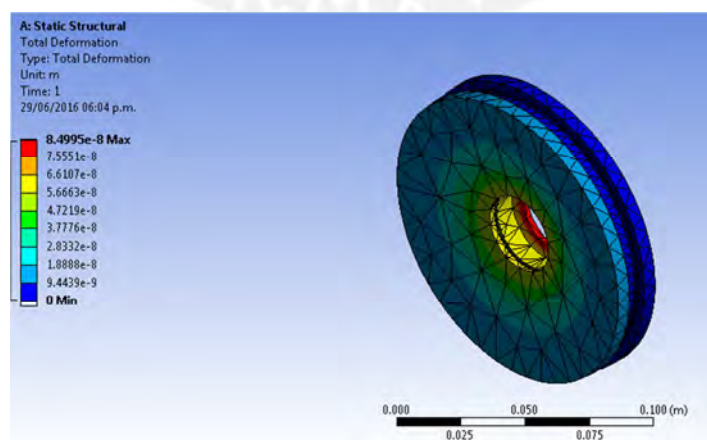
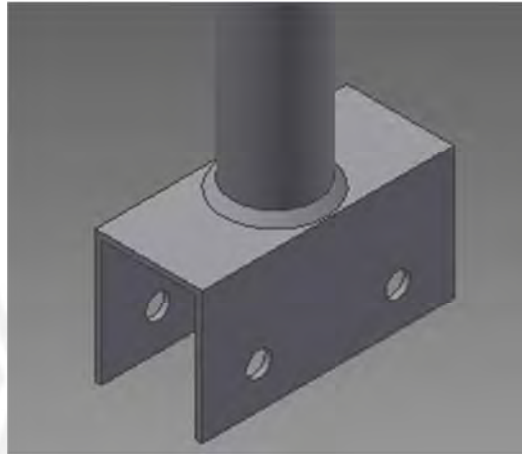


Figura 4.5. - Análisis del disco

#### 4.2.4 - ANÁLISIS DEL SOPORTE DEL SISTEMA

El soporte del sistema está compuesto de una plancha de 2mm de espesor y un tubo, ambos de acero inoxidable 304. El elemento de unión entre estos componentes de un cordón de soldadura de 3mm de espesor, el mínimo recomendado según las normas ASME B31.3, ASME II y ASME IX. El factor de seguridad obtenido indica que el sistema no va fallar.

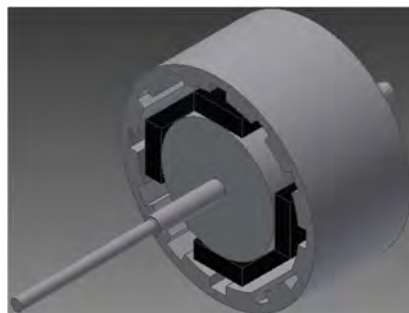


**Figura 4.6.** - Soporte del sistema

### 4.3 - CÁLCULOS ELÉCTRICOS

#### 4.3.1 - DISEÑO GENERADOR DE IMANES PERMANENTES

En base a lo descrito anteriormente, en el concepto de solución óptimo se estableció que se debe diseñar un generador de imanes permanentes debido a que no fue posible encontrar uno comercial que pueda cumplir con los requerimientos de diseño. Este tipo de generador, a diferencia del resto, puede operar bajo el agua, no requiere de fuente de excitación y no necesita de mantenimiento especializado.



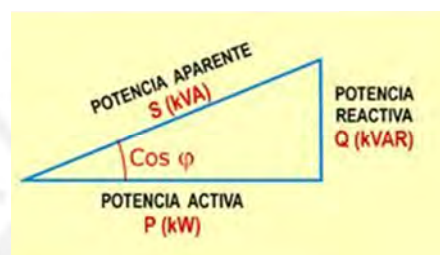
**Figura 4.7** - Generador de imanes permanentes monofásico

A continuación se describen los pasos seguidos para el diseño del generador de imanes permanentes:

- 1) El generador de imanes permanentes a diseñar debe generar 12W. Para ello debe analizar la potencia activa, reactiva y aparente que tienen los generadores de imanes permanentes. En este tipo de generadores, el factor de potencia es un parámetro importante, ya que muestra la relación entre la potencia activa y la aparente.
  - Factor de potencia en generadores de imanes permanentes ( $F_p$ ): 0.85

$$F_p = \frac{\text{Potencia Activa}}{\text{Potencia Aparente}}$$

Por lo tanto, reemplazando para 12W de potencia activa, se requiere una potencia aparente de 14.11VA.



**Figura 4.8** - Triángulo de potencias

- 2) Para el dimensionamiento del generador se utilizarán medidas que son recomendadas para uniones eje-cubo para el rotor. Se utilizará un rotor (cubo) de 40mm de diámetro y 30mm ancho. Para el estator se utilizará un diámetro de 100mm e igual ancho que el rotor.

-Las dimensiones del generador serán de 100mm de diámetro por 30mm de espesor.

- 3) En esta parte se calculará la frecuencia eléctrica del rotor y el número de espiras del estator.
  - Para calcular la frecuencia, se utilizará la siguiente ecuación:

$$f = \frac{n_m * P}{120}$$

El sistema debe tener el menor número de polos para que el generador tenga el menor tamaño posible. Por lo tanto, se diseñará el generador con 4 polos. Además, se sabe que la velocidad de giro es de 250RPM. Reemplazando, se obtiene una frecuencia de 8.33Hz.

- Para calcular el número de vueltas del bobinado se empleará la siguiente fórmula:

$$E_A = \sqrt{2} * \pi * N_c * \phi * f$$

Se desea obtener una tensión de 10V, teniendo en cuenta que luego habrá una caída de tensiones debido a los diodos rectificadores.



Tabla 4.3 - Cálculo de vueltas del bobinado

Medidas (mm)			Medidas (m)			Area (m <sup>2</sup> )	Densidad de flujo (T)	Flujo (Wb)	Nc
largo	ancho	espesor	largo	ancho	espesor	S	B	Φ	# vueltas
25.4	6.35	4.74	0.0254	0.00635	0.00474	0.00016129	0.7	0.0001129	2393.23115
15	13	4	0.015	0.013	0.004	0.000195	0.7	0.0001365	1979.50898
38.1	9.5	6.35	0.0381	0.0095	0.00635	0.00036195	0.7	0.00025337	1066.45739
28	18	3	0.028	0.018	0.003	0.000504	0.7	0.0003528	765.881451
40	25	5	0.04	0.025	0.005	0.001	0.7	0.0007	386.004251
30	30	10	0.03	0.03	0.01	0.0009	0.7	0.00063	428.893613

Se analizaron diversas dimensiones de magnetos de ferrita (remanencia magnética de 0.7T) para ver cuál requiere menor cantidad de vueltas en el embobinado. Los resultados mostraron que un imán de dimensiones 30mmx30mmx10mm, para una tensión de 10V, requiere 429 vueltas. Este número de vueltas debe ser distribuido en todo el estator. Se utilizarán 6 bobinados, con 12 bornes en total. En cada bobinado se tendrían 72 vueltas ( $429/6=72$ ). La imagen a continuación muestra la ubicación de las bobinas alrededor del estator.

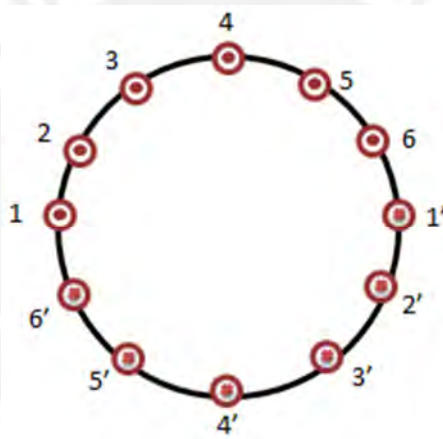


Figura 4.9 - Distribución de bobinas en el estator

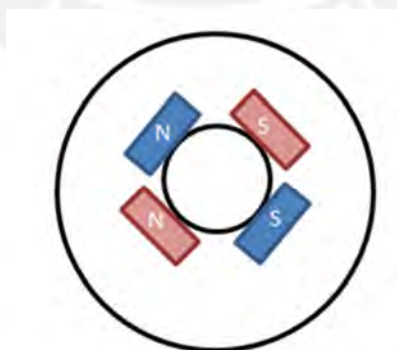


Figura 4.10 - Distribución de imanes en el rotor

- 4) Dado que la tensión inducida en el estator es de 10V, la tensión en cada bobina será:

$$V_{bobina} = \frac{10V}{6} = 1.66V$$

En otras palabras, la suma de tensiones en cada bobina es la tensión total generada en el estator.

En resumen, el generador de imanes permanentes diseñado tiene las siguientes características (ver anexo D):

**Tabla 4.4 - Características del generador de imanes permanentes monofásico**

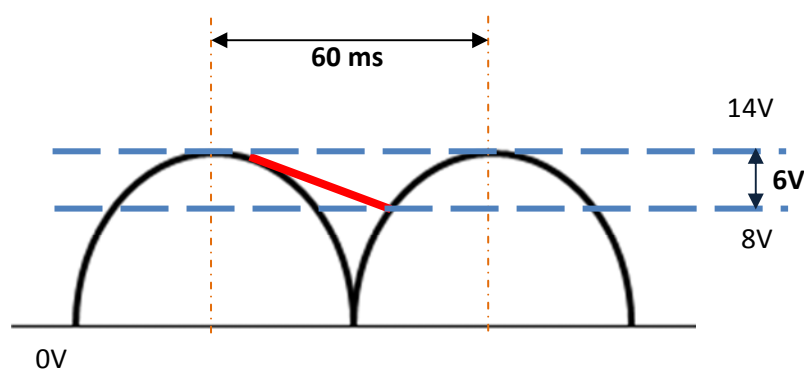
Generador de imanes permanentes 12W	
Proveedor	Fabricación particular
Potencia nominal	12W
Velocidad nominal	250MRP
Tensión nominal	10VDC
Corriente nominal	1.2 A
Eficiencia	85%
Fases	Monofásico
Número de Polos	4
Peso	1kg
Diámetro del generador	100mm
Ancho del generador	30mm

### 4.3.2 - DISEÑO DE CIRCUITO RECTIFICADOR Y REGULADOR DE TENSIÓN

Para energizar adecuadamente los dispositivos USB, debemos obtener una fuente regulada a 5V y 2A. Como primer paso se diseñó un circuito rectificador, el cual permite transformar corriente alterna en continua. De los cálculos se obtuvo que el voltaje de rizado era de 6V. A continuación se muestra el procedimiento realizado para obtener dicha tensión.

- **Rectificación de corriente alterna**

La onda sinusoidal generada por el generador tiene un voltaje pico de 14V y tensión eficaz de 10V. En conducción, los diodos consumen 2V, teniendo como tensión final 8V. Por lo tanto, se debe seleccionar un condensador que permita proveer un voltaje continuo de 8V y un rizado máximo de 6V.

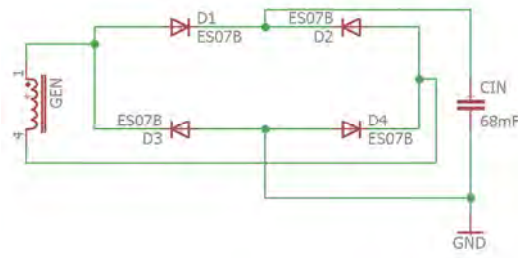


**Figura 4.11 - Análisis del rizado**

Cálculo de voltaje de rizado:

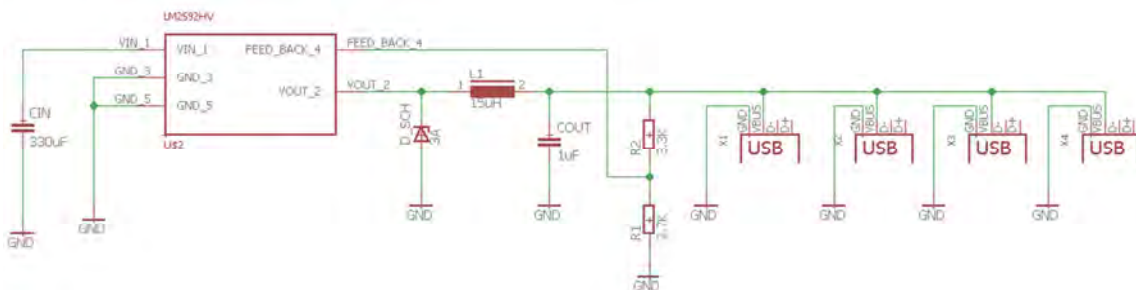
$$V_r = \frac{I}{f * C}$$

La frecuencia de la onda sinusoidal es de 8,33Hz y la corriente es de 1.2A. Reemplazando 6V como tensión de rizado en la ecuación mostrada, se debe buscar un condensador de capacidad mínima de 24mF. En el catálogo de DIGIKEY se halló un condensador electrolítico de 68mF que cumple con los requerimientos mencionados.



**Figura 4.12** - Circuito esquemático rectificador

La tensión de entrada al circuito rectificador es de 10V y considerando que los diodos consumen 2V en conducción, como tensión de salida de tendría 8V. Para regular esta tensión a 5V, se utilizó una fuente switching tipo Step Down y como regulador al LM2592, lo cual permite obtener 5V y 2A. Se descartó el uso de la fuente lineal porque disipa mucha potencia. Finalmente, se utilizan cuatro salidas tipo USB2.0 para la carga de dispositivos electrónicos.



**Figura 4.13** - Fuente switching Step-Down

**Tabla 4.5** - Cálculo de componentes para el diseño de la fuente switching

Componente	Capacidad
R1	1KΩ
R2	3.3KΩ
L	15uH, 3A
Diodo Schottky	3A
Cout	1uF
Cin	68mF

Cabe mencionar que la fuente switching diseñada puede operar para rangos de tensión de entrada entre 7V y 9V, por lo tanto, considerando que los diodos consuman 2V, la tensión del generador inducida estaría entre 9V y 11V. Utilizando la siguiente ecuación:

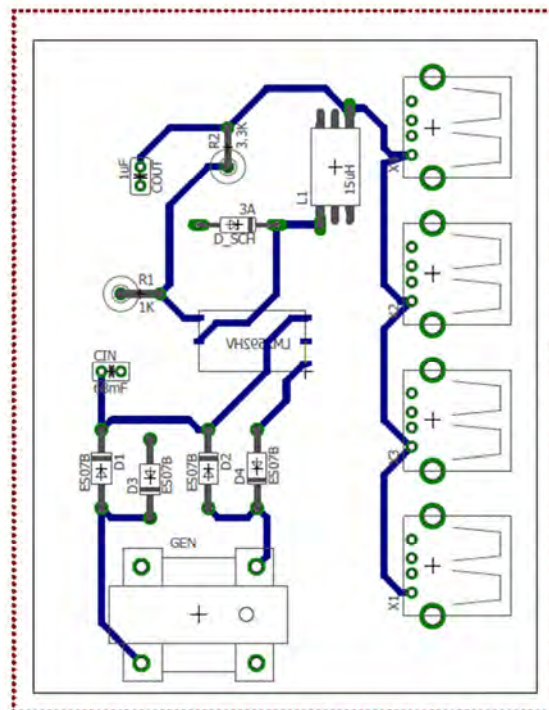
$$E_A = K * \Phi * \omega$$

Del anexo I se obtiene que  $K*\Phi=0.382$ . Reemplazando las tensiones de 9V y 11V, se hallan los siguientes valores:

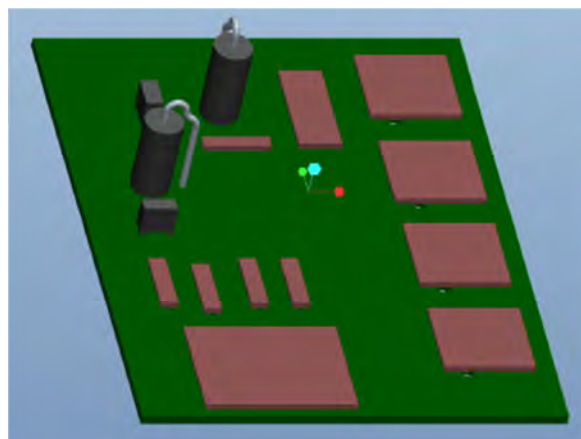
**Tabla 4.6.-** Valores de velocidad máxima y mínima del río

Tensión switching (V)	Ea (V)	RPM	$\omega$ (rad/s)	Vrío (m/s)
9	11	275	28.79	1.12
8	10	250	26.18	1
7	9	225	23.56	0.91

Por lo tanto, se puede concluir que el sistema puede ofrecer los requerimientos establecidos cuando la velocidad del fluido oscila entre 0.91 y 1.12 m/s.



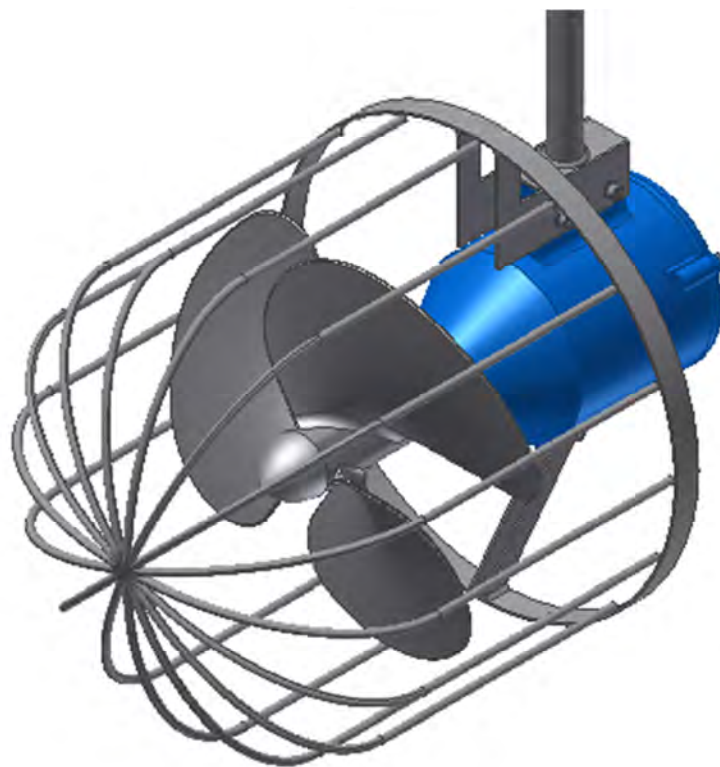
**Figura 4.14.-** Circuitos rectificador y regulador impresos



**Figura 4.15.-** Tarjeta PCB simulada en 3D

Existen sistemas generadores de mayor tamaño que pueden brindar mayor energía y requieren el uso de sistemas de control que permitan que el sistema opere a determinadas condiciones de diseño. Sin embargo, para este caso, dado que la energía generada es pequeña, no se diseñará un sistema de control para la solución propuesta.

Una vez realizados los cálculos de los componentes principales, se realizó el ensamble del sistema. A continuación se muestra una vista isométrica de la solución propuesta. Cabe resaltar que los circuitos rectificador y regulador de tensión no estarán dentro del sistema, sino que serán componentes externos.



**Figura 4.16.** - Vista isométrica del sistema propuesto

## CAPÍTULO 5.- ESTIMADO DE COSTOS

El costo de construir el sistema diseñado es el siguiente: (Ver anexo L)

**Tabla 5.1 - Costo de materiales**

Producto	Precio Total (S/)	Producto	Precio Total (S/)
Internal circlip INTO240	16.55	Capacitor 68mF 380.382LLX	19.00
Internal circlip INTO370	8.28	Diodo ES07B-GS18	1.69
Rodamiento 61802-2Z	26.48	LM2592HV	13.29
Rodamiento 61904-2RZ	33.80	Resistencia 1K	0.20
Retén HMSA 10RG 15x24x7	12.41	Resistencia 3.3K	0.20
Carcasa ABS PLUS-P430	1622.63	Inductor SDR1005-150MLTR-ND	1.06
Propeller	1151.88	Diodo Schottky 1N5820	1.39
Eje acero inoxidable 304 7/8"	231.50	Condensador 1uF 478-8234-2-ND	0.22
Generador imanes permanentes	1000.00	Puerto USB ED2989-ND	6.36
PLANCHA DE ACERO	198.60		43.41
Pasacables MGS-20	3.21		
Tubo soporte pasacables 3/4' acero inoxidable	13.90		
Plancha acero inoxidable 2mm	429.17		
Perno de acero inoxidable M6x50	6.39		
Arandela inoxidable A 6.4	0.00		
Perno de acero inoxidable M6x25	4.26		
Arandela inoxidable A 8.4	4.49		
Chaveta DIN-6885-A 6x6x10	0.00		
Clavija 3x20 KP300	6.62		
Tornillo Allen avellanado M5x16	0.00		
Alambres 1/4"	48.00		
	<b>4818.17</b>		

Por lo tanto, el precio total del sistema es de S/ 4861.58.

## CONCLUSIONES

Se logró diseñar un sistema capaz de generar 10W de potencia para la carga de dispositivos eléctricos con puerto USB2.0.

El sistema propuesto puede ser capaz de operar a cualquier hora del día de acuerdo al fabricante del propeller, lo cual representa una ventaja en relación al resto de formas de generación de energía renovables.

Para velocidades de corriente de agua mayores a 1m/s, se requiere de un diámetro mucho menor para generar la misma potencia dado que la relación entre esta velocidad y el diámetro del rotor es inversamente cúbica.

Se podría aumentar el rango de generación de energía eléctrica usando un generador de mayor capacidad. Para ello, se podría reemplazar los imanes de magnetos de ferrita por otro con mayor remanencia magnética, como el neodimio.

Dado que los elementos principales mecánicos no están sometidos a grandes esfuerzos mecánicos (FS: 15), tienen un largo tiempo de vida útil estimado de 4 a 5 años.

La eficiencia total del sistema es del 31.38%. Estos coeficientes son: el coeficiente de la turbina, el coeficiente de transmisión de potencia y el coeficiente del generador. Se podría aumentar la eficiencia del sistema diseñando un propeller con perfil aerodinámico que permita una mayor absorción de energía.

## RECOMENDACIONES

Dado que este trabajo sólo se ha establecido el funcionamiento del sistema para un punto de operación de 1m/s de velocidad del caudal de un canal, se debería anexar una etapa que permita obtener energía eléctrica para un mayor rango de velocidades.

El sistema construido debe ser usado para las condiciones de operación descritas, a una velocidad del fluido de 0.91 a 1.12 m/s. En caso de que no se cumpla esta recomendación, no se garantiza que el sistema funcione correctamente. Para ello, es necesario conocer si el río se encuentra en vaciante o en creciente, ya que de ello depende la velocidad a la que el caudal se desplaza.

Se debe hacer un estudio posterior acerca de los materiales que componen el sistema con la finalidad de hacerlo más ligero, y por lo tanto, facilitar su transportabilidad.

Si bien es cierto que el generador diseñado puede operar a cualquier hora del día, se recomienda no usarlo por más de 8 horas seguidas dado que ello contribuiría a disminuir el tiempo de vida útil de la turbina (elemento principal), de acuerdo al dato del fabricante. El resto de componentes mecánicos, analizados mediante simulación, están diseñados para operar a las condiciones requeridas de forma óptima.

Dado que el sistema está orientado para su uso en zonas rurales, se debe montar un sistema de sujeción en la zona donde se va a implementar. No se ha realizado dicho sistema dado que este puede variar dependiendo de las condiciones del lugar. El sistema de sujeción se puede realizar incluso con madera.



## CRÉDITOS DE FIGURAS

Figura 1.1 extraída de [http://dger.minem.gob.pe/ArchivosDger/PNER\\_2016-2025/F2-PNER-Graf-2016-25.pdf](http://dger.minem.gob.pe/ArchivosDger/PNER_2016-2025/F2-PNER-Graf-2016-25.pdf)

Figura 2.1 extraída de <https://tecnologiaschile.com/2014/04/04/las-turbinas-de-agua/>

Figura 2.2 extraída de <http://academica-e.unavarra.es/handle/2454/3165?show=full>

Figura 2.3 realizada por el autor.

Figura 2.4 extraída de <http://repositorio.pucp.edu.pe/index/handle/123456789/45801>

Figura 2.5 extraída de <http://repositorio.pucp.edu.pe/index/handle/123456789/45801>

Figura 2.6 extraída de <http://repositorio.pucp.edu.pe/index/handle/123456789/45801>

Figura 2.7 extraída de

[http://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/123456789/2058/IME\\_168.pdf?sequence=1](http://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/123456789/2058/IME_168.pdf?sequence=1)

Figura 2.8 extraída de

[http://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/123456789/2058/IME\\_168.pdf?sequence=1](http://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/123456789/2058/IME_168.pdf?sequence=1)

Figura 2.9 extraída de

[http://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/123456789/2058/IME\\_168.pdf?sequence=1](http://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/123456789/2058/IME_168.pdf?sequence=1)

Figura 2.10 extraída de <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/pber.html>

Figura 2.11 extraída de “Wind turbines: fundamentals, technologies, application, economics, Erich Hau”.

Figura 2.12 extraída de

[http://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/123456789/2058/IME\\_168.pdf?sequence=1](http://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/123456789/2058/IME_168.pdf?sequence=1)

Figura 2.13 extraída de

[http://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/123456789/2058/IME\\_168.pdf?sequence=1](http://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/123456789/2058/IME_168.pdf?sequence=1)

Figura 2.14 extraída de “Wind energy explained: theory, design and application, Manwell, J.F.”.

Figura 2.15 extraída de

[http://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/123456789/2058/IME\\_168.pdf?sequence=1](http://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/123456789/2058/IME_168.pdf?sequence=1)

Figura 2.16 extraída de <http://academica-e.unavarra.es/handle/2454/3165?show=full>

Figura 2.17 extraída de <http://academica-e.unavarra.es/handle/2454/3165?show=full>

Figura 2.18 extraída de <http://powereolic.blogspot.pe/2010/05/generacion-de-conceptos.html>

Figura 2.19 extraída de [http://repositorio.uchile.cl/tesis/uchile/2007/baillarie\\_p/sources/baillarie\\_p.pdf](http://repositorio.uchile.cl/tesis/uchile/2007/baillarie_p/sources/baillarie_p.pdf)

Figura 2.20 extraída de <http://www.taringa.net/post/hazlo-tu-mismo/11113546/Reparar-conector-de-control-XBOX-360.html>

Figura 2.21 extraída de <http://phys.org/news/2013-11-hydrobee-rivers-faucets-power-video.html>

Figura 2.22 extraída de <http://phys.org/news/2013-11-hydrobee-rivers-faucets-power-video.html>

Figura 2.23 extraída de <http://whyzat.com/charging-a-mobile-phone-with-water/>

Figura 2.24 extraída de <http://whyzat.com/charging-a-mobile-phone-with-water/>

Figura 2.25 extraída de <http://www.alluvialpacific.com/products.asp?TheAction=VIEWALL>

Figura 2.26 extraída de <http://www.seamap.com/products/ampair/ampair-uw100/>

Figura 3.1 realizada por el autor.

Figura 3.2 realizada por el autor.

Figura 3.3 realizada por el autor.

Figura 3.4 realizada por el autor.

Figura 3.5 realizada por el autor.

Figura 4.1 realizada por el autor.

Figura 4.2 extraída de

[http://marinewarehouse.net/images/ampair/Ampair%20Catalogue%20Web%20\(2010\).pdf](http://marinewarehouse.net/images/ampair/Ampair%20Catalogue%20Web%20(2010).pdf)

Figura 4.3 realizada por el autor.

Figura 4.4 realizada por el autor.

Figura 4.5 realizada por el autor.

Figura 4.6 realizada por el autor.

Figura 4.7 realizada por el autor.

Figura 4.8 extraída de <http://www.afinidadelectrica.com/html/Image/Factor%20de%20potencia%20-%20Triangulo%20de%20potencias%206%20y%20formula.JPG>

Figura 4.9 realizada por el autor.

Figura 4.10 realizada por el autor.

Figura 4.11 realizada por el autor.

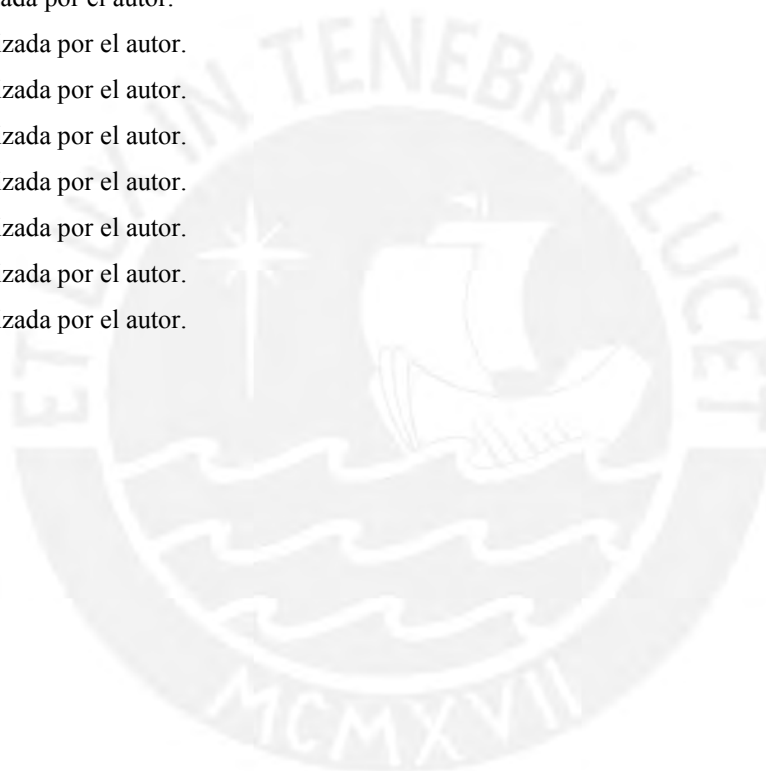
Figura 4.12 realizada por el autor.

Figura 4.13 realizada por el autor.

Figura 4.14 realizada por el autor.

Figura 4.15 realizada por el autor.

Figura 4.16 realizada por el autor.



## CRÉDITOS DE TABLAS

Tabla 1.1 extraída de <http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/2ResEje-2014-2025%20Vf.pdf>

Tabla 2.1 extraída de <http://repositorio.pucp.edu.pe/index/handle/123456789/45801>

Tabla 2.2 realizada por el autor.

Tabla 2.3 extraída de

[http://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/123456789/2058/IME\\_168.pdf?sequence=1](http://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/123456789/2058/IME_168.pdf?sequence=1)

Tabla 2.4 realizada por el autor.

Tabla 2.5 extraída [http://www.informaticamoderna.com/El\\_puerto\\_USB.htm](http://www.informaticamoderna.com/El_puerto_USB.htm)

Tabla 2.6 realizada por el autor.

Tabla 2.7 extraída de <http://hydrobee.com/products/>

Tabla 2.8 extraída de <http://blue-freedom.net/es/producto/>

Tabla 2.9 extraída de <http://www.alluvialpacific.com/products.asp?TheAction=VIEWALL>

Tabla 2.10 extraída de <http://www.seamap.com/products/ampair/ampair-uw100/>

Tabla 3.1 realizada por el autor.

Tabla 3.2 realizada por el autor.

Tabla 4.1 realizada por el autor.

Tabla 4.2 realizada por el autor.

Tabla 4.3 realizada por el autor.

Tabla 4.4 realizada por el autor.

Tabla 4.5 realizada por el autor.

Tabla 4.6 realizada por el autor.

Tabla 5.1 realizada por el autor.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Ministerio de Energía y Minas (2014). "Resumen ejecutivo. Plan energético nacional 2014- 2025".  
<http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/2ResEje-2014-2025%20Vf.pdf>
- [2] Pilar Miranda y Luis Marroyo (2011). "Diseño y desarrollo de una turbina hidroeléctrica flotante para generar energía eléctrica en comunidades de la cuenca amazónica boliviana". Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación.
- [3] Ministerio de Energía y Minas (2015). "Plan nacional de electrificación rural. Periodo 2016 - 2025".  
[http://dger.minem.gob.pe/ArchivosDger/PNER\\_2016-2025/F2-PNER-Graf-2016-25.pdf](http://dger.minem.gob.pe/ArchivosDger/PNER_2016-2025/F2-PNER-Graf-2016-25.pdf)
- [4] Renzo Capanni (2007). "Diseño de un grupo Hidroeléctrico de 8 a 20 KW". Pontificia Universidad Católica del Perú. Facultad de Ciencias e Ingeniería.
- [5] Piero Pérez (2011). "Grupo de generación Kaplan tubular para 3.0 Kw de capacidad". Pontificia Universidad Católica del Perú. Facultad de Ciencias e Ingeniería.
- [6] Luis Heredia (2009). "Construcción y ensayo de una rueda hidráulica de corriente libre de 2m de diámetro". Pontificia Universidad Católica del Perú. Facultad de Ciencias e Ingeniería.
- [7] Carlos Portocarrero (2012). "Diseño de una turbina propeller utilizando plásticos reciclados reforzados con madera recuperada". Pontificia Universidad Católica del Perú. Facultad de Ciencias e Ingeniería.
- [8] Víctor Peña-García. "Diseño de una turbina hidro-cinética para aprovechamiento energético de ríos no caudalosos". Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería.
- [9] Luis García y Antonio Cuba (2001). "Diseño de un aerogenerador de 100 W basado en un generador de imanes permanentes y utilizando tecnología apropiada para el Perú". Pontificia Universidad Católica del Perú. Facultad de Ciencias e Ingeniería.
- [10] Hydrobee.  
<http://hydrobee.com/products/>
- [11] Blue Freedom: Charging a mobile phone with water.  
<http://whyzat.com/charging-a-mobile-phone-with-water/>
- [12] Portátil Hydro Power Generador De Agua De Turbina.  
<http://www.ebay.com/itm/Portable-Hydro-Power-Generator-water-turbine-14V-DC-3kg-/391017491503?roken=cUgayN>

[13] Ampair UW100

<http://www.seamap.com/products/ampair/ampair-uw100/>

[14] Diego Romero (2015). “Diseño de un sistema de monitoreo de parámetros eléctricos basado en tecnología GMS para un riogenerador PUCP”. Pontificia Universidad Católica del Perú. Facultad de Ciencias e Ingeniería.

