

DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE TURBINA HIDRÁULICA PARA
SECTORES RURALES ALEDAÑOS AL RÍO MAGDALENA

YAMIL DE JESÚS CASTRO MORALES

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL CARIBE
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECATRONICA
BARRANQUILLA
2019

DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE TURBINA HIDRÁULICA PARA
SECTORES RURALES ALEDAÑOS AL RÍO MAGDALENA

POR
YAMIL DE JESUS CASTRO MORALES

Proyecto de grado como requisito para optar al título de Ingeniero Mecatrónico

Ing. MSc. Saúl Pérez

Ing. MSc. Gian Pierre

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL CARIBE
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

BARRANQUILLA
2019

NOTA DE ACEPTACIÓN

Jurado No 1

Jurado No2

Barranquilla, Colombia.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por darme la oportunidad y la capacidad de entender y aplicar correctamente todo lo aprendido en la carrera, por ponerme a personas correctas en el momento correcto y por permitirme salir victorioso en situaciones de muchas adversidades.

A mi familia por ser ese apoyo incondicional y sincero con el objetivo siempre de cumplir mis sueños, de darme lo mejor, brindándome todas las herramientas tanto físicas como emocionales, para poder así, desempeñarme con éxito en todo lo que fue este camino y a mi novia que ha estado para mí en toda esta travesía y que me ha dado las motivaciones necesarias para luchar y perseguir mis sueños.

CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN.....	13
1.INTRODUCCION.....	14
2.DESCRIPCIÓN Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	15
2.1 ANTECEDENTES.....	15
2.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	15
3 JUSTIFICACION Y ALCANCE.....	16
4. OBJETIVOS.....	17
4.1 Objetivo General.....	17
4.2 Objetivos Específicos.....	17
5. MARCO REFERENCIAL.....	18
5.1 Estado del arte.....	18
5.2. Marco teórico.....	44
5.2.1 Ley de betz aplicada a las turbinas hidrocínéticas.....	45
5.2.2 Canales abiertos del río Magdalena en el atlántico.....	49
5.2.3 Revisión de los sistemas hidrocínéticos de baja potencia.....	53
5.3.3.1 De eje perpendicular al flujo de agua.....	54
5.3.3.2. De eje paralelo al flujo de agua.....	55
6. PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO.....	58
6.1 Cálculo de la demanda energética.....	58
6.2 Disponibilidad energética del canal.....	60
6.3 Análisis de las tecnologías.....	62
6.3.1 Turbina Darrieus.....	62
6.3.1 Turbina Gorlov.....	64
6.4 Cálculo de parámetros adimensionales de la turbina.....	64
6.5. Modelación de la turbina.....	72
6.5.1 Análisis en Ansys.....	72
6.5.1.1 Independencia de mallado.....	72

7. PRESUPUESTOS	76
8. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES.....	77
9. IMPLEMENTACION DE LA TURBINA.....	81
9.1 Fabricación de la turbina en 3D.....	81
9.2 Integración del sistema electromecánico generador de energía con carcasa y componentes mecánicos.....	82
9.3 Construcción circuito regulador de fuente de voltaje.....	86
9.4 Montaje de la turbina en el laboratorio.....	87
10. RESULTADOS.....	88
10.1 Resultados simulación modelo 1.....	88
10.2 Resultados simulación modelo 2.....	90
10.3 Resultados experimentales en el laboratorio.....	91
10.4 Análisis usando el teorema PI.....	101
11. CONCLUSIONES.....	104
12. RECOMENDACIONES.....	106
13. BIBLIOGRAFIA.....	107

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1, Fotografía de la turbina Darrieus elaborada con resina epoxi y bronce.....	19
Figura 2, Comparación entre curvas de potencia vs. r.p.m. para dos tipos de rotores de seis alabes.....	20
Figura 3a, Perspectiva del despiece de la turbina.....	21
Figura 3b, Diagrama colinar rendimiento de la transformación energética altura..	21
Figura 4, Gráfico de la Potencia vs. Velocidad de río.....	22
Figura 5, Montaje de la turbina en el río.....	22
Figura 6, Resultados de pruebas sin carga testeados a 0,8 m / s.....	24
Figura 7, Diseño CAD turbina final.....	24
Figura 8, Fabricación de alabe con errores.....	25
Figura 9, diseño turbina Darrieus para el proyecto melinka.....	25
Figura 10, Potencia generada durante el día con apoyo de baterías	25
Figura 11a, Diagrama de momento flector – Solid Works.....	27
Figura 11b Tensiones en el álabe - Solid Works.....	27
Figura 11c, Desplazamientos del álabe - Solid Works.....	27
Figura 12a, CAD turbina Gorlov	28
Figura 12b, Turbina fabricada.....	28
Figura 13, Resultados de potencia vs velocidad angular.....	29
Figura 14, Diseño CAD turbina Gorlov de 30°,90° y 120°.....	29
Figura 15, Modelos impresos antes de ser lijados.....	30
Figura 16, Lugar de pruebas aguas arriba (izquierda) y aguas abajo (derecha)...	30
Figura 16a, Resultados de turbina a 30° velocidad de caudal vs RPM	30
Figura 16b, Resultados de turbina a 90° velocidad de caudal vs RPM.....	31
Figura 16c, Resultados de turbina a 120° velocidad de caudal vs RPM.....	31
Figura 17, CAD acoplamiento de la turbina con el módulo de instrumentación.....	33
Figura 18, CAD banco de ensayos para turbina hidrocínética.....	33
Figura 19, Turbina con las dimensiones propuestas 2,5 m x 2,5 m x 2,5 m.....	34
Figura 20, Resultados de rendimiento de diferentes perfiles naca.....	34
Figura 21, se muestra el cad de la turbina Savonius acoplada a lo que sería un sistema de poleas para transmitir el movimiento hacía el generador eléctrico.....	35
Figura 22a, Turbina importada ANSYS.....	36
Figura 22b, Turbina con líneas de flujo.....	36

Figura 23a, Turbina solidworks.....	37
Figura 23b, volumen de control y turbina implementado en Ansys.....	38
Figura 23c, turbina final en PLA.....	38
Figura 24, Diseño del rotor.....	39
Figura 25a, Desempeño en función del coeficiente de potencia perfil NACA 0018.....	39
Figura 25b, Desempeño en función del coeficiente de potencia perfil NACA 0018.....	40
Figura 25c, imagen renderizada del modelo	40
Figura 25d, Coeficiente de potencia vs TSR	40
Figura 26a, Alabes y eje de acople (izq.), balsa flotante con alabes acoplados (der).....	41
Figura 26b, Coeficiente de Sustentación (Cl) en función del Coeficiente de Fricción (Cd) (izq.)	42
Figura 27a, Izquierda: Geometrías estudiadas; Derecha: Perfil seleccionado de la turbina hidrocínética... ..	43
Figura 27b, Izquierda: mallas del cuerpo de la turbina; Derecha: vista de la malla rotante	43
Figura 27c, Izquierda: Potencia generada durante una vuelta en función del tiempo; Derecha: Drag sobre la turbina completa durante una vuelta en función del tiempo.....	43
Figura 28, Análisis de flujo de un aerogenerador	45
Figura 29, Comparación entre las energías hidráulica convencional e hidrocínética.....	48
Figura 30. Tipos de turbina de acuerdo al tipo de rotor.....	48
Figura 31, Visita sector de Ponedera, Atlántico.	50
Figura 32, Visita sector de Guáimaro, Magdalena.	51
Figura 33, Vista aérea de arroyo grande..	51
Figura 34, Visita al canal del Dique.	52
Figura 35, Zona de ubicación de la turbina hidrocínética.	53
Figura 36, Esquema de un sistema hidrocínético de baja potencia.	54
Figura 37, Turbinas de eje perpendicular al flujo de agua.	54
Figura 38, Turbinas de eje paralelo al flujo de agua.	55
Figura 39, Turbina Gorlov Equipo 2FAE	56
Figura 40, Turbina Savonius Zubialde García	56
Figura 41, Turbina de eje horizontal Evirogen 005.....	56
Figura 42, Turbina Darrieus Chile.....	57
Figura 39, Río Magdalena (sector Guáimaro-Ponedera).....	60
Figura 40, Corte transversal esquemático del río.....	61

Figura 41, Esquema de los álabes rectos de una turbina Darrieus.....	62
Figura 42, Torques a diferentes velocidades y ángulos de inclinación de los álabes	63
Figura 43, Turbina Darrieus en forma horizontal debajo de la superficie del agua.....	63
Figura 44, Esquema de los álabes helicoidales de una turbina Gorlov.....	63
Figura 45, Distribución del área efectiva de la turbina.....	65
Figura 46, TSR vs ω en turbina Gorlov.....	66
Figura 47, Potencia versus velocidad de rotación para varias velocidades del fluido.	67
Figura 48, Potencia versus velocidad de rotación para varias velocidades del fluido.	67
Figura 49, Perfil NACA 0020.....	68
Figura 49, Perfiles NACA en la turbina.....	69
Figura 51, Ángulo helicoidal, relación entre altura y la cuerda para una turbina Gorlov.....	70
Figura 52, Vista frontal y superior de la turbina.....	71
Figura 53, Punto escogido para el análisis.....	73
Figura 54, Esquemático del modelo 1 implementado en Ansys.....	74
Figura 55, Esquema del área de control y mallado de la turbina.....	74
Figura 56, Esquemático del modelo 2 implementado en Ansys.....	75
Figura 57, Esquema del mallado de la turbina.....	75
Figura 58, Álabes de turbina Gorlov y dimensiones implementadas.....	81
Figura 59, Alabes impresos en PLA y tapa maquinada en cnc.....	82
Figura 60 Vista de tuerca hexagonal 1".....	82
Figura 61, Eje roscado acoplado.....	83
Figura 62, Chumacera NTN UCF 205.....	83
Figura 63, Montaje turbina en carcasa de soporte.....	84
Figura 64, Vista CAD de soporte de turbina.....	84
Figura 65, Transmisión entre turbina y generador eléctrico.....	85
Figura 66, Sistema integrado de generación de energía.....	85
Figura 67, Regulador de voltaje con zener y transistor de paso.....	86
Figura 68, Montaje de circuito regulador en protoboard.....	87
Figura 69, Contorno de velocidades a 0,8 m/s de entrada del río.....	88
Figura 70, Contorno de velocidades a 1,0 m/s de entrada del río.....	89
Figura 71, Contorno de velocidades a 1,2 m/s de entrada del río.....	90

Figura 72, Zonas de mayor estrés de la turbina.....	90
Figura 73, Deformación en turbina (Material PLA)	91
Figura 74, Medición de voltaje en vacío a 1 m/s con un TSR de 1.13.....	91
Figura 75, TSR VS VOLTAJE A 0.8 M/S.....	92
Figura 76, TSR VS VOLTAJE A 1.0 M/S.....	92
Figura 77. TSR VS VOLTAJE A 1.2 M/S.....	95
Figura 78, Bombilla led 7 w.....	95
Figura 79, Toma de datos (voltaje y corriente)	96
Figura 80, CORRIENTE (A) VS VOLTAJE (V) A 1 M/S.....	97
Figura 81, CORRIENTE (A) VS VOLTAJE (V) A 0,8 M/S.....	99
Figura 82, CORRIENTE (A) VS VOLTAJE (V) A 1,2 M/S.....	100
Figura 83, Voltaje de salida generador Vs Salida de controlador de voltaje.....	101
Figura 84, Curva de potencia versus RPM del coeficiente π_1	103
Figura 85, Curvas de potencias: real y según parámetro P_i	103

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1, Valor comercial de las turbinas hidráulicas.....	18
Tabla 2, Parámetros de los modelos a escala propuestos para ser probados en el canal.....	24
Tabla 3, Parámetros de la turbina a construir.....	32
Tabla 4, Benchmarking turbinas hidrocínéticas.....	52
Tabla 5, Consumo promedio en viviendas rurales.....	59
Tabla 6, Rendimiento entre turbinas con diferentes números de álabes y velocidades.....	69
Tabla 7, Dimensiones de la turbina a implementar.....	70
Tabla 8, Valores de los diferentes tamaños de elementos y su error.....	73
Tabla 9 Información mallada para fluent.....	74
Tabla 10, Información del mallado para static structural.....	76
Tabla 11, Variación de TSR en velocidad de 0.8 m/s (Generador en vacío).....	92
Tabla 12, Variación de TSR en velocidad de 1.0 m/s (Generador en vacío).....	93
Tabla 13, Variación de TSR en velocidad de 1.2 m/s (Generador en vacío).....	94
Tabla 14, Variación de TSR en velocidad de 1.0 m/s (Generador con bombillas).....	96
Tabla 15, Variación de TSR en velocidad de 0.8 m/s (Generador con bombillas).....	98
Tabla 16, Variación de TSR en velocidad de 1.2 m/s (Generador con bombillas).....	99
Tabla 17, Voltaje de salida generador Vs salida controlador de voltaje.....	100
Tabla 18,. Velocidad angular y potencia para el coeficiente π_1	10

ECUACIONES

	Pág.
Ecuación 1, Sumatoria en x sección 1.....	46
Ecuación 2, Sumatoria en x sección 2.....	46
Ecuación 3, Fuerza de la hélice	46
Ecuación 4, Máxima generación de potencia.....	46
Ecuación 5, Potencia disponible en la hélice.....	46
Ecuación 6, Coeficiente de potencia máximo.....	46
Ecuación 7, Potencia que se puede obtener de un fluido.....	47
Ecuación 8, Potencia neta a producir.....	59
Ecuación 9, Número de Reynolds.....	61
Ecuación 10, Solidez de la turbina.....	62
Ecuación 11, TSR (TIP SPEED RATIO).....	65
Ecuación 12, Ángulo de inclinación de la turbina.....	69
Ecuación 13, Resistencia para diodo zener.....	86
Ecuación 14, Teorema Pi en función de las variables de la turbina.....	101
Ecuación 15, Parámetros adimensionales de la ecuación PI.....	102
Ecuación 16, Teorema con las dimensiones dadas.....	102

RESUMEN

En el presente trabajo, se encuentra el diseño, realización y validación en laboratorio de un prototipo de turbina hidráulica tipo Gorlov de 3 alabes, con el cual se buscó estudiar a fondo acerca de este tipo generadores, su elaboración, las variables que afectan su óptimo desempeño, su integración como un sistema de generación de energía permanente. Para que así, se implementara como un ejemplar de producción de energía limpia y sostenible para esos sectores rurales que se encuentran aledaños al río Magdalena, con el fin de beneficiar a quienes no cuentan con un suministro de energía eléctrica estable y seguro para sus viviendas, como también aquellos que no cuentan con la cobertura del servicio eléctrico.

El objetivo de esta investigación es desarrollar un prototipo de turbina hidráulica para su uso en sectores rurales aledaños al río Magdalena.

Para las consideraciones iniciales y el prediseño del sistema hidro-generador, fue necesaria la realización de varias visitas en sitio de algunos posibles lugares donde estaría funcionando el mecanismo final, se visitaron las siguientes localidades: Ponedera (Atlántico), Guáimaro (Magdalena), Canal del dique en San Cristóbal (Bolívar) y el sector de las flores en Barranquilla. Teniendo en el sector de Guáimaro, las velocidades de corriente más altas de entre (0,8 a 1,2) m/s, celeridades que eran necesarias para un buen desarrollo del proyecto a fin de obtener 16 Watts, ya que un flujo lento encarecería la construcción.

La turbina, fue impresa en 3D con material PLA (poliácido láctico), diseñada bajo herramienta CAD en Solidworks, con una altura de 35 cm y 22 cm de diámetro, se utilizó un perfil NACA 0020, ángulo de inclinación de 60°, solidez de (0,37), acoplada a un eje roscado de hierro galvanizado con una polea de aluminio de 35 cm, conectada con un generador de imanes permanentes para que posteriormente la parte saliente sea controlada por un circuito que ante una subida imprevista de la velocidad del río mantiene el voltaje de salida constante a 15 V.

1.INTRODUCCIÓN

En Colombia, familias sacan provecho de estar situados a laderas del río Magdalena, ya que este provee fuente de comida, ingresos económicos y recreación para los habitantes. No todo esto es ideal, puesto que, en algunas de estas zonas habitadas, viven con faltas en el servicio eléctrico, ya que la prestación no es estable y se presenta de manera muy poco segura, siendo que las personas que no tienen cobertura eléctrica, usan una serie de cableados artesanales para hacer llegar la energía a sus casas y que en otros casos muchos otros individuos no pueden unirse a la red artesanal porque se encuentran muy aislados, añadiendo de que ya el servicio eléctrico en la región caribe no es el mejor [1].

Para este proyecto, se propuso desarrollar un prototipo de turbina hidráulica para su uso en sectores rurales aledaños al río Magdalena, teniendo en cuenta que esta investigación tiene un enfoque exploratorio ya que no hay mucha literatura acerca de las turbinas de río y el tipo investigación será experimental puesto que con las pruebas en física que obtengamos mediante una serie mediciones, podremos recopilar información estadísticamente y dar conclusiones lógico-inductivas, para la misma, fue necesario primeramente realizar visitas a diferentes zonas del río, logrando así, diseñar una turbina del tipo Gorlov o Helicoidal de 3 alabes mediante Solidworks y que además cuenta con capacidad de extraer 16 Watts de potencia neta del río, para la transformación a energía eléctrica se construyó un sistema de conversión el cual consta de un eje roscado que trasmite el movimiento (turbina-río) con una polea de un diámetro mayor que el mismo para elevar las RPM que van hacia el generador de imanes permanente haciéndolo girar y propiciando a la salida de este una diferencia de potencial que puede ser usada directamente o enviada a un mecanismo de almacenamiento energético como una batería de 12 V para que contenga toda la producción diaria ya que el sistema estaría funcionando 24h/día, la salida es posteriormente contralada con un circuito controlador de voltaje configurado para 15 Voltios máximo. Se espera en el laboratorio simular diferentes comportamientos que tendría la turbina con diferente velocidad de velocidad río, medir parámetros: voltaje, corriente y potencia que entregaría el generador en vacío y al estar conectado a unos bombillos cercanos a los 16 Watts, para estos datos graficarlos y así, dar conclusiones y recomendaciones respecto a una futura mejora en el proyecto. Las rapideces del río fueron estimadas durante las visitas en sitio de 0,8 m/s, 1,0 m/s y 1,2 m/s flujo rápido añadiendo valores de TSR (Tip Speed Ratio) entre (0 y 2) ya que este afecta directamente el comportamiento final de la turbina.

2- DESCRIPCION Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1 - ANTECEDENTES

El servicio de energía eléctrica es un factor de vital importancia hoy en día, permite mejorar la calidad de vida de las personas y debido a los avances tecnológicos no es dificultoso tener acceso a un celular, tableta, computador o portátil. Elementos que son indispensables y generan una dependencia del servicio eléctrico, asimismo los electrodomésticos (ventiladores, aires acondicionados) que ayudan a mantener una temperatura corporal agradable. En sectores aledaños al río Magdalena viven familias de escasos recursos que no cuentan con un suministro de luz estable, debido primeramente a que el servicio no es mejor en la costa y personas que viven en condiciones mínimas son quienes tienen un servicio inferior que los demás [1], las instalaciones eléctricas que tienen en sus hogares son hechas de manera artesanal con árboles talados y alambres de cobre, siendo esta red igualmente no estable y segura, pudiendo así dañar los aparatos que tengan en su casa y/o causar un incendio, ya que en casos de lluvia o viento esos sistemas pueden colapsar y causar otro tipo de daño, todas esas personas tienen que recurrir a estas formas porque la red de distribución de la energía no llega a su hogar y tienen que extender desde la parte que si llega hasta su hogar, habitantes que se encuentran mucho más aislados no alcanzan a conectarse a la red artesanal, por lo que lastimosamente no cuentan con el suministro, como también fincas o haciendas.

2.3 – FORMULACION DEL PROBLEMA

Actualmente, las orillas del río Magdalena se encuentran habitadas por familias que viven en condiciones mínimas y que necesariamente en estos tiempos necesitan del suministro del servicio eléctrico, que por razones gubernamentales y empresariales para algunas personas no es posible que lo obtengan de una manera constante y segura, para otros, la cobertura hacía a sus casas la deben realizar ellos mismos y de una manera artesanal, siendo esta una posible amenaza para sus electrodomésticos y para sus vidas, mientras que los demás no cuentan con ningún tipo de conexión, quedando totalmente aislados. Una sociedad que hoy en día depende de la tecnología y esta misma de la electricidad, son menos las personas que deben estar aisladas porque el futuro y el avance está en ello, al no contar con la energía se está manteniendo a estas personas en una situación cada vez más peor y con una calidad de vida peyorativa, conviene tener un suministro de energía que sea seguro y permanente para que su calidad de vida mejore y puedan subir un escalón en la sociedad, para que así crezcan en

todos los ámbitos sociales, económicos y educativos. Es por esto que se ha optado por fabricar un prototipo turbina hidráulica para estudiar sus propiedades y sus comportamientos de generación de energía para que luego esta pueda estar cerca de las viviendas y brindar energía eléctrica estable, ya que a la vez es un método de energía renovable y limpia que puede ser usada todo el día con la ayuda del río Magdalena.

¿Qué acciones se deben tomar para minimizar la deficiencia energética en la que se encuentran sumidos los habitantes de las zonas aledañas al río Magdalena?

3 – JUSTIFICACION Y ALCANCE

Debido a las carentes e inseguras condiciones del suministro eléctrico que presentan las personas de recursos limitados que habitan a laderas del río y en vista de aquellos que ni cuentan con el servicio preciado, se hace necesario a día de hoy, la creación de sistemas de energías alternativas que permita mejorar la calidad de vida e impulsar el desarrollo de las familias que habitan en estos sectores, por tal motivo, se ha optado por diseñar y construir una turbina hidráulica helicoidal o Gorlov como fuente propia de aprovechamiento sostenible de recursos energéticos marinos y fluviales de carácter renovable, ya que a consecuencia del progresivo encarecimiento de los recursos energéticos fósiles, que serán en un futuro próximo cada vez más escasos y de explotación más compleja, es necesario encontrar fuentes energéticas sustitutivas como lo son las fuentes renovables, pudiendo así lograr un aporte hacia el futuro de las energías en auge, y que a su vez esta hidro-turbina no contamina el medio ambiente y que puede funcionar 24 horas al día, la turbina se puede llevar a cabo gracias que se cuenta con el conocimiento integrado tanto en mecánica como en electrónica, estática, resistencia de materiales, dinámica y electrónica que son necesarios para el desarrollo técnico y la tecnología requerida para crear el producto como las herramientas computacionales CAD, existen maquinas que realizan impresión en 3D por la complejidad de su forma y gran precisión que requiere, existen generadores eléctricos y partes mecánicas que ya venden con medidas convencionales para armar un producto final, se cuenta con los recursos económicos que se obtuvieron de carácter familiar para la investigación. Con el proyecto se pretende construir la turbina y simular en el laboratorio unas condiciones similares a las del río Magdalena en la población de Guáimaro y a partir de ahí, sacar conclusiones y recomendaciones para lo que sería un montaje

en la zona y poder así empezar a beneficiar a los pobladores con esta forma de energía renovable y limpia sin contaminar el medio ambiente.

4– OBJETIVOS

4.1 – OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un prototipo de turbina hidráulica para su uso en sectores rurales aledaños al río Magdalena.

4.2 – OBJETIVOS ESPECÍFICOS

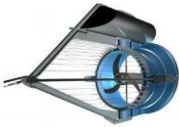


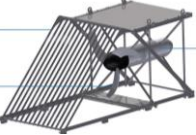
1. Realizar un sistema electromecánico para transformación de energía hidráulica en eléctrica.
2. Construir un sistema electrónico para regulación y control de fuentes de voltaje.
3. Elaborar carcasa y las partes mecánicas de la turbina para acoplarlo al mecanismo final.
4. Validar el funcionamiento del dispositivo en un lugar previamente escogido.

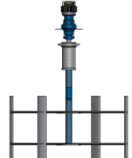
5 - MARCO DE REFERENCIA

5.1 ESTADO DEL ARTE

Las turbinas hidráulicas son dispositivos que cuentan con varios años de creación, motivo por el cual existen una variedad de empresas que distribuyen estos equipos. Las principales características de estos dispositivos en su alto costo, como se muestra en la tabla 2.

Tabla 1. Valor comercial de las turbinas hidráulicas

Turbina	Imagen	Lugar de fabricación	Potencia (W)	Precio (\$)	Costo importación (\$)	Referencia
Smart Hydrofloat		Alemania	250-5000	42'275.000	3'211.950	[2]
SuZhou Newmeil Machinery		Canadá	Max 2000	6'060.000	2'447.200	[3]
Low Head Propeller Turbine		Shanghái	Max 1500	6'890.000	5'139.120	[4]
SMART Free Stream Turbine		Alemania	250-5000	42'723.432	3'211.950	[5]

Eviron Genesis 005		Canadá	Max 5000 a 3 m/s	50'000.000	2'447.200	[6]
--------------------------	---	--------	----------------------------	------------	-----------	-----

La tabla 2 muestra la forma, el nombre de la turbina, lugar de fabricación, potencia máxima producida, costo del dispositivo y costos relacionados con la importación.

1 - Universidad San Nicolás, et al (1993-1996) [7] Diseñaron un modelo de microturbina hidráulica que permitiera evaluar el comportamiento de distintas configuraciones de rotor, álabes y flujos a fin de diseñar una micro turbina hidráulica y realizar la transferencia de conocimientos al sector privado, la turbina fue una Darrieus de 6 alabes, la cual fue prediseñada a una escala de 1:5 con resina epoxi y bronce (figura 1) , la turbina ya realizada fue sometida a validaciones con 2 tipos de perfil biconvexo, asimétrico y simétrico, se obtuvieron los siguientes resultados (figura 2).

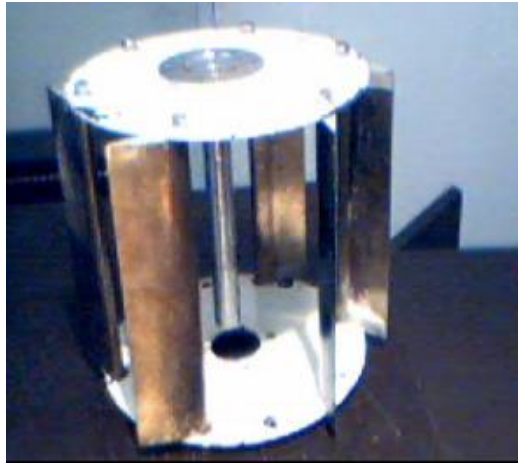
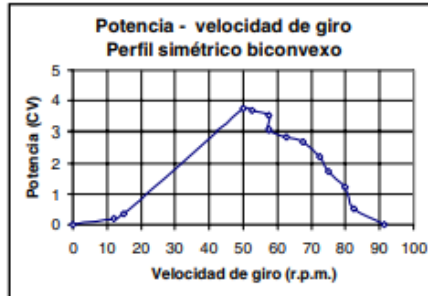


Figura 1. Fotografía de la turbina Darrieus elaborada con resina epoxi y bronce.

Arriba resultados de un rotor con 6 perfiles NACA de cuatro dígitos simétrico biconvexo y abajo resultados de un rotor con 6 perfiles NACA de cuatro dígitos asimétrico biconvexo.

Velocidad flujo (m/seg)	vel.rotación (r.p.m.)	Fuerza alabe (Kg)	Torque (Kgm)	Potencia (CV)
2.82	91.50	0.00	0.00	0.00
2.82	82.50	8.75	4.38	0.50
2.82	80.00	21.88	10.94	1.22
2.82	75.00	32.82	16.41	1.72
2.82	72.50	43.75	21.88	2.21
2.82	67.50	56.88	28.44	2.68
2.82	62.50	65.63	32.81	2.86
2.82	57.50	76.56	38.28	3.07
2.82	57.50	87.50	43.75	3.51
2.82	52.50	100.63	50.31	3.69
2.82	50.00	107.19	53.59	3.74
2.82	15.00	32.81	16.41	0.34
2.82	12.00	21.88	10.94	0.18
2.82	0.00	10.94	5.47	0.00



Velocidad flujo (m/seg)	vel.rotación (r.p.m.)	Fuerza alabe (Kg)	Torque (Kgm)	Potencia (CV)
2.82	43.50	0.00	0.00	0.00
2.82	41.50	28.44	14.22	0.82
2.82	39.00	45.94	22.97	1.25
2.82	37.50	72.19	36.09	1.89
2.82	36.00	87.50	43.75	2.20
2.82	35.00	111.56	55.78	2.73
2.82	33.00	131.25	65.63	3.02
2.82	31.50	177.19	88.59	3.90
2.82	31.00	216.56	108.28	4.69
2.82	24.50	266.88	133.44	4.56
2.82	18.50	350.00	175.00	4.52
2.82	16.50	356.56	178.28	4.11
2.82	12.00	437.50	218.75	3.67
2.82	0.00	568.75	284.38	0.00

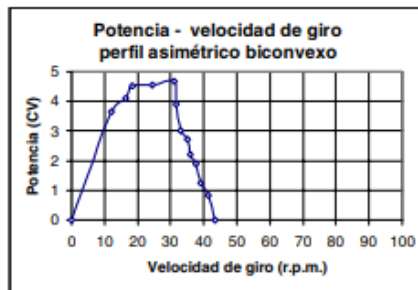


Figura 2. Comparación entre curvas de potencia vs. r.p.m. para dos tipos de rotores de seis alabes diferenciados por el tipo de perfil hidrodinámico.

En la figura 1, se observa la turbina desarrolla en los materiales resina epoxi y bronce, con la posibilidad de sustituir los perfiles por medio de unas tuercas.

Para la figura 2, quedan reflejadas las diferentes mediciones que se le realizaron a la turbina con el perfil asimétrico y con el perfil simétrico, teniendo en cuenta la velocidad del flujo, la velocidad de rotación en rpm, fuerza del abale, torque y potencia, la cual está relacionada directamente con la eficiencia y en donde se lograron mayores coeficientes de potencia con el perfil asimétrico, pero con bajas revoluciones en comparación con el perfil simétrico.

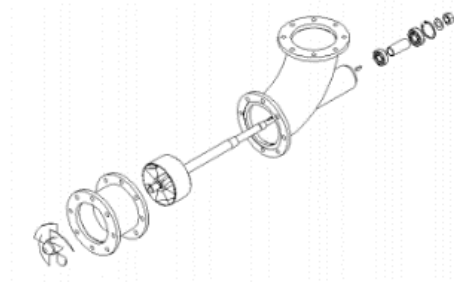
2 - Cotella, et al (2002) [8] Plantearon una microturbina hidráulica de 1 kW. Realizaron el rodete teniendo en cuenta una velocidad de giro del generador de 2000 RPM y 3 m de altura efectiva y un rendimiento estimado del 80 % para lo cual fue necesario un caudal circulante de 150 m³/h, lo que condujo a una máquina con rodete de hélice de 4 alabes, los ángulos de entrada y salida de los álabes del rotor y del estator se calcularon para un flujo de agua sin choques ni desprendimientos en las condiciones de diseño, para la corona de alabes fijo aplicaron los mismos criterios que para el rotor, con igual diámetro exterior, pero

con siete álabes, en la figura 3 (a) se pueden observar las piezas del dispositivo. Por otro lado, se utilizó un generador de imanes permanentes, de tres pares de polos, gira a 2000 RPM, entregando 48 V nominales a 100 Hz en tres fases, siendo refrigerado por aire. Para la medición de los parámetros de la turbina, esta se monta en un banco de ensayos a fin de obtener sus características reales de operación. Estas vinculan la potencia obtenida, la velocidad de giro y el rendimiento con los parámetros hidráulicos de entrada finales con tal de obtener curvas de funcionamiento que vinculan la potencia suministrada con la altura y el caudal entregado y el rendimiento puesto en juego figura 3 (b).

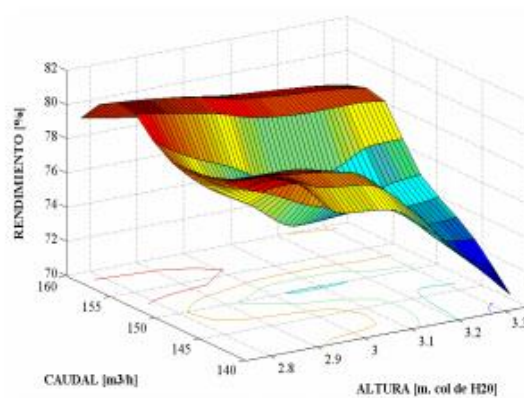
Figura 3. a) Perspectiva del despiece de la turbina y b) Diagrama colinar rendimiento de la transformación energética altura – caudal para turbina hélice.

[8] [9]

a.



b.



La figura 3a. muestra la vista en perspectiva del conjunto resultante del diseño; en el se puede apreciar las distintas partes componentes, rodetes, carcaza, árbol, rodamientos etc. La carcaza está dividida en dos secciones, una en forma de curva y la otra cilíndrica, bridada entre sí. El ingreso de agua se produce por la brida superior, atravesando la corona de álabes fijos e incidiendo sobre el rodete móvil para ceder su energía.

La figura 3b. muestra el rendimiento de la transformación energética, cercano al 80%, obtenido de la transferencia de energía agua rodete. Este rendimiento se considera muy adecuado para pico turbinas (Marchegiani y Audisio, 1999) [10], a este valor deben descontarse las pérdidas en el eje para obtener la potencia mecánica efectiva y las pérdidas en el generador para obtener la potencia eléctrica en bornes. El máximo rendimiento de la transferencia de energía entre el fluido y el rodete se obtiene para valores de caudal y altura próximos a los de diseño. La potencia transferida aumenta para mayores caudales y alturas, manifestándose una leve disminución en el rendimiento de la transformación energética.

3 - Maldonado Quispe (2005) [11] Desarrolló una turbina de 250 W apropiada a las condiciones hidrológicas del río Napo, se determinó por escoger una turbina 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 rpm, 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 rpm a corriente continua. Para finalmente elaborar un modelo a escala al que se realizaron ensayos de campo en el río para verificar el comportamiento de acuerdo a los requerimientos asignados por la investigación y estos fueron los resultados figura 4 y figura 5.

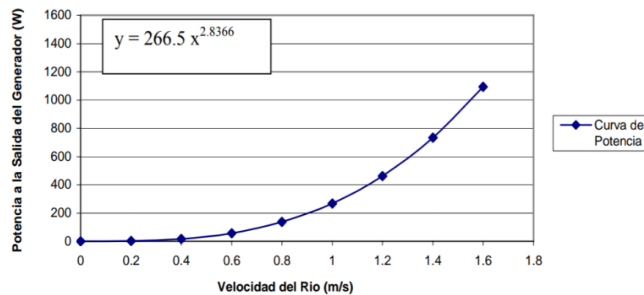


Figura 4. Gráfico de la Potencia vs. Velocidad de río



Figura 5. Montaje de la turbina en el río.

Para la figura 4 se hizo un ensayo de campo, se instaló una Turbina de Río prototipo en la comunidad Paraíso, en el Distrito de Mazan y los datos resultantes han sido ajustados a una ecuación potencial con un exponente cercano a 3 (2.8366).

En la figura 5 se observa la turbina ya desarrollada en fibra de vidrio con un eje de acero, en momentos previos a ser sumergida.

4 - Anderson Josh, Stelzenmuller, Hugues, et al (2011) **[12]** Diseñaron y manufacturaron una turbina helicoidal de flujo cruzado como alternativa para la carga de baterías de un instrumento de medición marítima con el objetivo de reducir gastos, los datos del mecanismo son altura 1 metro y diámetro 0,75, teniendo 20 W como referencia para velocidades de entre (0,5 - 1) m/s y debido a los pocos diseños de turbina Gorlov que se han hecho y a la poca disponibilidad de material concreto y probatorio acerca del funcionamiento de estas, los desarrolladores se vieron obligados a realizar 4 diferentes prototipos (véase tabla 3.) manteniendo el aspect ratio de la turbina final, para así comprobar cual tenía el mejor rendimiento, la idea consistió en realizar la turbina #1 y turbina #2 y las otras 2 quedaban como plan de contingencia en caso de que #1 y #2 no cumplieran con lo previsto, para los alabes se usó una relación de solidez de 0,3 y un perfil NACA 0018 con ángulos de hélice de 60° y 43,7°, posteriormente de procedió a realizar un test de gantry con datos de LABVIEW a velocidades de 0,8 m/s sin carga, resultados en figura 7, con lo que optaron por la turbina #2, los componentes como tal se fabricaron en fibra de vidrio y vinilo, resina de éster, marco de aluminio 5086 y un acoplamiento de cuchillas con diseño de tornillos de titanio a fin de obtener una eficiencia de 28,6%

	Turbine 1:	Turbine 2:	Turbine 3 (contingent):	Turbine 4 (contingent):
Change:	Baseline	4 blades, 60 helix	Low solidity	10% Overwrap
Blade type:	NACA 0018	NACA 0018	NACA 0018	NACA 0018
Number of Blades:	3	4	3	3
Blade tilt:	0	0	0	0
Solidity Ratio:	0.3	0.3	0.15	0.3
Chord length (cm)	6.28	6.126	4.712	8.954
Diameter (meters)	0.2	0.26	0.3	0.285
Aspect Ratio:	1	1.36	1	1.1
Height (meters)	0.286	0.35	0.3	0.31
Swept Area (m^2)	0.0572	0.092	0.0901	0.0894
Helix Angle (degrees)	43.7	60	43.7	43.7
Blockage ratio (flume area 840 sq in)	10.50%			
Overwrap (%)	0	0	0.00%	10.00%
Central shaft:	No	No	No	No
End support:	Radial Arms	Radial Arms	Radial Arms	Radial Arms
Contingency:	Test	Test	Test if turbines 1 and 2 result in low C_p	Test if problems with torque oscillation from 1, 2 and 3.

Tabla 2. Parámetros de los modelos a escala propuestos para ser probados en el canal.

Test:	No-Load Rotational Velocity	
Turbine #1:	150.9 RPM	15.8 rad/sec
Turbine #2:	181.0 RPM	19.0 rad/sec
Turbine #3:	32.7 RPM	3.4 rad/sec

Figura 6. Resultados de pruebas sin carga testeados a 0,8 m / s

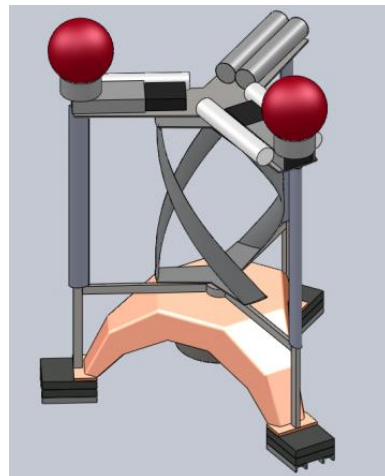


Figura 7. Diseño CAD turbina final



Figura 8. Fabricación de alabe con errores

La tabla 3. Muestra las diferentes turbinas que serían prototipo de prueba y también las de contingencia.

En la figura 6. La turbina #2 tuvo mejor desempeño en cuanto a la velocidad de rotación, siendo está entonces la escogida por el grupo de diseño.

La figura 7. Muestra lo que sería el diseño final de la turbina en la zona marítima.

En la figura 8. Se tiene la fabricación de un alabe en fibra de vidrio que sería posteriormente descartada, debido a problemas con el material.

5 - Walterio Pablo (2012) [13] Realizó una evaluación de una turbina Darrieus para melinka en Chile, con la necesidad de abastecer la localidad con una potencia de 10Kw para el diseño de la turbina se tomó una eficiencia del 40% y teniendo en cuenta que la velocidad promedio del rio es de 1,5 m/s dando como resultado un área frontal para la turbina de 16,2 m² y utilizando un perfil NACA 0015 para los alabes y posteriormente ser fabricados con fibra de carbono y el eje con acero SAE 4340.

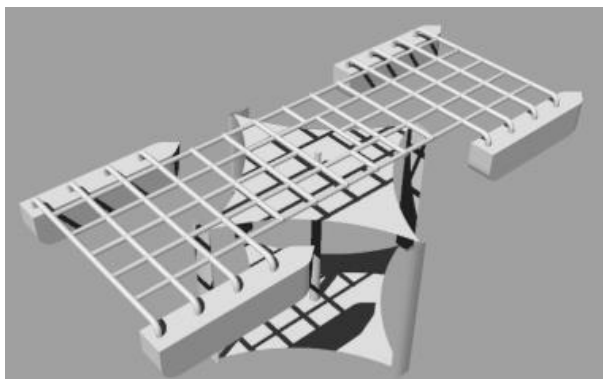


Figura 9. Diseño turbina Darrieus para el proyecto melinka

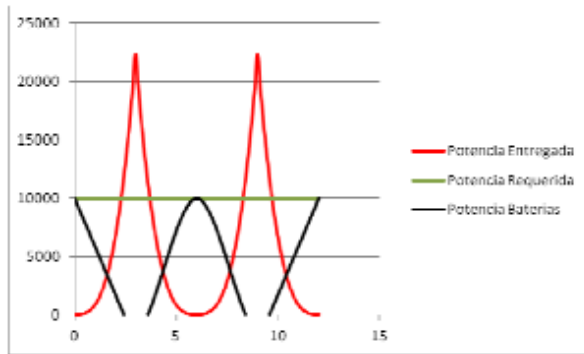


Figura 10. Potencia generada durante el día con apoyo de baterías

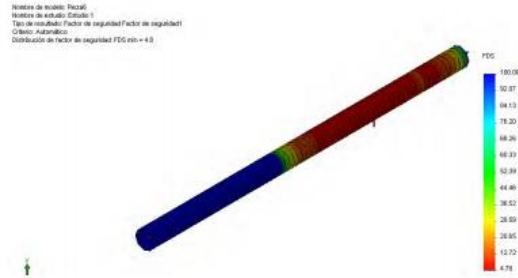
En la figura 9. Se muestra lo que sería un acercamiento al diseño final de la turbina, ya que se debe tener en cuenta que es grande y debe estar bien sujeta a la parrilla flotadora, cosa que no se aprecia claramente en el diseño.

La grafica 10. Se observa la potencia entregada de la turbina, con el suministro adecuado que debe ser constante por lo que, ante los picos y caída de potencia entregada, se hace uso de un conjunto de baterías las cuales apoyan el proceso de energía constante para la localidad.

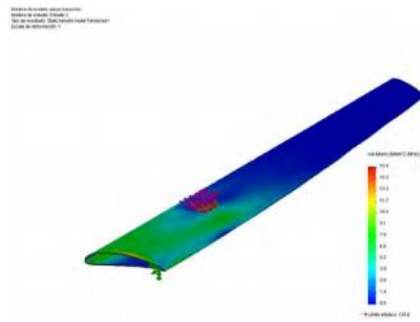
6 - Peña, V. [23] (2013). Realizó el Diseño de una turbina hidro-cinética de 1KW para aprovechamiento energético de ríos no caudalosos. Teniendo en cuenta una velocidad de río promedio en Perú de 1.3 m/s se Utilizó un perfil aerodinámico SG6043 el cual tiene un desempeño optimo en cuanto un alto coeficiente de sustentación y un bajo coeficiente de arrastre, estos coeficientes definen la fineza del álabe, la cual se relaciona con el rendimiento del álabe, para conformar el rodete de 3 alabes se utilizaron formas de palas torsionales, el material de elaboración de las palas fue fibra de vidrio y resina epoxy, con un radio de 1.58 metros, engranajes rectos y un alternador de 24/48V, como resultado al análisis de carga el eje de baja velocidad será de 2.25 in, el diámetro de la parte más gruesa del eje será de 2.7 in en acero AISI1020; Para los resultados finales, se realizaron simulaciones de elemento finito en Solid Works para validar el comportamiento de este con tal poder predecir zonas de posibles fallas del eje y de los alabe en las condiciones de trabajo a las que estará sometido el dispositivo final. (véase la figura 11).

Figura 11. a) Diagrama de momento flector – Solid Works, b) Tensiones en el álabe - Solid Works. y c) Desplazamientos del álabe - Solid Works.

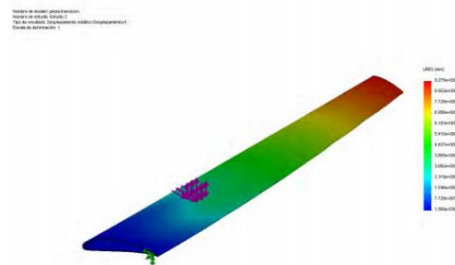
a.



b.



c.



La simulación se realizó en Solid Works bajo carga estática. Las fuerzas de sustentación, arrastre y momento se aplicaron en el centro de gravedad del álabe y se simuló como si se tratara de un empotramiento. El álabe es de fibra de vidrio cuya resistencia a la fluencia es de 135 MPa.

La figura 11.a. Muestra la distribución de Factor de Seguridad en el eje, siendo el valor mínimo de 4.8 para un análisis estático.

La figura 11.b. Muestra las tensiones en las cargas debidas a las cargas aplicadas, se puede apreciar que la parte del empotramiento tiene áreas muy cargadas incluso del orden de 15.6 MPa.

La figura 11.c. Se pueden identificar las zonas con mayores desplazamientos y las de menores desplazamientos, como era de esperarse la zona más cercana al empotramiento es la que tiene menores desplazamientos. La zona más alejada del empotramiento tiene los mayores desplazamientos, en la punta es donde se tiene el valor de máximo desplazamiento con el valor de 9.275 mm.

7 – Keough Richard, Mullaley Victoria et al [15] Diseñaron, fabricaron y realizaron ensayos de un dispositivo de energía de corriente de agua, teniendo en cuenta que era para un río de baja velocidad decidieron inclinarse por una turbina de flujo cruzado del tipo Gorlov, el paquete CAD de SolidWorks se utilizó para desarrollar un modelo virtual para la construcción y análisis virtual (Vease figura 12). El modelo informático resultante fue analizado en flow3D para características hidrodinámicas antes de la construcción del modelo físico (Vease figura 13). Una vez aceptable se obtuvo un rendimiento virtual, el modelo físico se fabricó utilizando máquinas de prototipo rápido para imprimir las cuchillas ABS y las piezas mecanizadas para el montaje de cuchillas y ejes (véase figura 14). Se realizaron dos prototipos para los que se hicieron pruebas diferentes (véase figura 16). Los ensayos se realizaron a velocidades de flujo de 0,25 m/s a 2,0 m/s en incrementos de 0,25 m/s.

Para cada prueba de velocidad, se realizaron múltiples remolques con un aumento del par de frenado, comenzando en cero (rueda libre) y continuar hasta que la turbina no pueda girar. Los resultados de estas pruebas fueron analizados para producir Coeficiente de potencia frente a Coeficiente de velocidad, y Curvas de potencia frente a velocidad angular para comparación con las curvas típicas de turbomáquinas, el valor máximo de potencia alcanzado fue de 13 Watts.

Figura 12. a) CAD turbina Gorlov. b) Turbina fabricada.

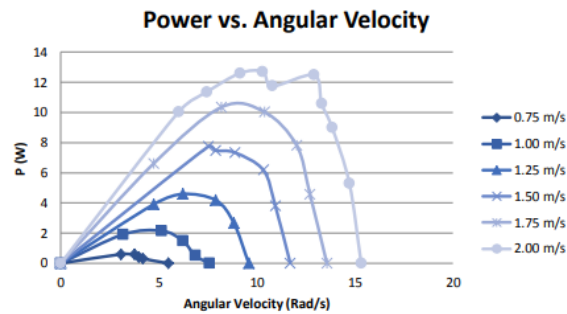
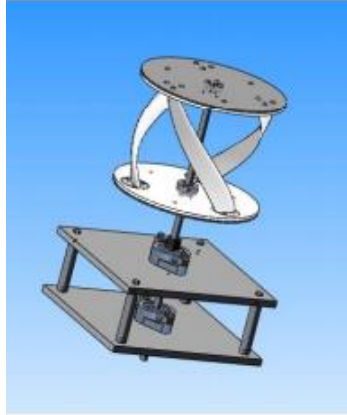


Figura 13. Resultados de potencia vs velocidad angular

8 - Martinez Emilio (2014) [16] Realizó el diseño y la optimización por medio de análisis exegéticos a turbinas hidrocínéticas de bajo caudal, desarrolló una técnica propuesta para el modelado del comportamiento de turbinas hidrocínéticas helicoidales, en base a datos experimentales. Los modelos propuestos buscaron identificar parámetros de desempeño a través de coeficientes, los cuales agrupan a las pérdidas exegéticas por fricción en un solo valor, mientras que la transferencia de velocidad del agua a la máquina y su traducción al par se hace a través de un exponente y un coeficiente de transferencia de par.

Se hicieron pruebas experimentales a tres modelos a escala, con diferentes ángulos de torsión azimutal (30°, 90° y 120°). Estos experimentos se hicieron en un canal de pruebas, con el fin de tener control sobre el gasto y la velocidad del agua de un experimento a otro. La correspondencia de los datos hizo posible una comparación directa entre cada máquina.

Los experimentos también fueron simulados a través de códigos de malla fina para identificar el esquema ideal de simulación, el cual a su vez puede ayudar a la optimización del diseño sin necesidad de más pruebas experimentales.

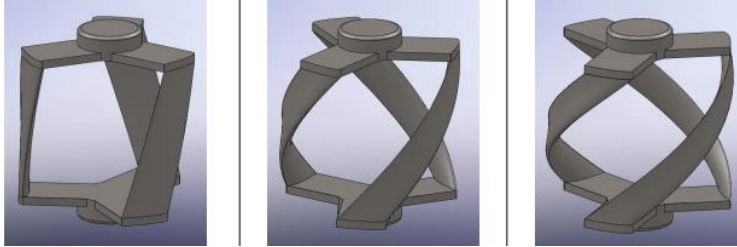


Figura 14 a. Diseño CAD turbina Gorlov de 30°,90° y 120°.



Figura 15. Modelos impresos antes de ser lijados.
(120° izquierda y 90° derecha)



Figura 16. Lugar de pruebas aguas arriba (izquierda) y aguas abajo (derecha)

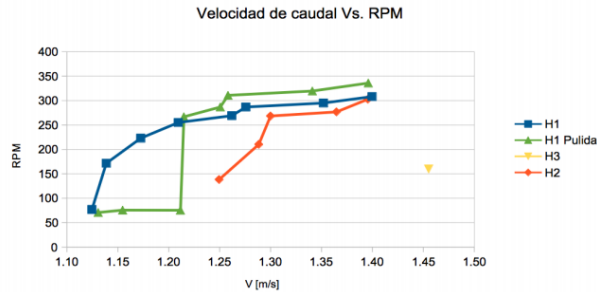


Figura 16.a. Resultados de turbina a 30° Vs Velocidad de caudal vs RPM

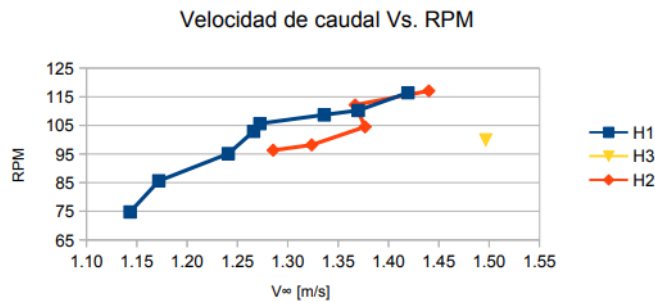


Figura 16.b. Resultados de turbina a 90° velocidad de caudal vs RPM

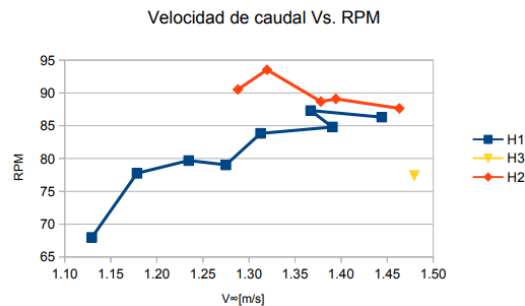


Figura 16.c. Resultados de turbina a 120° velocidad de caudal vs RPM

9 - García Ángel et al (2014) [17] Diseñó un banco de ensayos de turbina hidrocínética tipo Gorlov para él un laboratorio de termo-fluidos en ciudad bolívar, estado bolívar. Puesto que la turbina funcionaría con la fuerza de una bomba la cual sería diseñada para trabajar con velocidades entre $-y - m/s$ y debían tenerse en cuenta las dimensiones del canal, se facilitaron un poco los cálculos para lo cual obtuvo una tabla con todos los datos y parámetros de la turbina que incluían todos los factores que le afectan al rendimiento como a la parte mecánica del

mecanismo, como también los datos de la tina (véase tabla 18 y 19), además se realizó un diseño cad para el cual estaba todo el sistema unido entre sí (figura 18).

Datos					Formulas empleadas
	Nombre	Símbolo	Cantidad	Unidad	
TURBINA	Palas	B	4		
	Relación de	σ	0,3		$\sigma = \frac{B \cdot C}{\pi \cdot \phi}$ de $C = \frac{\pi \cdot \phi \cdot \sigma}{B}$
	Relación de	RA	1,5		$RA = \frac{H}{\phi}$ de $H = \phi \cdot RA$
	Diámetro	ϕ	0,1	m	
	Radio	r	0,05	m	
	Altura	H	0,15	m	
	Eficiencia	η	0,35		
	Cuerda	C	0,02	m	
	Angulo de	δ	62,36	°	$\delta = \tan^{-1} \frac{B \cdot H}{\pi \cdot \phi}$
Angulo de	ϕ	90	°		
TURBI	Angulo de	θ	90	°	

Paso	α_1	45	°	$\alpha_1 + \alpha_2 = \theta = \frac{360^\circ}{B}$
Paso	α_2	45	°	
Potencia en	P_{ET}	26,82624	W	$P_{ET} = \frac{1}{2} \rho \cdot A_{NF} \cdot V^3 \cdot \eta$
Potencia	P_{LE}	38,3232	W	$P_{LE} = \frac{1}{4} \rho \cdot A_{NF} \cdot V^3$
Estimación	ω	16	rad/s	$V = \omega \cdot r$ De $\omega = \frac{V}{r}$
Relación de	U_n	1		$U_n = \frac{\omega \cdot r}{V}$
EI	C_d	2,155		$C_d = 1,925 \cdot U_n + 0,23$
Fuerza de	F_{AE}	3,0969936	N	$F_{AE} = 0,5 \cdot C_d \cdot \sigma \cdot \rho \cdot V^2 \cdot \phi \cdot H$
Fuerza de	F_d	4,02609168	N	$F_d = F_{AE} + 30\%$

Tabla 3. Parámetros de la turbina a construir.

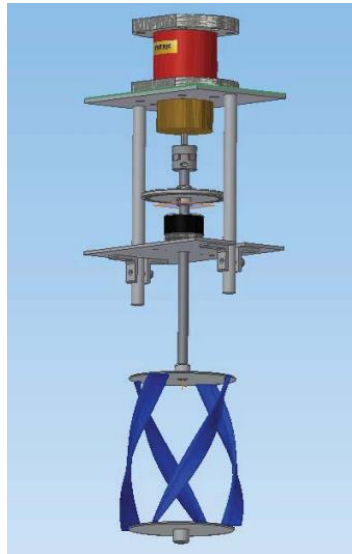


Figura 17. CAD acoplamiento de la turbina con el módulo de instrumentación.

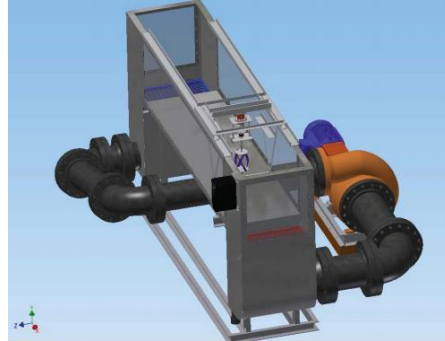


Figura 18. CAD banco de ensayos para turbina hidrocínética.

9 – Filali Abid (2015) **[18]** Calculó y diseñó una turbina hidrocínética para ríos del tipo horizontal flotante, la idea principal fue suministrar una potencia de entre 2 kw a 3,5 kw para un rango de velocidades de entre 1 m/s a 5 m/s dependiendo de la condición del río ara en Huesca, España. Las dimensiones propuestas para la turbina fueron de 2,5 m x 2,5 m x 2,5 m (figura 21), en principio se propusieron varios tipos de perfiles y se sometieron a unas simulaciones virtuales en el programa Q-blade de son se dio por utilizar se utilizó por utilizar perfil NACA 4410 ya que brindaba un alto coeficiente de sustentación y que es viable para este tipo de turbina (figura 21). Para las 3 palas de la hélice, fueron hechas en moldeo por inyección de material ABS debido a su fácil realización los soportes, la carcasa y la barca flotante fueron realizados en poliuretano y varios tipos de aluminio.

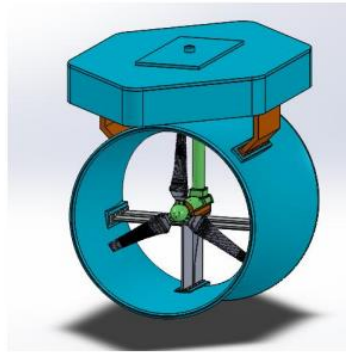


Figura 19. Turbina con las dimensiones propuestas 2,5 m x 2,5 m x 2,5 m.

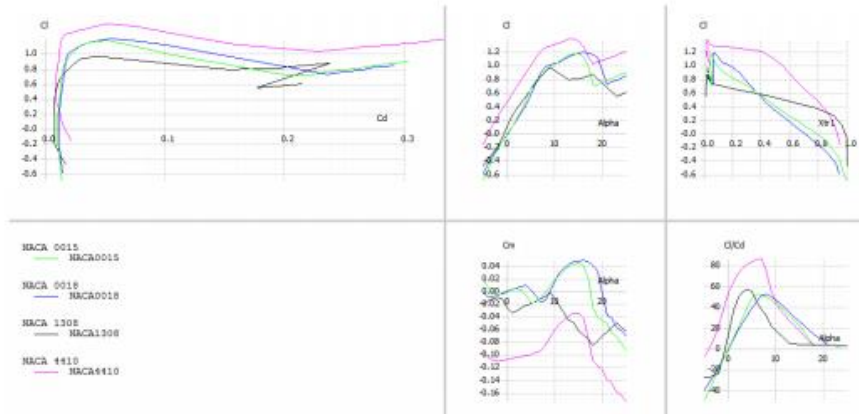


Figura 20. Resultados de rendimiento de diferentes perfiles naca.

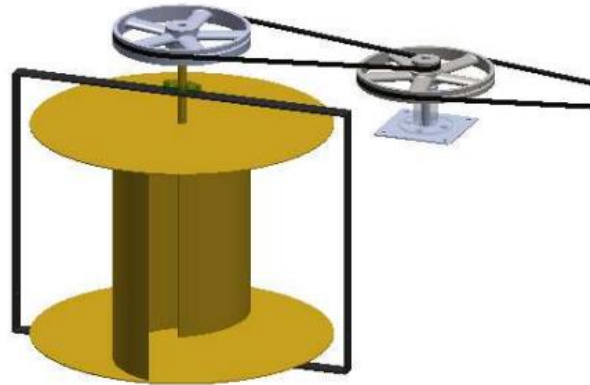
Para la figura 19. Se tiene el diseño CAD de la turbina final con sus dimensiones en metros.

En la figura 20. Construyeron diferentes graficas de perfiles para comparar el coeficiente de sustentación que ofrecían los diferentes tipos de perfiles.

10 – Zubialde irate (2016) [19]. Diseñó una turbina hidrocínética tipo Savonius, describe la metodología empleada para el diseño de un rotor de tipo Savonius para ser utilizado como generador hidrocínético en un canal de agua artificial de la provincia de Pinar del Río. realizó un análisis de los antecedentes y de los estados de ese tipo de sistemas, las distintas variantes que existían, así como las potencialidades energéticas en la localidad municipal y detalló el diseño propuesto, los cálculos realizados y la selección de los materiales. También mostró los análisis estructurales y de fuerza hechos mediante simulación, utilizando el software SolidWorks 2014.

La turbina será elaborada, se asumió un coeficiente de potencia de 0,3, se propusieron suministrar 2kw de potencia, para velocidades de río entre 0,6 m/s a 2 m/s y constará de dos palas de acero inoxidable AISI 304 la altura del rotor fue de 0.8 m y anchura de 1,08 m (figura 21)

Figura 21. Conjunto de turbina hidrocínética tipo Savonius.

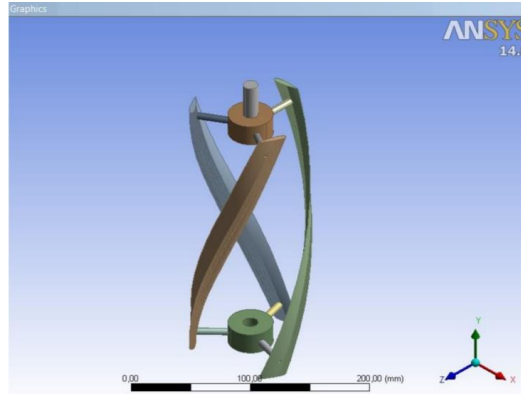


En la figura 21, se muestra el cad de la turbina Savonius acoplada a lo que sería un sistema de poleas para transmitir el movimiento hacia el generador eléctrico.

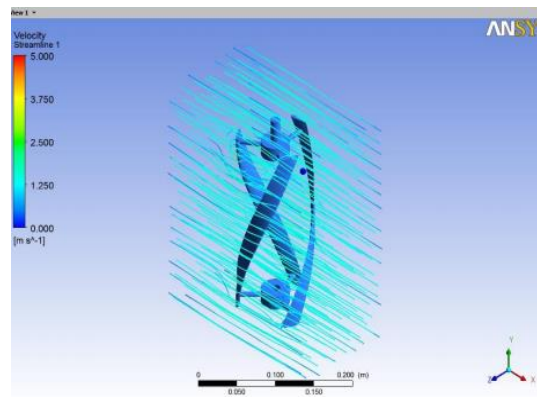
11 - Abril Romero (2016) [20] Diseñó de una turbina para un pico central hidroeléctrica para las condiciones del río Vaupés en Mitú, Se elaboró un modelo de turbina Gorlov con los materiales aluminio, resina poliéster reforzada con fibra de vidrio para producir 350 W y diseñada de acuerdo a los parámetros establecidos en la patente del profesor Alexander Gorlov en la Universidad de Northeastern, para el progreso del proyecto fue necesaria la obtención de datos hidrológicos del río Vaupés con respecto a las estaciones limnigraficas y limnimetricas del IDEAM, se realizó una investigación acerca del diseño de turbinas de Gorlov y posteriormente se utilizó software de diseño por elementos finitos para el análisis de fluidos donde y obtener información acerca del comportamiento del artefacto en trabajo, resultados en la Figura 22.

Figura 22. a) Turbina importada ANSYS, b) Turbina con líneas de flujo.

a.



b.



Para la Figura 22 a se modeló la turbina en un software en 3D extrayendo una turbina en ANSYS para encontrar los siguientes parametros como fluidez, velocidad tangencial, esfuerzo cortante, y coeficiente de arrastre.

La razón para la realización de estas simulaciones fue encontrar los rangos bajo los cuales la turbina puede trabajar sin que se vea afectada su integridad estructural y geométrica.

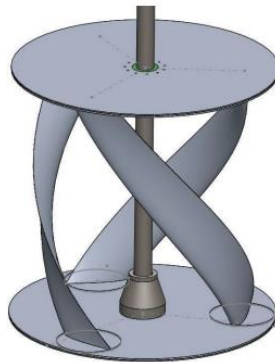
La velocidad tangencial es aquella que es adoptada por los álabes y que es transmitida por la energía cinética del agua. En este caso particular el valor obtenido fue de $2,475 m s$ mientras que la velocidad de flujo promedio calculada en el río es de $1,348 m s$, lo que representa que las velocidades de flujo presentadas en el río son idóneas para el funcionamiento de la turbina, ya que no exceden el valor máximo presentado por el software.

El esfuerzo cortante generado por el contacto con el agua fue de $15,247kPa$. Teniendo en cuenta que los materiales en que está diseñada la turbina son aluminio y resina poliéster reforzada con fibra de vidrio, ambos con módulos de elasticidad de $68 GPa$ y $14 GPa$ respectivamente, se estima que el esfuerzo generado por el contacto con el agua no afectará la integridad de los componentes de la turbina.

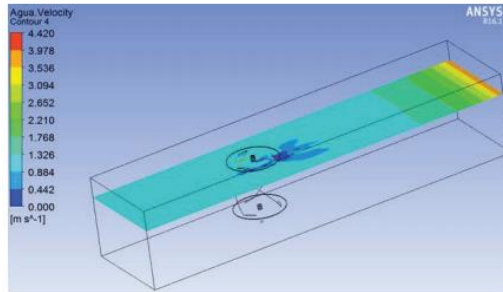
12 – Campos Miranda, Vásquez Juan (2017) [21]. Realizaron una turbina hidrocinetica del tipo Gorlov, la cual fue sometida a pruebas de campo y posteriormente analizados los resultados finales, para el diseño de la turbina, se analizó el tipo de turbina, sus ventajas y desventajas y se decidió optar por una Gorlov, para un canal de pruebas al norte de Ecuador, la turbina contaba con una altura de 60 cm y un diámetro de 45 cm, para producir un máximo de 27 w.

Figura 23. a) Turbina solidworks, b) volumen de control y turbina implementado en Ansys, c) turbina final en PLA.

a)



b)



c)



En la figura 23.a. Se encuentra el diseño el solidworks de la turbina Gorlov.
 Para la figura 23.b. Realizaron una simulación en Ansys del fluido incidiendo en la turbina.
 En la figura 23.c. Está la turbina con su montaje final, lista para implementar.

13 – Colina Guillermo (2017) [22]. Realizó el diseño de un rotor hidrocínético tipo Gorlov para el suministro de energía eléctrica a una vivienda ubicada en una zona no interconectada del departamento de Casanare, la cual tuvo una altura de 1 m y diámetro de 0.7 m, siendo una turbina de tamaño considerable para producir una potencia de 191.77 Watts, utilizando material ABS para la impresión y un perfil NACA 0021.

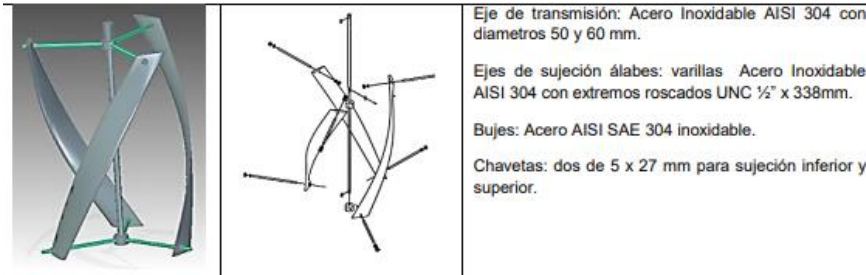


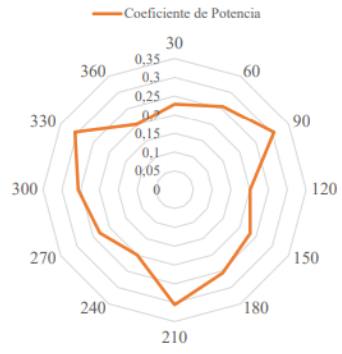
Figura 24. Diseño del rotor tipo Gorlov.

Para la figura 24. Se tiene el cad de la turbina con el despiece mecánico y el listado de componentes con su respectivo material.

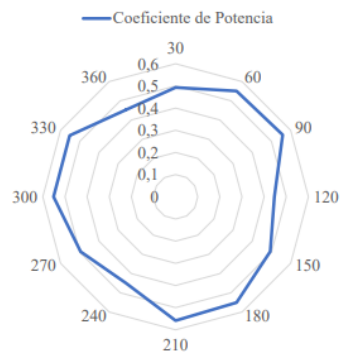
13 – Carrillo Juan (2018) [23] Elaboró el diseño mecánico de una turbina hidrocínética para generación de energía en la estación de biodiversidad del Tiputini, el estudio se fundamentó en el principio de Betz donde se definen relaciones matemáticas para establecer el comportamiento, la eficiencia y potencia teórica de salida en función de la velocidad de punta del ábabe o TSR. Se analizaron por medio de simulación CFD en SolidWorks® dos modelos con perfiles aerodinámicos NACA 0018 – NACA 0021 con la finalidad de encontrar el diseño que mejor se adapte a las condiciones del río Tiputini. Los resultados reflejaron que el modelo que cuenta con un perfil NACA 0021 ofrece una eficiencia máxima del 35% la cual es equivalente a la eficiencia definida por Gorlov para sus diseños.

Figura 25. a) Desempeño en función del coeficiente de potencia perfil NACA 0018 b) Desempeño en función del coeficiente de potencia perfil NACA 0018 c) imagen renderizada del modelo d) Coeficiente de potencia vs TSR

a)



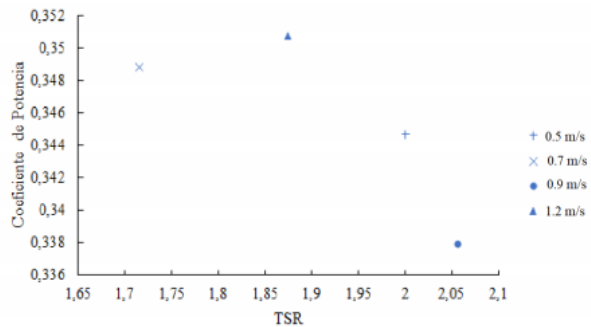
b)



c)



d)



En la figura 25.a y 25.b. Se observa el desempeño de la turbina en función del coeficiente de potencia. En este diagrama de radar se identifican tres picos donde el coeficiente de potencia es máximo. Este comportamiento es el que se busca usualmente en las turbinas tipo Gorlov y Darrieus, ya que presentan tres puntos de empuje en la estructura lo que provoca un movimiento constante y equilibrado. Cabe denotar que se busca un desempeño uniforme a lo largo de todos los ángulos de giro de la turbina con el objetivo de minimizar las caídas de potencia entre los espacios de las aspas.

Para la figura 25.c. Se tiene el CAD renderizado de la turbina Gorlov propuesta.

En la figura 25.d. Encontramos una gráfica de Cp vs TSR para determinar el comportamiento máximo de la turbina.

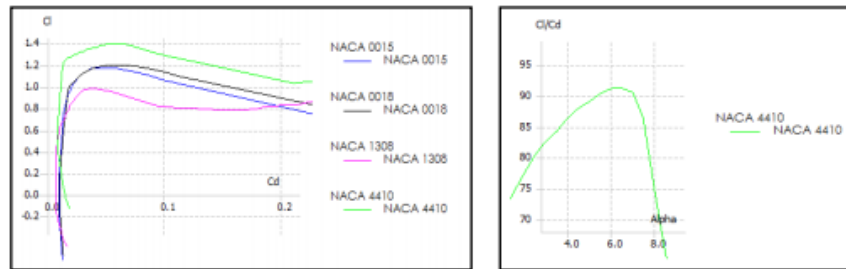
14 – Labriola Carlos, Chacón Hugo, et al (2018) [24]. Presentaron las mejoras de diseño para una turbina hidrocinetica de eje horizontal para la parte del rotor y generador complementándose el sistema flotante más robusto. La generación de electricidad se hizo con generador de Imanes Permanentes y un rectificador a la salida para usar uno o dos conductores y obtener CC en la orilla del canal, río, ría o bahía, los cuales cuentan con velocidades entre los 1,5 m/s y 3 m/s, con polo negativo por tierra o por cable respectivamente. En tierra se instalarían puestos de cargas baterías con regulador de tensión para tener acumulación de energía y luego disponer un inversor para obtener CA. Se implementaría un prototipo de 1 a 5 kW que puede ser escalado a algunas decenas de kW dependiendo de la profundidad de los lugares de emplazamiento.

Figura 26 a) Alabes y eje de acople (izq.), balsa flotante con alabes acoplados (der) b) Coeficiente de Sustentación (Cl) en función del Coeficiente de Fricción (Cd) (izq.) - Relación Cl/Cd en función del ángulo de ataque (α : Alpha)

a)



b)



En la figura 26.a. Se encuentra el dispositivo final construido listo para funcionar. Para la figura 26.b. Construyeron diferentes graficas de perfiles para comparar el coeficiente de sustentación y fricción que ofrecían los diferentes tipos de perfiles NACA.

15 – Papparazzo Diego, Bacchi Federico, et al (2018) [25] Realizaron el diseño y estudio numérico de una turbina hidrocínética de baja potencia mediante CFD (Dinámica de Fluidos Computacional). El alcance contempla el diseño de una turbina hidrocínética mediante la aplicación de las teorías conocidas en la rama de la Mecánica de los Fluidos y de la Mecánica Computacional, incluyendo el diseño de álabes, el cubo, y la carcasa, junto con su estructura de sujeción que la mantiene inmersa en el fluido. Teniendo en cuenta una velocidad para el fluido de 6 m/s, son realizadas simulaciones tridimensionales mediante el uso del software ANSYS 19.0, con el objetivo de la estimar las cargas de diseño y determinar las condiciones nominales de operación, incluyendo resultados en régimen

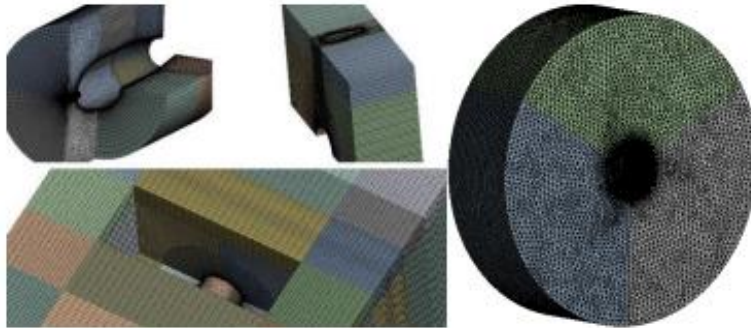
estacionario y no estacionario. Los resultados obtenidos con el modelo de turbulencia $k-\epsilon$ Realizable, en combinación con el algoritmo de cálculo SIMPLEC, y la utilización de mallas estructuradas y no estructuradas que involucran dominios estancos y rotantes permiten predecir la potencia, par y cargas de arrastre sobre la estructura.

Figura 27. a) Izquierda: Geometrías estudiadas; Derecha: Perfil seleccionado de la turbina hidrocínética. b) Izquierda: mallas del cuerpo de la turbina; Derecha: vista de la malla rotante. c) Izquierda: Potencia generada durante una vuelta en función del tiempo; Derecha: Drag sobre la turbina completa durante una vuelta en función del tiempo

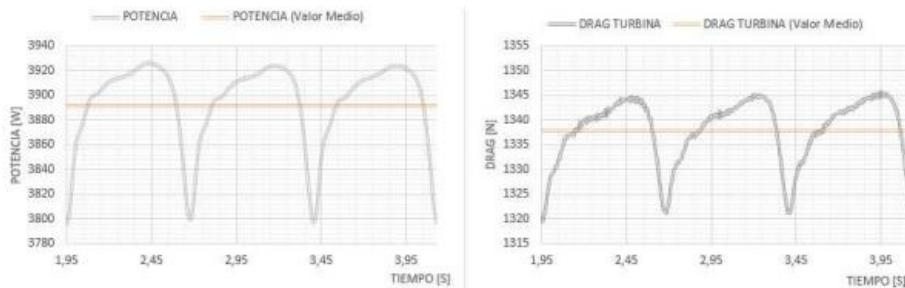
a)



b)



c)



En la figura 27.a. Se observan diferentes diseños para diferentes geometrías de turbina.

Para la figura 27.b. Realizaron el mallado de la turbina para simular su comportamiento.

Para la figura 27.c. Construyeron graficas en base a los tiempos de giro de la turbina vs la potencia que esta produce.

5.2 MARCO TEÓRICO

Las turbinas hidrocinéticas permiten aprovechar la energía cinética presente en la corriente del río en canales artificiales o en lugares donde no existe un reservorio o una represa que provoque una caída de agua. Este tipo de turbinas han tenido un significativo avance en los últimos años con el desarrollo de nuevos modelos y la ayuda de la simulación por computador, lo que ha permitido el desarrollo de nuevas e innovadoras turbinas con un incremento en su rendimiento y su aplicabilidad. Estas turbinas junto a sus sistemas asociados constituyen una fuente de energía renovable, de relativo bajo costo y amigable con el medio ambiente.

Para el presente estudio se abordará un análisis de la disponibilidad energética que contiene el río Magdalena en diferentes sectores aledaños al río Magdalena en el Atlántico, Magdalena y Bolívar. De acuerdo con ello, se seleccionará la tecnología que mejor se adapte al medio y se construirá un prototipo, se realizará un estudio de su rendimiento, factibilidad, costos de diseño e implementación.

Este capítulo se divide en dos partes. La primera es una breve descripción de las turbinas hidrocinéticas, los tipos que han sido desarrollados, los criterios de

selección de acuerdo a su aplicación. La segunda es una descripción de los sectores aledaños al río Magdalena y las características del río en esos puntos. La información disponible para el diseño y desarrollo de estas turbinas, es muy especializada, algo dispersa y está enfocada en casos particulares. Para el caso concreto de las turbinas Gorlov y debido a la dificultad de su construcción, solo se conoce de unos pocos estudios en Colombia y algunos de otros países en el mundo que difícilmente han llegado a la etapa de la construcción de un prototipo. Por tanto, se considera un trabajo innovador y que constituye como punto de partida para el estudio de una nueva línea de investigación en turbo máquinas y mecánica de fluidos.

5.2.1 Ley de betz aplicada a las turbinas hidrocínéticas.

El análisis de la turbina hidrocínética se desarrolla a través de la Ley de Betz. Este principio se establece para aerogeneradores de hélice idealizados, es decir sin fricción. Los cuales están diseñados para extraer energía del viento. De igual manera, se puede aplicar estos fundamentos para analizar la turbina de río, puesto que ambas configuraciones presentan un flujo en movimiento que incidente sobre su estructura. Este principio establece un coeficiente fundamental de poder denominado número de Betz o C_p que compara el rendimiento de un aerogenerador ideal con uno real.

La eficiencia ideal de un aerogenerador fue establecida por A. Betz. en 1920 usando la ilustración mostrada en la figura 28. La hélice es representada por un disco, el cual presenta en el plano de la hélice una diferencia de presión que tiene un área A y una velocidad local V . El viento se representa a través de una corriente con una velocidad de entrada V_1 y una velocidad de salida V_2 . Se toma la caída de la velocidad a través de los álabes de la turbina ($V_1 - V_2$) como la diferencia de velocidades que al pasar sobre las superficies de los álabes tiende a

reducirse a una velocidad menor V_2 , la diferencia entre la velocidad de entrada y de salida restringe la extracción de la energía disponible en el flujo entrante. La presión incrementa desde P_b justo antes del disco y cae a una presión menor P_a , retornando a la presión de la corriente libre aguas abajo [35]. A continuación, se presenta el desarrollo matemático.

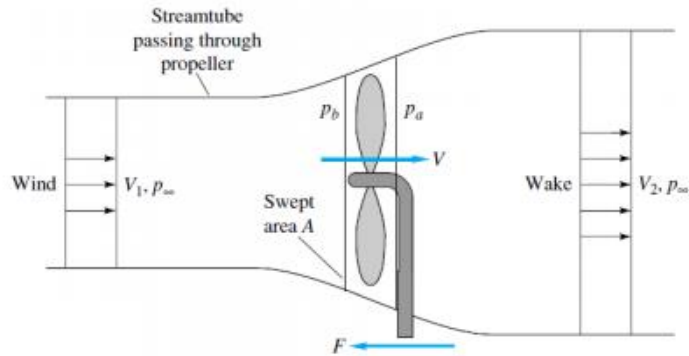


Fig 28. Análisis de flujo de un aerogenerador.

Donde:

ρ = Densidad del fluido.

A = Área o sección transversal de la turbina.

V_1 = Velocidad de entrada

V_2 = Velocidad de salida.

V = Velocidad local del fluido.

p = Presión.

P = Potencia generada en vatios [Watts]

Se establece un volumen de control que relaciona las secciones 1 y 2.

$$\sum F_x = -F = \dot{m} (V_2 - V_1) \quad (1)$$

$$\sum F_x = -F + (p_b - p_a) * A = \dot{m} (V_2 - V_1) = 0 \quad (2)$$

Se relaciona las dos ecuaciones anteriores para determinar la fuerza de la hélice.

$$F = (p_b + p_a) * A = \dot{m} (V_2 - V_1) \quad (3)$$

Asumiendo flujo ideal, las presiones pueden ser calculadas aplicando la relación de Bernoulli fuera del disco.

De 1 a b

$$(p_{\infty} + \frac{1}{2} * \rho * V1^2) = (pb + \frac{1}{2} * \rho * V2)$$

De a a 2

$$(pa + \frac{1}{2} * \rho * V2) = (pb + \frac{1}{2} * \rho * V2^2)$$

Estableciendo una velocidad de entrada $V1$ se relaciona las ecuaciones anteriores para determinar la máxima generación de potencia.

$$P = Pmax = \frac{8}{27} * \rho * A * V1^3 \quad (4) \quad \text{para } V2 = \frac{1}{3} * V1$$

De igual manera se obtiene la ecuación de la potencia disponible en la hélice.

$$Pdisp = \frac{1}{2} * \rho * A * V1^3 \quad (5)$$

Definiendo el coeficiente de potencia como la relación de la potencia máxima con la potencia disponible en la hélice. El valor máximo teórico Cp , *max es de 0.593*.

$$Cp = \frac{Pmax}{Pdisp} = \frac{Pmax}{\frac{1}{2} * \rho * A * V1^3} \quad (6)$$

“Éste es el denominado número de Betz, que sirve como referencia ideal con la que comparar el rendimiento de un aerogenerador real” [35]. Este concepto se aplica también a la energía que se puede extraer del agua a través de una turbina hidrocínética, por lo cual es importante considerar el factor Cp , en las ecuaciones de potencia y energía.

La energía que se puede obtener de un fluido, para una turbina hidrocínética depende de su densidad, su velocidad y el área o sección transversal de la turbina que está inmersa en él y produce la conversión de energía.

$$P = \frac{1}{2} * \rho * A * V1^3 \quad (7)$$

Donde:

A = Área o sección transversal de la turbina.

$V1$ = Velocidad del fluido entrante

ρ = Densidad del agua.

P = Potencia generada en vatios [Watts]

Con este criterio, se tienen diversos tipos de sistemas de turbinas como son [26]:

- **Horizontales:** Donde el eje de rotación es paralelo al ingreso del agua.
- **Verticales:** El eje de rotación es perpendicular a la superficie del agua.
- **Flujo cruzado:** El eje de rotación es paralelo a la superficie del agua, pero ortogonal al ingreso del agua.
- **Venturi:** Emplean un sistema para acelerar el fluido y crear un gradiente de presión.
- **Vórtice Gravitacional:** Generan un vórtice para mover una turbina vertical.

Estos sistemas de turbinas se caracterizan por no tener un reservorio o necesitar una represa, se utilizan generalmente en canales, ríos y costas donde se tiene flujos de agua de marea. Por sus características son utilizadas como una fuente de energía no convencional y la energía que se obtiene de ellas no es muy elevada.

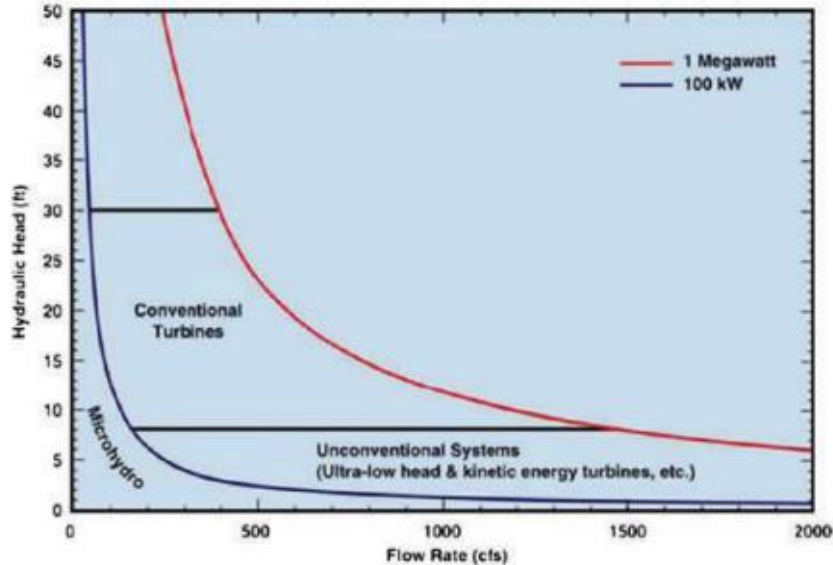


Fig 29. Comparación entre las energías hidráulica convencional e hidrocinética.

Los sistemas que utilizan las turbinas hidrocinéticas depende de la aplicación donde se los va a implementar, de acuerdo a ello y otros factores importantes como costo, disponibilidad de tecnología, etc., se tienen varios esquemas de turbinas y de los sistemas asociados. Por regla general las turbinas para ríos o canales presentan menores dificultades técnicas y costos que las empleadas en el mar o costas para su utilización con las mareas. La figura 30. presenta un cuadro muy ilustrativo del tipo de turbinas de acuerdo al elemento rotor usado y su tecnología asociada.

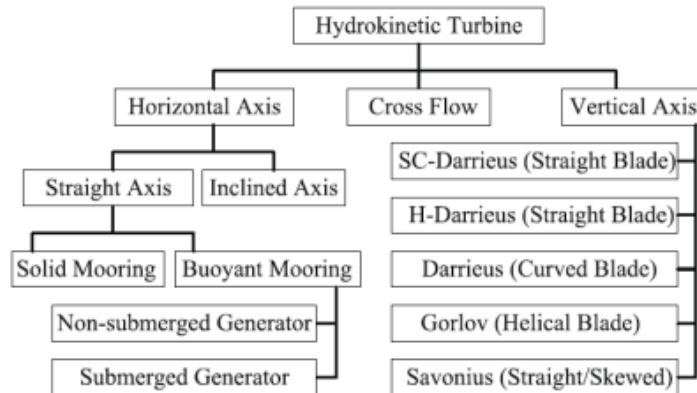


Fig 30. Tipos de turbina de acuerdo al tipo de rotor.

Esta clasificación permite seleccionar el tipo que mejor se adapte a cada necesidad. Muchos de estas turbinas han sido desarrollados para aplicaciones eólicas. Para este caso particular se hizo una selección tomando en consideración los siguientes criterios:

- Fuente de energía disponible
- Dificultad tecnológica
- Costo
- Desarrollo de nuevas aplicaciones

La fuente de energía disponible es el río Magdalena en las laderas de Ponedera (Atlántico) y Guáimaro (Magdalena). Esto determina algunas restricciones: baja velocidad del fluido, por lo que se necesita que sea auto arrancable y que no necesite una estructura muy complicada.

La dificultad tecnológica es otra restricción, se desea una turbina confiable pero que su nivel de desarrollo no implique altos costos de mantenimiento.

El costo es una de las variables más importantes, el presupuesto inicial es de \$ 1,500.000 pesos. Sin embargo, este puede variar en función de costos de la estructura de soporte y la logística para la elaboración y puesta en marcha de la turbina, se ha considerado un incremento sobre el presupuesto de un 30 % es decir \$ 450,000 pesos adicionales. En la sección de costos se tiene el análisis detallado es estos.

El desarrollo de nuevas aplicaciones es una condición determinante al momento de escoger la turbina y el sistema de conversión de energía. El objetivo de este proyecto es desarrollar el sistema integrado de transformación de la energía para

determinar la viabilidad técnica y económica de este y su aplicación en un medio donde tradicionalmente no se las ha implementado.

5.2.2 Canales abiertos del río Magdalena en el atlántico.

Los canales que se disponen en el atlántico tienen como fin primario ser fuentes hídricas para regadío agrícola y ganadero, consumo humano y pesca. Han sido implementados en las décadas del 80 y 90 del siglo pasado. Su estructura básica es tomar agua de algún río y encauzarla hacia una determinada zona, aprovechando el gradiente del terreno y beneficiando de esta manera a determinados grupos de comunas o usuarios agrupados en las llamadas juntas de agua, como también la instalación de grandes bombas de agua a la orilla capaces de bombear el agua hacia una planta de tratamiento. Estas son entes comunitarios encargados de la administración, control y mantenimiento de los recursos hídricos y de los canales de agua asociados a ellos.

De una investigación preliminar se hizo una selección de tres canales de aguas abiertas en los sectores de (Ponederá-Atlántico), (Guáimaro-Magdalena), (Arenal-Bolívar). Estos tienen fácil acceso y cumplen uno de los objetivos de este proyecto de investigación, que es brindar una fuente de energía alternativa utilizando el potencial del agua cuyo fin primario es el regadío, los canales son:

- Canal del río Magdalena (Guáimaro-Magdalena y Ponederá-Atlántico)
- Canal de arroyo grande (Ponederá-Atlántico)
- Canal del dique (Arenal- Bolívar)

El canal del río Magdalena es un canal de aguas abiertas utilizado para múltiples aplicaciones y que está ubicado al este del atlántico y que une a (Ponederá, Atlántico) con el sector del (Guáimaro, Magdalena), con una anchura que está entre los 650 m y 700 m obtenido de google maps y una profundidad cercana a los 50 m, con una velocidad promedio de 1 m/s (según mediciones obtenidas en sitio).



Fig 31. Visita sector de Ponedera, Atlántico. (Fuente: autor).



Fig 32. Visita sector de Guáimaro, Magdalena. (Fuente: autor).

El canal de arroyo grande es un brazo pequeño del río Magdalena que se desvía sobre los lados del pueblo de Ponedera pero que hoy en día (2019) se encuentra a niveles muy bajos y con una corriente de agua muy leve para aplicaciones de tipo energético, su anchura está entre los 70 m y 80 m y profundidad de 5 m, con velocidad promedio de 0.3 m/s (según mediciones en sitio).

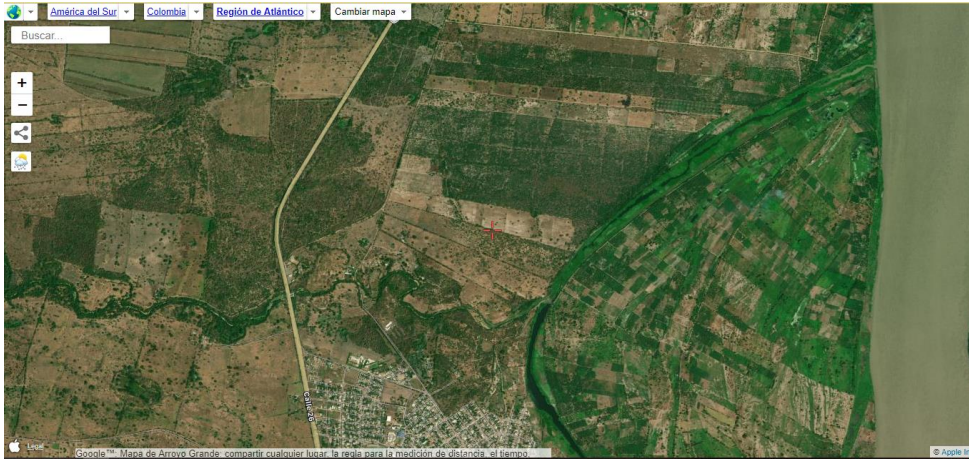


Fig 33. Vista aérea de arroyo grande (Fuente: google maps)

El canal del dique, el cual depende del río Magdalena y que se encuentra en arenal bolívar cuenta con una anchura de aproximadamente 30 m de ancho y 3-4 m de profundidad, con velocidades promedio de entre 0.5 m/s (según mediciones obtenidas en sitio).



Fig 34. Visita al canal del Dique (Fuente: autor)

De los tres canales analizados, se escogió el canal del río Magdalena, ubicado en el sector de Ponedera, Atlántico a costas de Guáimaro, Magdalena.

Zona de ubicación de la turbina hidrocínética.

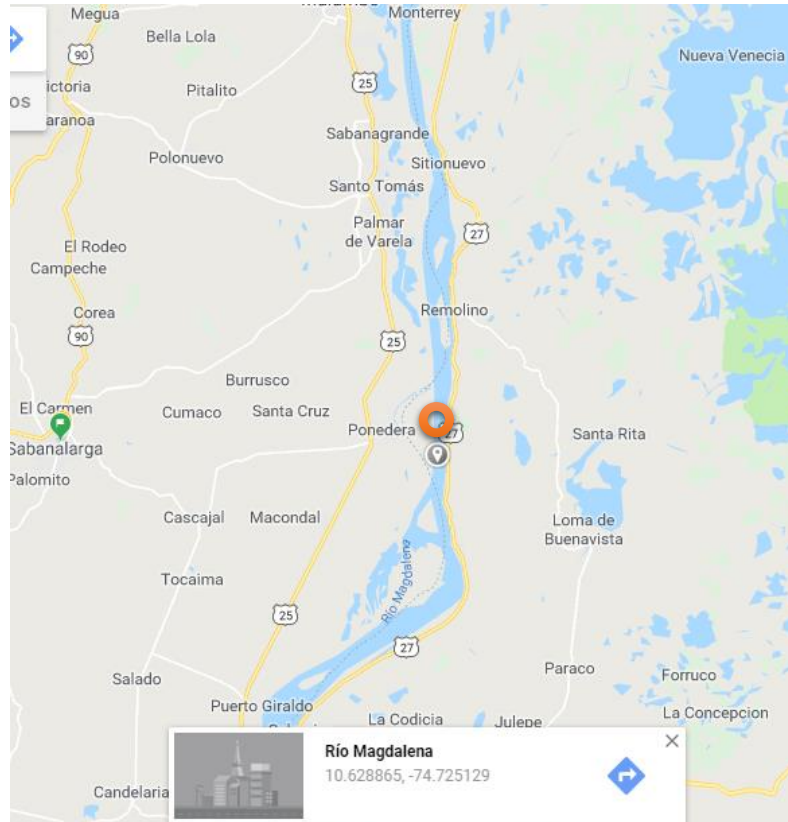


Fig 35. Zona de ubicación de la turbina hidrocínética (Fuente: google maps).

5.2.3 Revisión de los sistemas hidrocínéticos de baja potencia.

Los sistemas hidrocínéticos de baja potencia se refieren en términos generales a turbinas hidrocínéticas que se utilizan en ríos o en ciertas aplicaciones mareomotrices. Una de sus características es no utilizar represas o embalses y se definen como sistemas no convencionales [37]. Para el caso concreto de ríos o canales abiertos estos sistemas siguen una estructura similar a la mostrada en la figura:

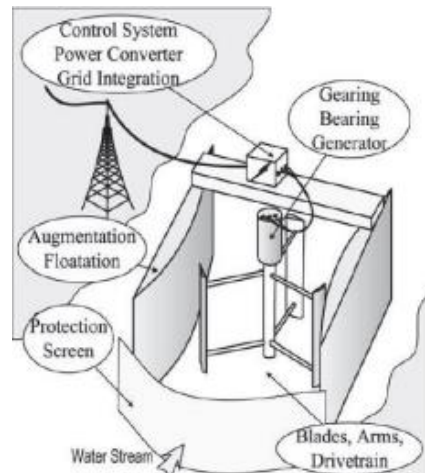


Fig 36. Esquema de un sistema hidrocínético de baja potencia. [26]

Las turbinas que realizan la conversión de energía, se clasifican en dos tipos de acuerdo a la orientación de su eje de rotación:

5.3.3.1 De eje perpendicular al flujo de agua

De menor costo de diseño, instalación y mantenimiento, pero de menor eficiencia, estas turbinas tienen variaciones de velocidad en el flujo que influye en la frecuencia del generador, si se añade un regulador se puede resolver este inconveniente.

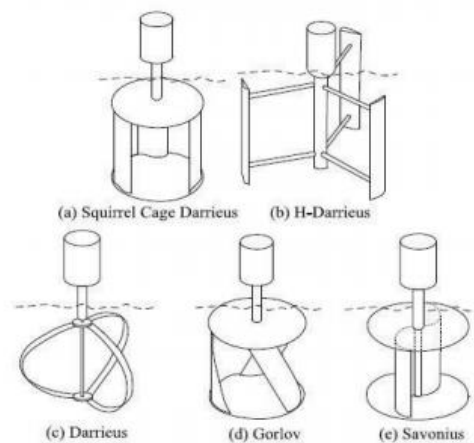


Fig 37. Turbinas de eje perpendicular al flujo de agua. [26]

5.3.3.2 De eje paralelo al flujo de agua

Tienen una alta eficiencia respecto a las otras turbinas y son auto arrancables. Es decir, no necesitan un torque inicial de arranque.

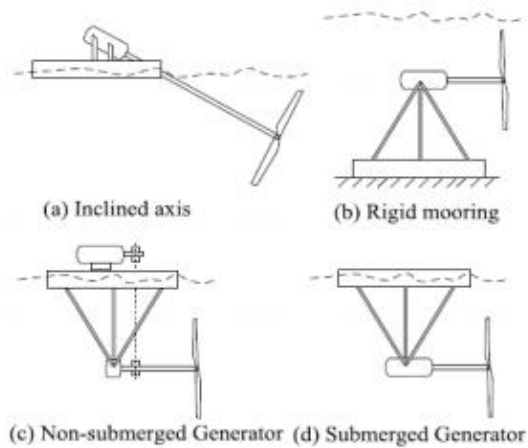

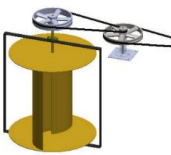



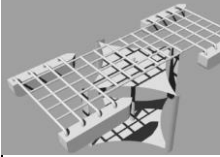
Fig 38. Turbinas de eje perpendicular al flujo de agua. [26]

Un esquema simple, para estas turbinas, incluye un acoplamiento con correa y poleas al generador. Se pueden presentar efectos de cavitación y fatiga de materiales [26], pero con un adecuado diseño de los álabes se los reduce a niveles aceptables.

Considerando la aplicación en el río Magdalena, las ventajas y desventajas, además de evitar sobrecostos en el presupuesto, se elaboró un benchmarking con turbinas realizadas anteriormente por otras investigaciones para comparar y escoger la más indicada, se optó por escoger una turbina Gorlov puesto que es auto arrancable, funciona con velocidades de río lenta (0,8 – 1,2 m/s) y mantiene un giro constante gracias a sus 3 álabes y a su forma helicoidal. (Ver tabla 4)

Tabla 4. Benchmarking turbinas hidrocinéticas.

Proyecto	Numero de alabes	Potencia (KW)	Características
Turbina Gorlov Equipo 2FAE[Fig 36]		5	La turbina helicoidal hidráulica puede alcanzar velocidades de 1800 o 3600 rpm con niveles de agua de tan solo 40 o 70 centímetros, por lo que es conveniente para generar electricidad en ríos de poca profundidad y con velocidades entre 0,8 a 1,5 m/s.
Turbina Savonius Zubialde García [Fig 37]		2	El generador hidrocinético tipo Savonius en un canal de agua artificial de la provincia de Pinar del Río en Chile asumió un coeficiente de potencia de 0,3, se propusieron suministrar 2kw de potencia, para velocidades de río entre 0,6 m/s a 2 m/s y constará de dos palas de acero inoxidable AISI 304 la altura del rotor fue de 0.8 m y anchura de 1,08 m.
Turbina de eje horizontal Eviro gen 005 [Fig 38]		5	La serie EVG 005 están diseñadas para ser fáciles de transportar, montar y desplegar, sin necesidad de grúas u otros equipos pesados, lo que las hace ideales para ubicaciones remotas o donde el acceso al equipo es difícil. Estos sistemas son especialmente adecuados para residencias, granjas, instalaciones remotas y pequeñas comunidades, velocidades de trabajo de 1,5 m/s en adelante.

<p>Turbina Darrieus Chile [Fig 39]</p>		<p>10</p>	<p>La turbina Darrieus, cuenta una velocidad funcional promedio del río es de 1,5 m/s dando como resultado un área frontal para la turbina de 16,2 m² y utilizando un perfil NACA 0015 para los alabes y posteriormente ser fabricados con fibra de carbono y el eje con acero SAE 4340.</p>
--	---	------------------	---

6. PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO

En este capítulo se describe la metodología empleada para calcular la demanda energética y seleccionar la turbina en base a las condiciones del canal del río Magdalena. Se tomó en cuenta las consideraciones descritas en el marco teórico. Disponibilidad energética del canal, para evaluar la disponibilidad energética se debe considerar las condiciones físicas del canal: caudal, velocidad del fluido y número de Reynolds.

6.1 Cálculo de la demanda energética

Uno de los métodos para estimar la demanda de energía eléctrica en un sitio determinado es haciendo un censo del consumo de los electrodomésticos y artefactos en general que posee la población. Este protocolo es empleado no solo para una predicción inicial del consumo, sino también para persuadir a los usuarios en cuanto al ahorro de energía [27].

Una vez conocida la potencia requerida por cada artefacto utilizado en un hogar se procede a calcular su consumo por un tiempo determinado, ya sea un día, una semana o un mes. La unidad estándar en que es medido el consumo es el kilowatt – hora (kWh), y para llegar a ella se debe multiplicar la potencia del elemento por la cantidad de horas que se utiliza en el tiempo a analizar. [28]

Con base a lo anterior, y teniendo en cuenta que se desea realizar un prototipo de turbina, se toman como base ciertos aparatos eléctricos esenciales para un hogar, que tengan un consumo moderado y se plantea una cantidad horaria para cada componente, por tanto, el consumo de energía eléctrica estimado para una vivienda rural cercana al río Magdalena es: (Ver tabla 4)

Tabla 5. Consumo promedio en viviendas rurales.

Consumo energético	Potencia (Kw)	Cantidad	Horas (h)	Consumo días	Consumo mes (KWh/mes)
Tv pequeño (CTR)	0.04	1	2	15	1.5
Foco ahorrador	0.005	2	6	30	1.8
Ventilador	0.030	1	2	30	1.98
Refrigerador pequeño	0.065	1	3	30	5.85
Grabadora	0.015	1	2	12	0.36
Cargador celular	0.007	1	2	20	0.4
				Total consumo (Kwh/mes)	11.89

Comentario [PB1]: En el planteamiento del problema no van tablas

Comentario [PB2]: No queda claro el problema a solucionar-

(Fuente: autor)

Entre tanto, la potencia neta necesaria que necesita extraer la turbina está determinada por la siguiente conversión o ecuación de potencia neta:

$$P_{turbina} = \frac{Kw}{mes} * \frac{1 mes}{30 dias} * \frac{1 dia}{24h} * 10^3 \quad (8)$$

$$P_{turbina} = 11,89 \frac{Kw}{mes} * \frac{1 mes}{30 dias} * \frac{1 dia}{24h} * 10^3 = 16,51 W$$

6.2 Disponibilidad energética del canal

Para evaluar la disponibilidad energética se debe considerar las condiciones físicas del canal: caudal, velocidad del fluido y número de Reynolds.



Fig 39. Río Magdalena (sector guáimaro-ponedera) (fuente: google maps)

El cálculo de la velocidad del fluido se lo hizo mediante una serie de mediciones y se asumió un valor mínimo de velocidad de 0,8 m/s, medio de 1,0 m/s y máximo de 1,2 m/s.

El caudal promedio del río Magdalena es de aproximadamente 8000 m³/s [47], entonces para hallar su altura en el sector, se tiene:

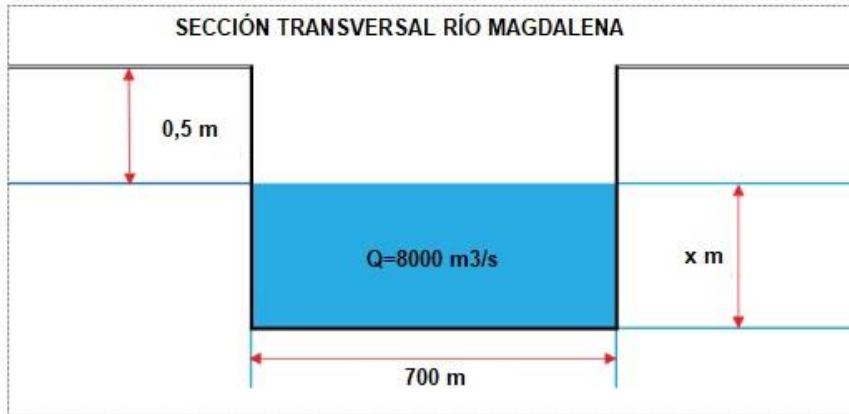


Figura 40. Corte transversal esquemático del río. (Fuente: Los autores)

$$Q = \text{caudal} = b * h * U \text{ [29]}$$

$$h = \frac{Q}{b * U}$$

Donde:

$b = \text{ancho}$

$U = \text{velocidad máxima}$

$$h = \frac{8000 \text{ m}^3}{700 \text{ m} * 1,2 \text{ m/s}}$$

$$H = 9,52 \text{ m}$$

El número de Reynolds toma en cuenta la temperatura y la densidad:

Temperatura: 24°C [30]

Densidad a 24°C: 997,38 kg/m³ [31]

Ancho de la cuerda $C = 0,07 \text{ m}$ o longitud característica transversal de la superficie de cortadura, calculo mostrado posteriormente

Viscosidad dinámica del fluido: 0,000911 kg/m*s [32]

Velocidad del fluido (velocidad promedio): 1,0 m/s (Fuente: autor)

$$Re = \frac{\rho * U * C}{\mu} \text{ (9)}$$

$$Re = \frac{997,38 * 1,0 * 0,07}{0,000911}$$

$$Re = 76.637,32$$

Con este número de Reynolds se tiene un flujo medianamente turbulento [35]

6.3 Análisis de las tecnologías

Una vez analizada las características físicas del canal y realizado un análisis previo del tipo de turbina que se requiere, examinan en detalles las tecnologías de turbinas hidrocinéticas disponibles examinando sus potencialidades y limitaciones, Las turbinas más comunes consideradas para aplicaciones en estos canales son las siguientes:

6.3.1 Turbina Darrieus

Es una turbina de eje vertical, patentada por el francés Georges Darrieus en 1926. Esta fue utilizada como turbina de viento, pero se han desarrollado modelos para mareas y canales, considerando cambios en su solidez, la misma que se define como la relación entre la longitud de la cuerda y el número de álabes, dividido para el diámetro de la turbina [33].

$$\sigma = \text{solidez} = \frac{n * C}{\pi * d} = \frac{n * C}{\pi * 2 * R} \quad (10)$$

Donde:

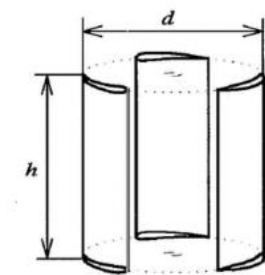
n = número de álabes

C= longitud de cuerda

d = diámetro de la turbina

R= radio de la turbina

Como lo demostró Shiono, estos cambios en la solidez afectan su rendimiento, su máximo valor se alcanza con una solidez de 0,4 [33].



d = diámetro de la turbina

h = altura de los álabes turbina

Figura 41. Esquema de los álabes rectos de una turbina Darrieus.

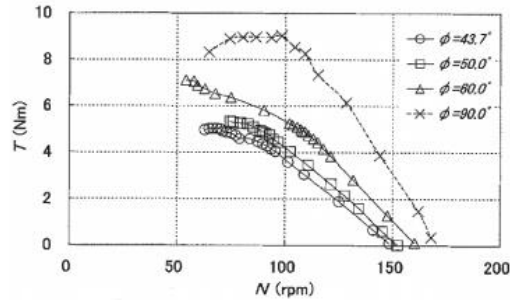


Fig 42. Torques a diferentes velocidades y ángulos de inclinación de los álabes.

Pueden instalarse en forma horizontal o vertical, según algunos autores en la posición horizontal tienen un alto torque y una mayor eficiencia [33]

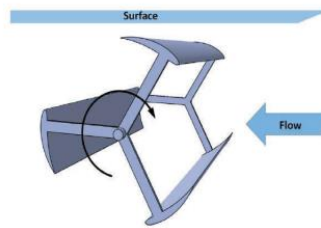
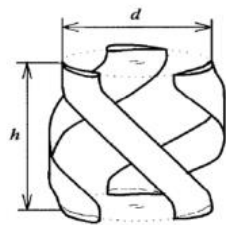


Fig 43. Turbina Darrieus en forma horizontal debajo de la superficie del agua.

Sin embargo, al tener esta turbina la distribución de los álabes rectos, necesita un torque inicial o de arranque, lo que se minimiza con álabes helicoidales. Su rotación de tipo pulsante produce vibración en los álabes y la estructura, con las consecuentes fatigas del material a mediano plazo [33].

La turbina Gorlov se puede considerar un caso particular de una turbina Darrieus con los álabes helicoidales.



d = diámetro de la turbina
 h = altura de los álabes turbina

Figura 44. Esquema de los álabes helicoidales de una turbina Gorlov.

6.3.2 Turbina Gorlov

Esta turbina fue inventada por Alexander Gorlov entre 1996 – 1998. Su característica principal es que tiene los álabes helicoidales y por tanto tiene una mayor capacidad de auto arranque, al mismo tiempo se reducen las fluctuaciones de torque, menor vibración y menor esfuerzo mecánico en sus componentes [34].

6.4 Cálculo de parámetros adimensionales de la turbina

Se realizó un análisis de las ventajas y desventajas de los tipos de turbina analizados en la sección anterior y se decidió implementar una Gorlov, considerando sus parámetros adimensionales, las restricciones de presupuesto y su aplicación.

Para hallar el área efectiva de la turbina, se debe usar la fórmula de la potencia para este tipo de hidro-turbinas, ecuación 7.

$$P = \frac{1}{2} * C_p * \rho * A * U^3$$

Se tiene que:

Potencia = 16,51 w (obtenida de ecuación 8)

Cp máximo = 0,35 [26]

Densidad = 997,38 kg/m³

U = 1,0 m/s

$$16,51 = \frac{1}{2} * 0,35 * 997,38 * A * 1,0^3$$

$$16,51 = 174,5415 * A$$

$$A = 0.095 \text{ m}^2$$

Área que fue distribuida de la siguiente manera para que el Angulo helicoidal quedara de 60° aproximadamente y así aumentara significativamente el rendimiento del dispositivo [51].

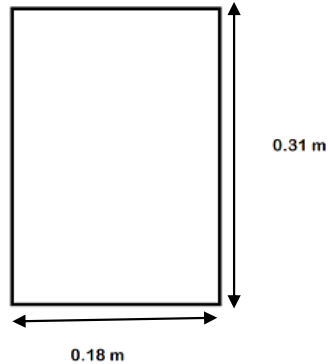


Fig 45. Distribución del área efectiva de la turbina
(Fuente: autor)

TSR (Tip speed ratio)

El análisis del torque de la turbina, depende directamente de la velocidad del fluido, esto incide en el parámetro conocido como velocidad de punta de álabe o Tip Speed Ratio TSR. La forma de calcular esta velocidad viene dada por la fórmula [33]:

$$TSR = \frac{\omega * R}{U} \quad (11)$$

Donde:

ω = Velocidad angular

R= radio

U= velocidad del fluido

Para este caso particular, considerando que la velocidad del fluido U es constante (igual a 1,0 m/s), las dimensiones de la turbina deben estar acorde a las dimensiones del río y que, por supuesto dependen de la potencia a obtener, la cual es de 16,51 W (ver Tabla de consumo), se escogió un valor de diámetro de la turbina de 0,18 m (R=0,9 m) con esto se tiene en la ecuación 13 un valor del TSR dado de:

$$TSR = \frac{\omega * 0,09}{1}$$

$$TSR = \omega * 0,09$$

De acuerdo al trabajo de Mata [35] con una turbina de similares dimensiones, pero con una velocidad del fluido menor U = 0,75 m/s, se estima una velocidad angular de 6,6 rad/s o lo que es lo mismo un TSR de 2. Tomando este valor como referencia, pero con una velocidad U = 1,2 m/s, se obtiene una velocidad angular

$\omega \approx 11 \text{ rad/s}$, es decir $\omega = 105 \text{ RPM}$. Se ha escogido el mismo valor ya que con ese alcanzaríamos el máximo coeficiente de potencia de la turbina, para lo que tendríamos:

$$\text{TSR} = 2 = \omega * 0,09$$

$$\omega = 2/0,09 = 22,22 \text{ rad/s} = 212,20 \text{ rpm}$$

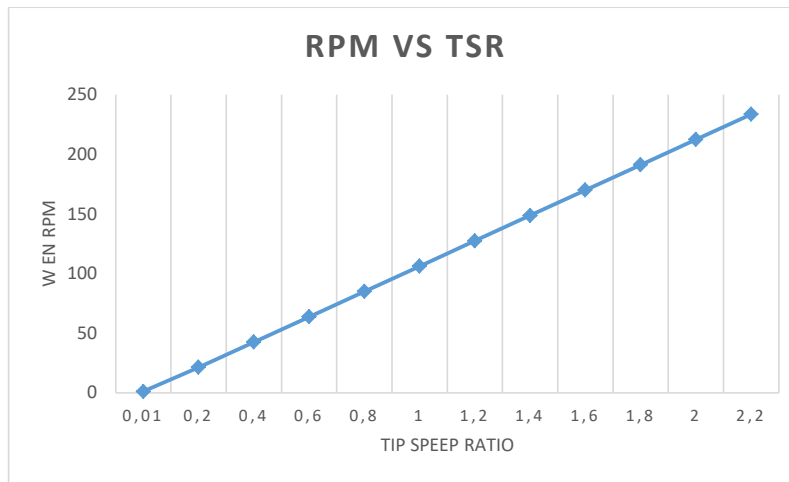


Fig 46. TSR vs ω en turbina Gorlov, velocidad 1,0 m/s y R =0,09 m. (Fuente: autor)

Es decir, con un TSR de 2, en condiciones ideales se tendría una velocidad de 11,11 rad/s, que equivalen a una velocidad de 106,1 RPM. Esto determina también el rendimiento de las turbinas. Khan, Iqbal y Quicoe [26] determinaron las curvas de potencia, y los coeficientes para varios valores de velocidad angular y su correspondiente TSR (este último valor va a depender de las dimensiones de la turbina). De acuerdo a estas curvas, el C_p para un TSR de 2 toma un valor de 0,35 ya que es el mayor obtenido de una turbina Gorlov y no 0,4, ver figura 47. [33]

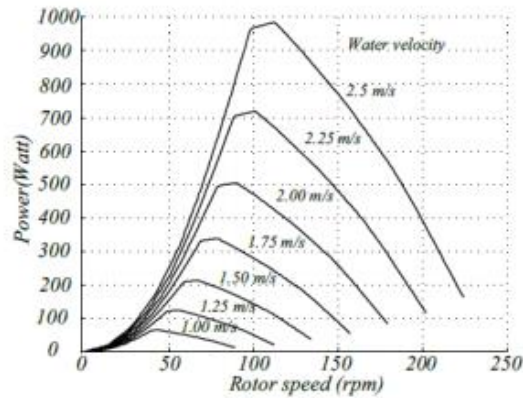


Figura 47. Potencia versus velocidad de rotación para varias velocidades del fluido. [26]

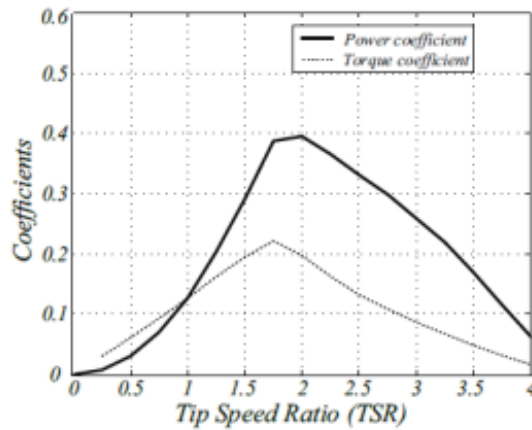


Figura 48. Potencia versus velocidad de rotación para varias velocidades del fluido. [26]

En otras palabras, las restricciones propias del canal, velocidad del fluido, las dimensiones de la turbina, determinan la potencia y el CP (coeficiente de potencia) máximos que se pueden obtener.

Que sería el valor de la potencia teórica obtenida con un CP de 0.35. El valor de la solidez para esta turbina según la ecuación 10 es:

$$\sigma = \frac{n * C}{\pi * d} = \frac{3 * 0,07}{\pi * 2 * 0,09} = 0,37$$

Este es un valor que se consideró adecuado, para evitar que el álabe sea muy frágil y presente problemas de stress y a la vez está cerca del valor de 0.4 que según Shiono [33], determina la máxima eficiencia.

Para escoger el tipo de perfil aerodinámico, que constituye la sección transversal de cada uno de los tres álabes de la turbina Gorlov, se hizo una revisión de la literatura disponible y considerando proyectos similares: fabricación de una turbina por la universidad de Newfoundland, Canadá [36] y de otra, en el departamento de ingeniería mecánica de Kargar Pakistán [37], se escogió un perfil NACA 0020.

Este es un perfil que tiene un ancho del 20% en el 30% de la longitud de la cuerda, ver figura 49. Sobre él, se presentan los coeficientes de empuje y arrastre de acuerdo al ángulo de elevación o declinación del álabe, respecto a su centro de masas y al eje horizontal. Los valores de estos coeficientes vienen dados en tablas o se determinan por programas computacionales como el Java Foil ©.

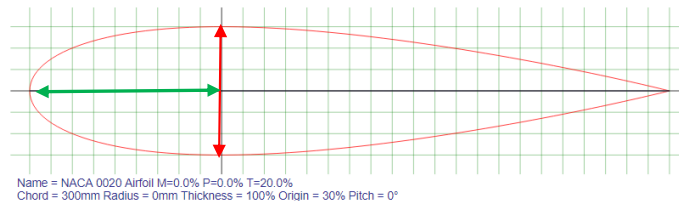


Fig 49. Perfil NACA 0020. (Fuente: <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=naca0020-il>)

Para el ángulo de ataque (α), el cual se forma entre la cuerda del álabe y la velocidad relativa VR como se observa en la figura 49. Se consideró uno de 9° , tomando como referencia el estudio realizado en Newfoundland [36], que toma un ángulo de 9° pero indica que es sujeto a experimentación.

Este ángulo de ataque (α), se lo define en el diseño en el programa Solid Works previo a su construcción.

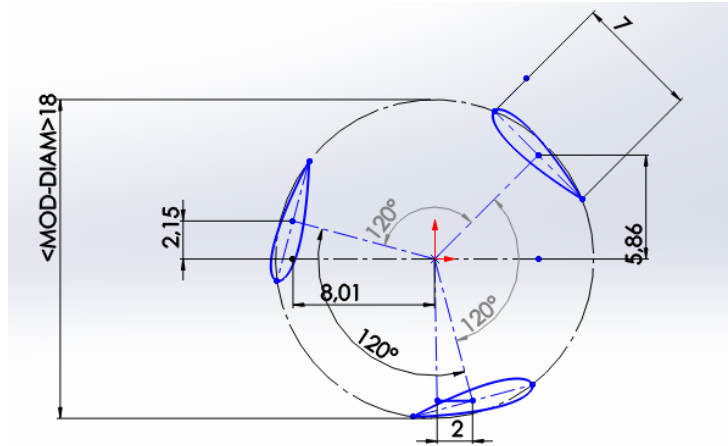


Fig 50. Perfiles NACA en la turbina (Fuente: autor)

El criterio para la selección del número de álabes parte de lo señalado por Anderson, Stelzenmuller, entre otros, [16]. Al incrementarse el número se produce una reducción del rendimiento, ver tabla 4. Por ello, se escogió una turbina de 3 álabes.

Velocidad [m/s]	1,5	1,7	1,9	2,1	Promedio
Tipo					
Turbina de 3 álabes	29,90%	29,10%	29,80%	25,70%	28,60%
Turbina de 6 álabes	24,90%	22,70%	23,50%	22,40%	23,40%

Tabla 6. Rendimiento entre turbinas con diferentes números de álabes y velocidades

Fuente: J. Anderson, N. Stelzenmuller, Capstone Project, [38])

Con estos datos: altura, diámetro y número de álabes, se tiene el ángulo de inclinación o ángulo helicoidal, que se calcula con la ecuación:

$$\varphi = \tan^{-1}\left(\frac{n \cdot h}{\pi \cdot d}\right) \quad (12)$$

n = número de álabes

h = altura de la turbina

d = diámetro de la turbina

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{3 * 0,31}{\pi * 0,19} \right) = 60,88^\circ$$

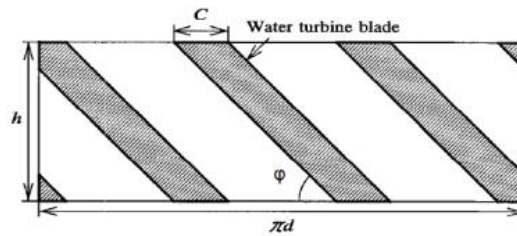


Figura 51. Ángulo helicoidal, relación entre altura y la cuerda para una turbina Gorlov. [33]

Las dimensiones de la turbina Gorlov ha ser implementada se muestran en la tabla 7.

ítem	Parámetro	Dimensión
1	Altura (h) [m]	0,31
2	Diámetro (D) [m]	0,18
3	h/D	1,72
4	Solidez σ	0,37
5	Tipo de alabe	Naca 0020
6	Cuerda [m]	0,07
7	Número de alabes	3
8	Angulo de ataque α [°]	6
9	Angulo de torcedura ψ [°]	120
10	Angulo de la hélice ϕ [°]	60,88

Tabla 7. Dimensiones para la turbina implementada. (fuente: autor)

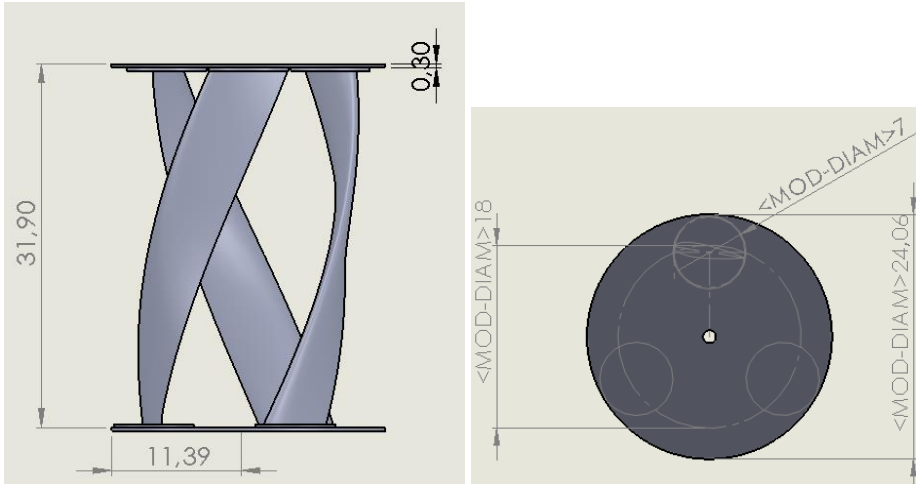


Figura 52. Vista frontal y superior de la turbina.

6.5 Modelación de la turbina.

Se realizaron 2 modelaciones de la turbina y se realizó con 1 programas de computador: Ansys 19.1 ®:

El modelo 1 permite simular el comportamiento de la turbina en las condiciones del canal y observar el comportamiento del fluido, velocidades y presiones. Además, se incluyó aparte otro modelo con un análisis estructural de la turbina para determinar los puntos de mayor presión y fatiga.

6.5.1 Análisis en Ansys

Se utilizó el programa de simulación Ansys versión 19.1, el esquema del modelo 1 se muestra en la figura 53. La geometría de este modelo es una parte clave y por ello fue necesario realizar una independencia de mallado a fin de tener una red con el menor error, para ello se implementó un área de control que a una sección finita de la turbina en 2D, y dos volúmenes de fluidos, uno que está en rotación y uno fijo para poder analizar el comportamiento de la turbina en el canal, ver figura 54.

6.5.1.1 Independencia de mallado

Para llevar a cabo la solución computacional de fluidos, se utilizó un software comercial. Para asegurar la calidad de los resultados, se eligió una configuración triangular, que Permite un mejor acabado en los vértices del dominio. También se realizó un refinamiento para reducir el tamaño de los triángulos cerca a los alabes. El tamaño de la base para la malla se cambió hasta que los resultados el obtenido no dependía del tamaño de la celda (tamaño de la base). La velocidad del agua fue evaluada en un punto para verificar la independencia de la red. El tamaño de los elementos y el error introducido se presentan en la Tabla 7. El error representa la variación entre la ejecución real en comparación con la ejecución anterior. El número de iteraciones requeridas para cada ejecución es un valor representando el esfuerzo computacional.

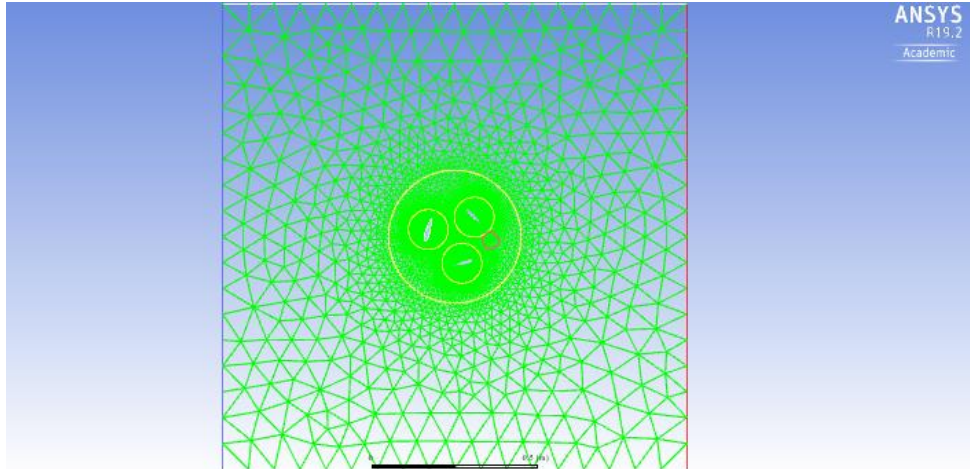


Fig 53. Punto escogido para el análisis.

Run	Tamaño de elemento (m)	A (m/s)	Iteraciones	%error
1	10e-002	5.5654	3000	
2	5,0e-002	2.5289	3000	54,5
3	3,0e-002	1.4023	3000	44,5
4	2,0e-002	1.3312	3000	5
5	1,4688e-002	1.3045	3000	2

Tabla 8. Valores de los diferentes tamaños de elementos y su error.

Se escoge el tamaño de elemento de 1,4688e-002 m, puesto que el error es muy mínimo y en estas instancias la malla es muy fina, por lo que debe escogerse de manera que el computador pueda ejecutar la simulación, la manera en la que se desarrolló en Ansys en la figura 53 y 54.

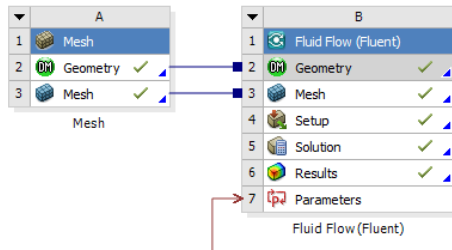


Fig 54. Esquemático del modelo 1 implementado en Ansys ®

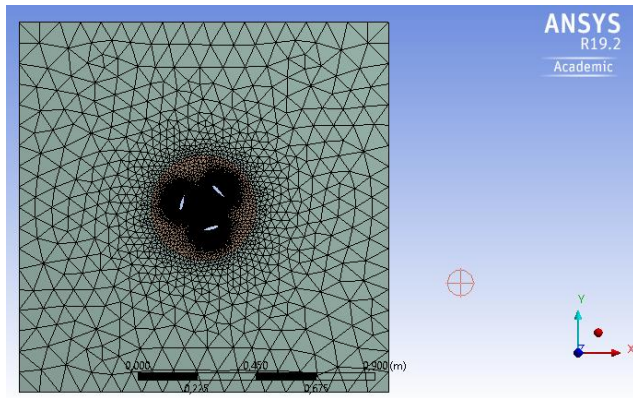


Fig 55. Esquema del área de control y mallado de la turbina.

Tabla 9. Información mallada para fluent.

Nodos	18025
Elementos	25824

(Fuente: Ansys y autor)

El modelo escogido para el análisis de la turbulencia en el Ansys fue el ($k - \epsilon$ épsilon), “modelo que se implementa en la mayoría de los códigos CFD de propósito general y se considera el modelo estándar de la industria. Ha demostrado ser estable, numéricamente robusto y tiene un régimen bien establecido de capacidad predictiva. Para las simulaciones de uso general, el modelo ofrece un buen compromiso en términos de precisión y robustez” [39]. La denominación de k se refiere a la energía cinética de la turbulencia y se define

como: “la varianza de las fluctuaciones de la velocidad, sus dimensiones están dadas en $(L^2 T^{-2})$; Por ejemplo, m^2 / s^2 ”, mientras que ϵ es “la disipación de la turbulencia de Eddy (la rapidez a la cual se disipan las fluctuaciones de velocidad), y tiene dimensiones por unidad de tiempo $(L^2 T^{-3})$, por ejemplo, m^2 / s^3 ” [50].

Para el modelo 2, se elaboró el siguiente esquemático (ver figura x), sometiendo la turbina una presión hidrostática que dependía de la densidad del líquido y de la aceleración de este mismo, el programa tiene en cuenta automáticamente las variables que presenta un fluido como turbulencia.

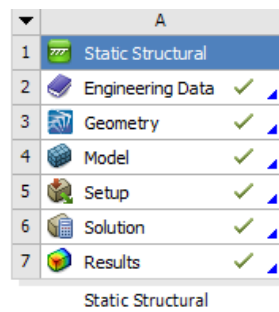


Fig 56. Esquemático del modelo 2 implementado en Ansys

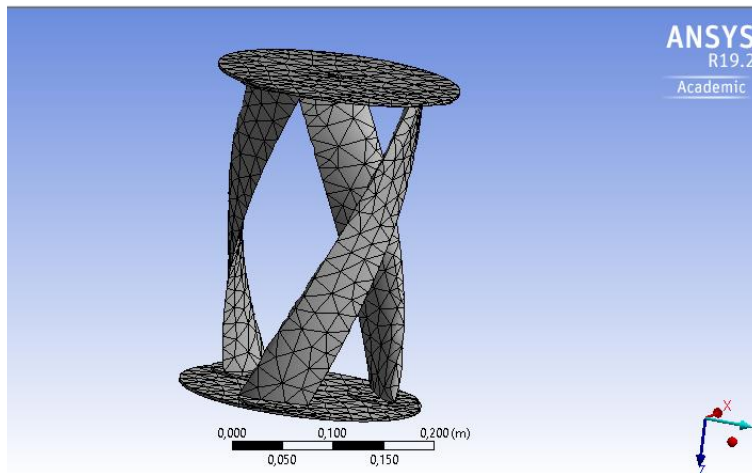


Fig 57. Esquema del mallado de la turbina

Tabla 10. Información del mallado para static structural.

Nodos	5229
Elementos	2340

(Fuente: Ansys y autor)

7. PRESUPUESTO

Teniendo en cuenta los lineamientos de la institución, se elaboró un presupuesto, teniendo en cuenta todos los aspectos económicos necesarios para la realización del proyecto, para ver la cuenta en detalle.

RUBROS	Fuentes de Financiamiento				Total
	Vicerrectoría de Investigaciones y transferencia	INVESTIGADORES	Otras fuentes Externas	Contrapartida UAC	
1. Personal Científico	\$ 0.00	\$ 0.00	\$ 0.00	\$ 8,213,216.00	\$ 8,213,216.0
2. Personal de Apoyo	\$ 1,285,056.00	\$ 0.00	\$ 0.00	\$ 0.00	\$ 1,285,056.0
3. Consultoría especializada y Servicios Técnicos externos	\$ 0.00	\$ 200,000.00	\$ 0.00	\$ 0.00	\$ 200,000.0
4. Materiales e Insumos	\$ 0.00	\$ 435,500.00	\$ 0.00	\$ 0.00	\$ 435,500.0
5. Trabajo de Campo	\$ 0.00	\$ 210,000.00	\$ 0.00	\$ 0.00	\$ 210,000.0
6. Equipos	\$ 0.00	\$ 1,180,000.00	\$ 0.00	\$ 0.00	\$ 1,180,000.0
7. Bibliografía	\$ 0.00	\$ 0.00	\$ 0.00	\$ 0.00	\$ 0.0
8. Material de difusión y Promoción de resultados	\$ 0.00	\$ 0.00	\$ 0.00	\$ 0.00	\$ 0.0
TOTAL PRESUPUESTO DEL PROYECTO	\$ 1,285,056.00	\$ 2,025,500.00	\$ 0.00	\$ 8,213,216.00	\$ 11,523,772.0

8. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

El objetivo final de esta investigación fue la de desarrollar un prototipo de turbina hidráulica para su uso en sectores rurales, el cual se llevó a cabo en 4 etapas, las cuales se encuentran en el siguiente cronograma:

Cronograma de actividades						
Objetivo general	Objetivos específicos	Actividades a realizar	Encargado	Fecha inicio	Fecha final	%
Desarrollo de un prototipo de turbina hidráulica para sectores rurales aledaños al río magdalena.	Realizar un sistema electromecánico para transformación de energía hidráulica en eléctrica.	Visita a diferentes sectores del río magdalena	Estudiante	21 de Agosto 2018	30 de Noviembre de 2018	100%
		Revisión de literatura y comparación de turbinas existentes	Estudiante	10 Mayo de 2018	15 de noviembre de 2018	100%
		Selección de la turbina y diseño CAD	Estudiante	10 de octubre 2018	10 de noviembre de 2018	100%
		Simulación en programa Ansys de la turbina	Estudiante	10 de noviembre de 2018	30 de enero de 2019	100%
		Cotización para impresión 3D de la turbina	Estudiante	10 de noviembre de 2018	10 de enero de 2018	100%
		Impresión 3D	Estudiante	5 de Marzo de 2019	15 de Marzo de 2019	100%
		Diseño sistema de polea y selección del generador eléctrico	Estudiante	10 de Febrero de 2019	25 de Febrero de 2019	100%

		Compra de polea y generador eléctrico	Estudiante	25 de Febrero de 2019	10 de marzo de 2019	100%
		Construcción del sistema turbina, polea y generador	Estudiante	15 de Marzo de 2019	20 de Marzo de 2019	100%
	Construir un sistema electrónico para regulación y control de fuentes de voltaje.	Toma de datos a la salida del generador	Estudiante	1 de Abril de 2019	15 de Abril 2019	100%
		Diseño del circuito controlador	Estudiante	10 de Abril de 2019	15 de Abril de 2019	100%
		Compra de materiales	Estudiante	16 de Abril de 2019	16 de Abril de 2019	100%
		Montaje y prueba del circuito		17 de Abril de 2019	18 de Abril de 2019	100%
	Elaborar carcasa y las partes mecánicas de la turbina para acoplarlo al mecanismo final.	Estudiar dimensionamiento de la turbina	Estudiante	10 de Febrero de 2019	15 de Febrero de 2019	100%
		Diseño CAD de la idea para el montaje de la estructura final completa	Estudiante	10 de Enero de 2019	25 de Febrero de 2019	100%
		Asesoramiento para la selección de elementos mecánicos que permitan acoplar el sistema final	Estudiante	20 de Febrero de 2019	1 de Marzo de 2019	100%
		Compra de los materiales a	Estudiante	5 de Marzo de 2019	10 de Marzo de	100%

		utilizar para el montaje			2019	
		Elaboración de la carcasa y acople del mecanismo final de generación eléctrica	Estudiante	15 de Marzo de 2019	20 de Marzo de 2019	100%
	Validar el funcionamiento del dispositivo en un lugar previamente escogido	Estudiar las condiciones externas del lugar escogido, como seguridad, peligro animal, riesgo para la vida, inestabilidad del agua, riesgo de colapso del sistema al ser un prototipo	Estudiante	15 de Abril de 2019	2 de Mayo de 2019	100%
		Selección de alternativa para validar el funcionamiento	Estudiante	2 de Mayo de 2019	5 de Mayo de 2019	100%
		Montaje del sistema en el laboratorio de control de la UAC	Estudiante	9 de Abril 2019	15 de Abril 2019	100%
		Simulación de condiciones similares al Rio Magdalena	Estudiante	15 de Abril de 2019	2 de Mayo de 2019	100%
		Obtención de resultados de la simulación.	Estudiante	15 de Abril de 2019	2 de Mayo de 2019	100%
		Dar conclusiones y recomendaciones	Estudiante	2 de Mayo de 2019	8 de Mayo de 2019	100%

		nes				
--	--	-----	--	--	--	--

9. IMPLEMENTACIÓN DE LA TURBINA

El diseño de la turbina Gorlov, fue visto en la sección 6.4 de parámetros adimensionales, y sus características se indican en la tabla 6, en el siguiente capítulo, se muestra la construcción de la turbina Gorlov por medio de impresión 3D y su acople al sistema electromecánico de generación de energía, la construcción de la carcasa y los acoples mecánicos necesarios unir todo en un dispositivo final, el desarrollo del circuito regulador de voltaje y el montaje para validar su funcionamiento.

9.1 Fabricación de la turbina en 3D

Para la fabricación de los 3 álabes se consideraron, tres alternativas, considerando la complejidad de su diseño y la precisión, para garantizar el rendimiento de la turbina:

- Acero estándar.
- Aluminio.
- Impresión en 3D, en PLA (Poliácido láctico) o ABS (Acrilonitrilo butadieno Estireno).

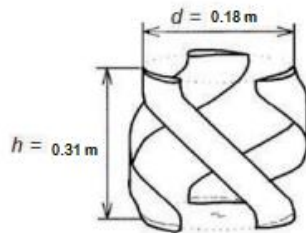


Figura 58. Álabes de dimensiones

turbina Gorlov y implementadas. [33]

La opción de impresión en 3D y corte de las tapas de arriba y abajo en CNC, fue cotizada en la Empresa 3D ingeniería Barranquilla. La mejor opción es fabricar los álabes en PLA, por sus características físicas. El costo vino dado por el tiempo de maquinado para cada uno de los álabes y por la cantidad de material desperdiciado en su elaboración, los álabes son helicoidales con un ángulo de desplazamiento de 120° , es mandatorio utilizar para cada uno de ellos, una sola pieza cilíndrica de metal como materia prima.



Fig 59. Alabes impresos en PLA y tapa maquinada en cnc.
(fuente: autor)

9.2 Integración del sistema electromecánico generador de energía con carcasa y componentes mecánicos.

Para sujetar la turbina y los demás elementos que irán unidos al eje central, son necesario usar 8 roscas hexagonales del tipo zincada USS / WHIT (1") de hierro 1010.



Fig 60. Vista de tuerca hexagonal 1\".
(Fuente: autor)

El eje de la turbina es roscado y está construido en Hierro colado con un diámetro de 1" con una longitud de 1 metro, el cual fue adecuado para montarse en una estructura a través de dos chumaceras NTN UCF205.



Fig 61. Eje roscado acoplado.



Fig 62. Chumacera NTN UCF 205

La estructura fue diseñada y construida por mí, para efectos de pruebas en laboratorio.



Fig 63. Montaje turbina en carcasa de soporte (Fuente: autor)

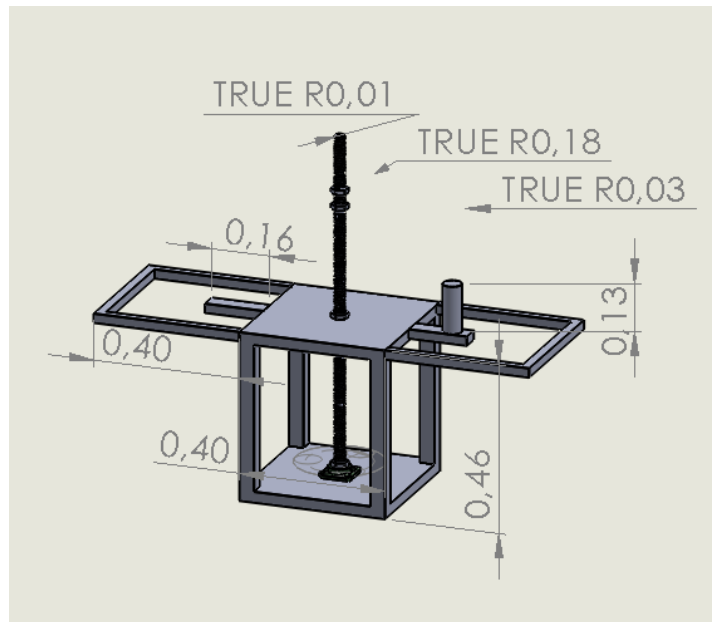


Fig 64. Vista CAD de soporte de turbina. (Fuente: autor)

Para la transmisión de movimiento desde la turbina hacia el generador eléctrico se utilizaros dos poleas de (14 “y 3 “) unidos a través de una correa (34 “), como se indica en la figura 65. Esto permite tener una relación de transmisión de 1 a 5, entre la velocidad de la turbina y la velocidad aplicada al generador eléctrico, que tiene una velocidad operativa de 20 RPM, para empezar a operar adecuadamente (obtenido en laboratorio).

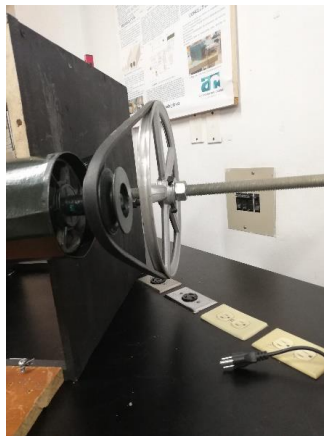


Figura 65. Transmisión entre turbina y generador eléctrico. (Fuente: autor).

Completando así lo que sería el sistema electromecánico de generación de energía y carcasa del sistema integrado. (Ver figura 65).

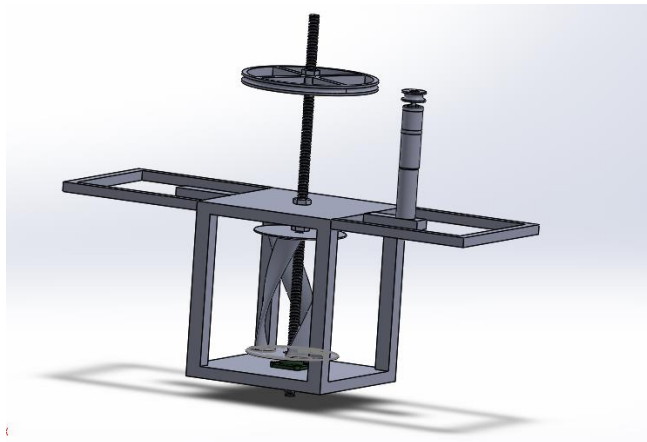


Figura 66. Sistema integrado de generación de energía.

9.3 Construcción circuito regulador de fuente de voltaje.

Para la creación del circuito controlador de voltaje, se tomó en consideración que el voltaje no debía superar los 15 V o por lo menos mantenerse en valores cercanos y que aceptara subidas de hasta 30 V, debido a una aceleración repentina del río Magdalena y por lo tanto del generador eléctrico, se optó por utilizar un diodo zener que es el encargado de mantener el voltaje deseado y este va con una resistencia en serie que se encarga de convertir todo el voltaje sobrante en calor, la instalación del con transistor de paso TIP 41C es para permitir ampliar la corriente de paso que iría hacia el consumo, ya que con un solo diodo, la corriente que se podría consumir sería muy pequeña.

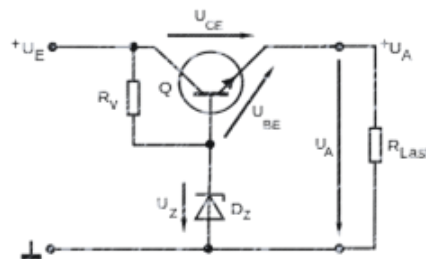


Figura 67. Regulador de voltaje con zener y transistor de paso.
(Fuente: autor)

Datos:

Voltaje máximo = 30 V

Voltaje límite = 15 V

Transistor a utilizar TIP41C NPN ($I_c = 6A$) [40]

Diodo zener = 15 V (1 W)

Corriente máxima diodo zener = $P = I * V = 1 W / 15 V = 0.06 A$

Resistencia a utilizar = $(V_{max} - V_{min}) / Corriente máxima diodo zener$ (13)

Resistencia a utilizar = $30 - 15 / 0.06 = 15 A / 0.06 A = 250 \Omega$ (1 W ó 5W)

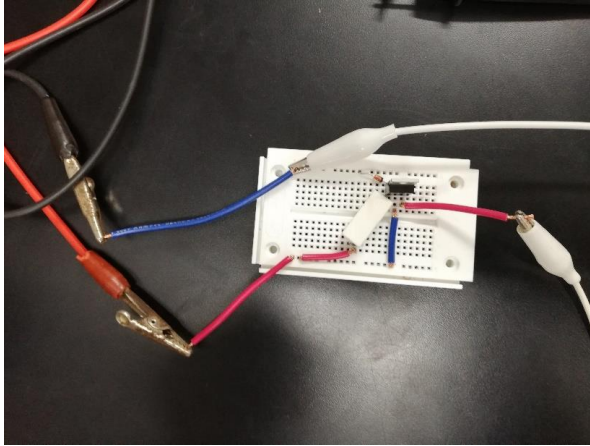


Figura 68. Montaje de circuito regulador en protoboard.

9.4 Montaje de la turbina en el laboratorio.

El motor del laboratorio alimentado a 220 V variables, simuló el comportamiento del río para condiciones de velocidades mínimas (0,8 m/s), medias (1,0 m/s) y máximas (1,2 m/s)

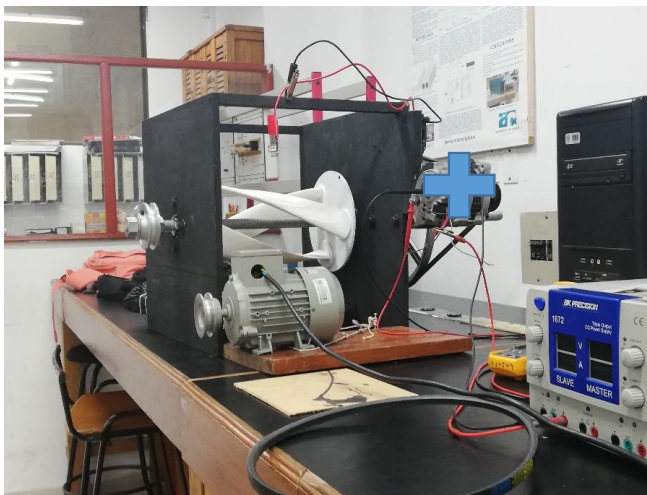


Fig 69. Sistema generador en prueba de laboratorio. (Fuente: autor)

10. RESULTADOS

Se analizan los resultados analíticos del modelo 1 y 2 de la simulación numérica en Ansys. En forma similar se detalla los valores de velocidad, voltaje, corriente y potencia, obtenidos de las pruebas experimentales en laboratorio y se analiza mediante una curva de ingeniería por medio del teorema de PI.

10.1 Resultados simulación modelo 1.

Se escogió el parámetro velocidad del fluido como variable de entrada y se hicieron 3 simulaciones con las velocidades baja, media y mínima que tendría la turbina en el río Magdalena a. En los resultados obtenidos de la simulación numérica, en donde la corriente va de izquierda a derecha, para el primer caso con velocidad baja (ver fig. 69), se puede apreciar un punto con velocidad muy baja en la parte superior del álabe, generando un aumento de presión, lo que provoca un coeficiente de empuje en él, ver figura. En los álabes 2 y 3 se ve la zona de baja velocidad, lo que implica que el álabe está sujeto a un coeficiente de arrastre, ver figuras 70, y 71 para los otros resultados.

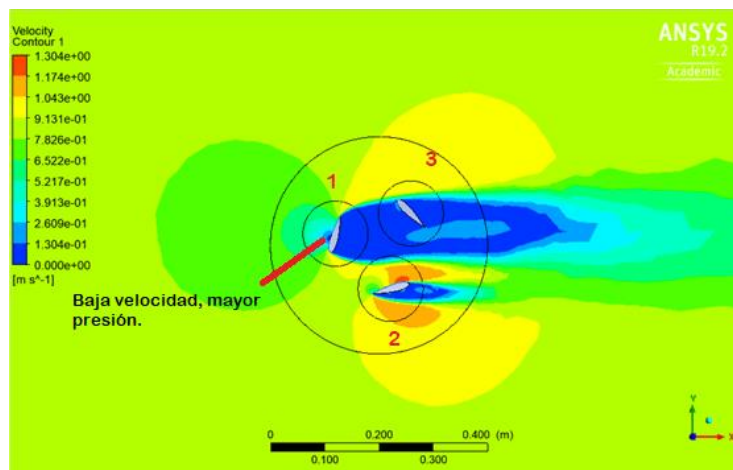


Fig 69. Contorno de velocidades a 0,8 m/s de entrada del río (Fuente: autor)

Para el alabe 1, se observa un punto de flujo lento en la parte superior lo que indica un alto coeficiente de empuje en ese instante.

Para el alabe 2, tiene en la parte inferior un flujo lento lo que indica un coeficiente de arrastre alto en ese instante que impulsa la turbina a girar.
Para el alabe 3, se encuentra en un instante de flujo lento debido a que el alabe 1 lo obstruye, por lo que tiene poco arrastre.

Se tuvieron velocidades máximas de: 1.3 m/s mayores al de entrada.

Se realizaron otras 2 simulaciones con velocidades de 1,0 m/s y de 1,2 m/s, teniendo mismos patrones de comportamiento a diferencia que las magnitudes de las velocidades se ven aumentadas.

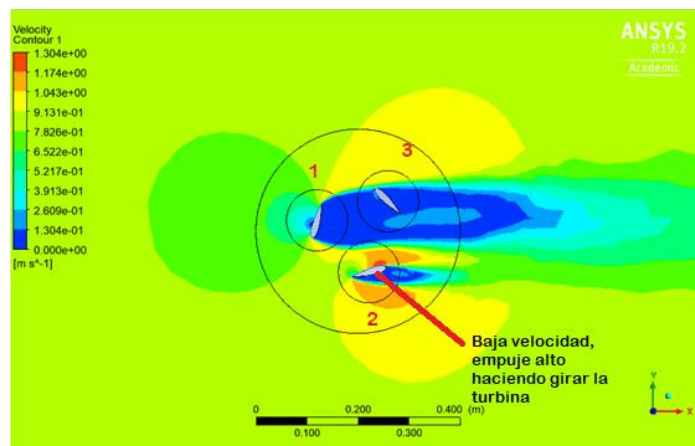


Fig 70. Contorno de velocidades a 1,0 m/s de entrada del río (Fuente: autor)

Se obtuvieron velocidades máximas de: 1.61 m/s mayores al de la entrada.

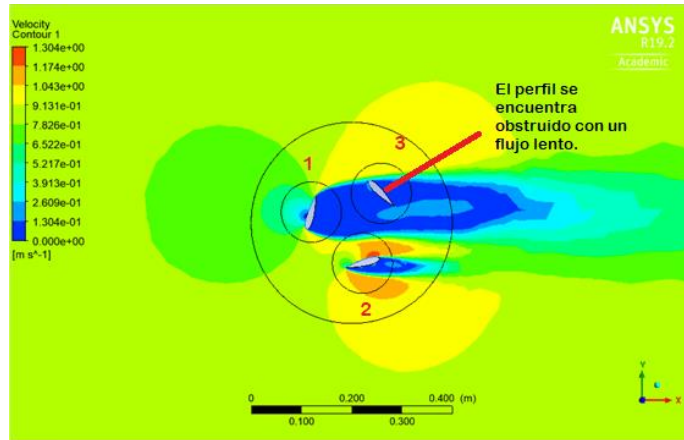


Fig 71. Contorno de velocidades a 1,2 m/s del río (Fuente: autor)

Se obtuvieron velocidades máximas de: 2 m/s mayores al de la entrada.

10.2 Resultados simulación modelo 2.

Se escogió el parámetro presión hidrostática del fluido como variable de entrada y se hizo 1 simulación aplicando una descarga de líquido a una aceleración determinada de un 1 m/s², se tuvo en cuenta que el material era PLA. En los resultados obtenidos de la simulación numérica, se puede apreciar que los puntos de mayor estrés se encuentran justo en los apoyos y que el alabe ante una fuerza desmedida tienen a doblarse en el medio, ver figuras 72, 73.

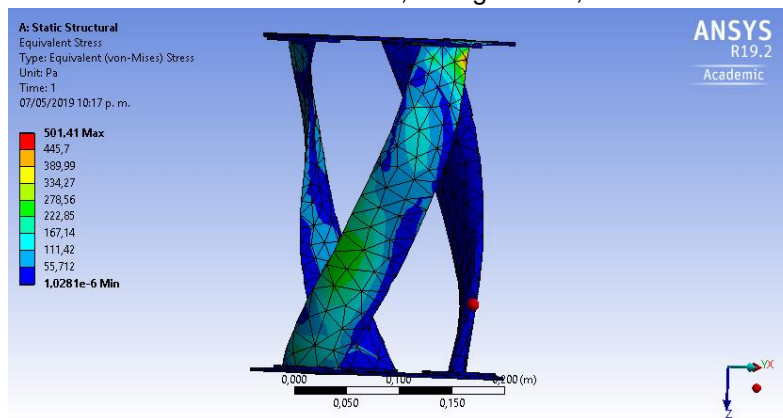


Fig 72. Zonas de mayor estrés de la turbina. (Fuente: autor)

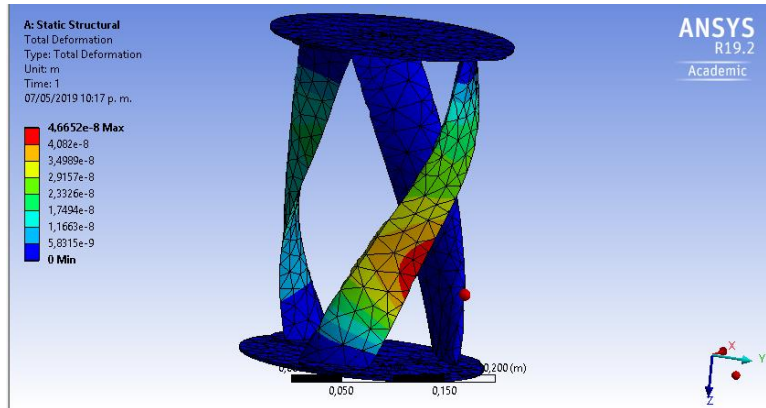


Fig 73. Deformación en turbina (Material PLA) (Fuente: autor)

10.3 Resultados experimentales en laboratorio

Para validar el comportamiento que tendría a 1 m/s se programó el variador de velocidad del PLC de manera que se pudiese ir variando el TSR entre 0,2 y 2, ya que este incide directamente en el coeficiente de potencia, los resultados se tomaron gradualmente a medida que se iba aumentando el TSR, la figura 74 ayuda a ilustrarse, los resultados en la tabla 9 y figura 75 y demás.

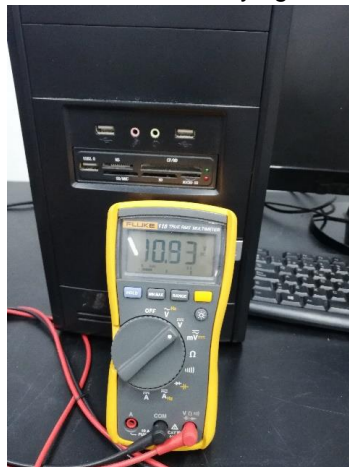


Fig 74. Medición de voltaje en vacío a 1 m/s con un TSR de 1.13 (Fuente: autor)

Tabla 11. Variación de TSR en velocidad de 0.8 m/s (Generador en vacío).

FRECUENCIA VARIADOR- MOTOR (HZ)	RPM TURBINA	VOLTAJE EN VACIO (V)	TSR CORRESPONDIENTE
3	8.6	0.93	0.101415094
3.5	9.5	1.22	0.112028302
4	15.3	2.55	0.180424528
4.5	25.8	3.26	0.304245283
5	29.6	4.54	0.349056604
5.5	43	5.12	0.507075472
6	60.2	6.27	0.70990566
6.5	64	7.44	0.754716981
7	85.9	8.46	1.012971698
7.5	100.3	9.64	1.182783019
8	120.3	10.93	1.418632075
8.5	149.9	11.94	1.767688679
9	199.6	13.11	2.353773585
9.1	222	13.45	2.617924528

La tabla 10, indica que los valores de voltaje cercanos a los 12 V adecuados para cargar una batería, los encontramos al estar la turbina con un TSR entre 1,41 y 1.76.

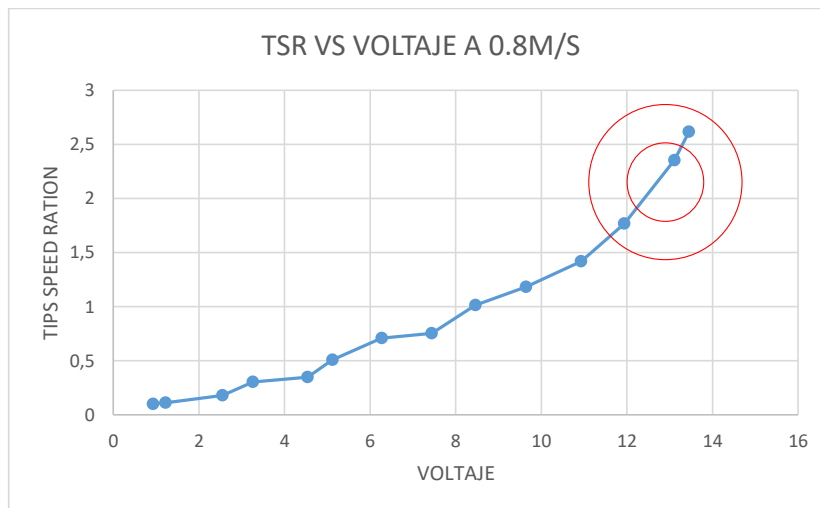


Fig 75. TSR VS VOLTAJE A 0.8 M/S (Fuente: autor)

Tabla 12. Variación de TSR en velocidad de 1 m/s (Generador en vacío).

FRECUENCIA VARIADOR- MOTOR (HZ)	RPM TURBINA	VOLTAJE EN VACIO (V)	TSR CORRESPONDIENTE
3	8.6	0.93	0.08
3.5	9.5	1.22	0.09
4	15.3	2.55	0.14
4.5	25.8	3.26	0.24
5	29.6	4.54	0.28
5.5	43	5.12	0.41
6	60.2	6.27	0.57
6.5	64	7.44	0.60
7	85.9	8.46	0.81
7.5	100.3	9.64	0.95
8	120.3	10.93	1.13
8.5	149.9	11.94	1.41
9	199.6	13.11	1.88
9.1	222	13.45	2.09

La tabla 9, indica que los valores de voltaje cercanos a los 12 V adecuados para cargar una batería, los encontramos al estar la turbina con un TSR entre 1,13 y 2,09.

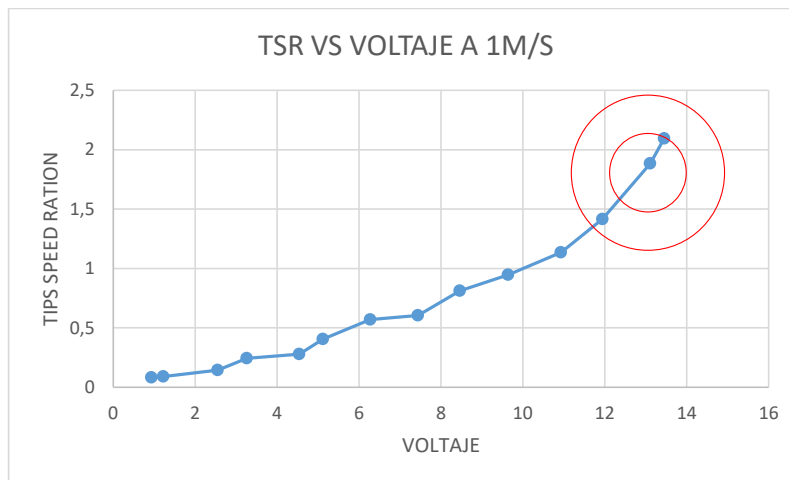


Fig 76. TSR VS VOLTAJE A 1 M/S (Fuente: autor)

En la gráfica se observa más claramente el rango adecuado de TSR para producir voltaje cercano a 12 V.

Tabla 13. Variación de TSR en velocidad de 1.2 m/s (Generador en vacío).

FRECUENCIA VARIADOR- MOTOR (HZ)	RPM TURBINA	VOLTAJE EN VACIO (V)	TSR CORRESPONDIENTE
3	8.6	0.93	0.067610063
3.5	9.5	1.22	0.074685535
4	15.3	2.55	0.120283019
4.5	25.8	3.26	0.202830189
5	29.6	4.54	0.232704403
5.5	43	5.12	0.338050314
6	60.2	6.27	0.47327044
6.5	64	7.44	0.503144654
7	85.9	8.46	0.675314465
7.5	100.3	9.64	0.788522013
8	120.3	10.93	0.945754717
8.5	149.9	11.94	1.178459119
9	199.6	13.11	1.56918239
9.3	266	13.82	2.091194969
9.5	300	14.2	2.358490566

La tabla 10, indica que los valores de voltaje cercanos a los 12 V adecuados para cargar una batería, los encontramos al estar la turbina con un TSR entre 1.17 y 2.09.

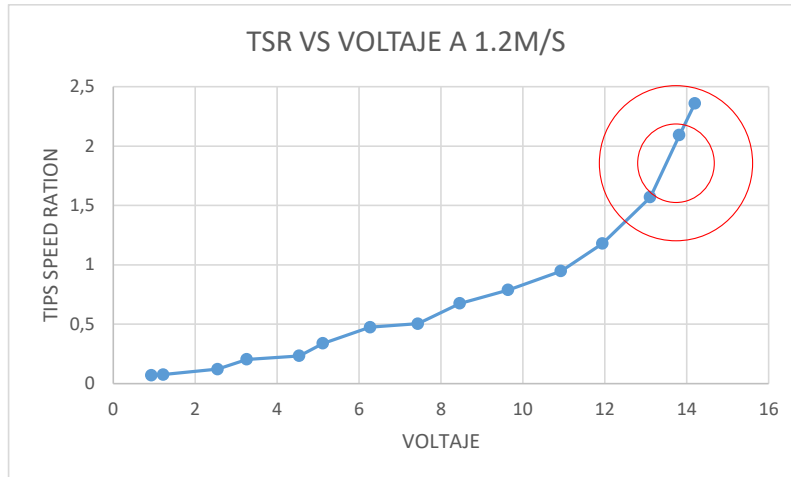


Fig 77. TSR VS VOLTAJE A 1.2 M/S (Fuente: autor)

Posteriormente, se conectó la salida de voltaje del generador a 2 bombillas de 12 V (7w), juntándolas en paralelo tendríamos 14 W, con el cual se pudo validar el funcionamiento del prototipo con consumo cercano a potencia neta necesaria calculada inicialmente con la tabla de consumo energético 16,51 W, teniendo en cuenta que es un prototipo, a continuación, indicadores de corriente y voltaje ver figura 79.



Fig 78. Bombillas led 7w

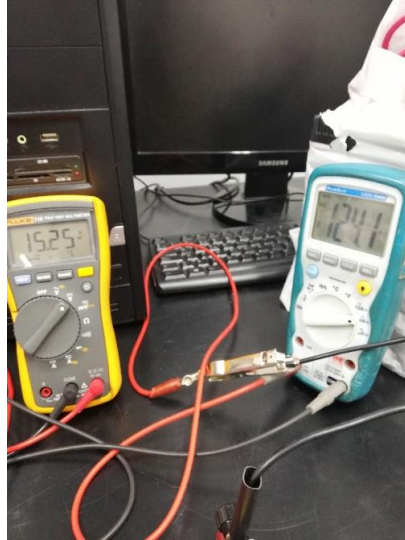


Fig 79. Toma de datos (voltaje y corriente)

Tabla 14. Variación de TSR en velocidad de 1 m/s (Generador con bombillas).

FRECUENCIA VARIADOR- MOTOR (HZ)	RPM TURBINA	VOLTAJE (V)	TSR CORRESPONDIENTE	CORRIENTE (A)	Potencia estimada* (W)
3	8.6	0.93	0.08	0.03699	0.0344
3.5	9.5	1.22	0.09	0.03759	0,04
4	15.3	2.55	0.14	0.0445	0.11
4.5	25.8	3.26	0.24	0.0616	0.19
5	29.6	4.54	0.28	0.0704	0.31
5.5	43	5.12	0.41	0.0773	0.36
6	60.2	6.27	0.57	0.0875	0.5
6.5	64	7.44	0.60	0.094	0.66
7	85.9	8.46	0.81	0.103	0.95
7.5	100.3	9.64	0.95	0.113	1.23
8	120.3	10.93	1.13	0.120	1.31
8.5	149.9	11.94	1.41	0.125	1.49
9	199.6	13.11	1.88	0.130	1.70
9.1	222	13.45	2.09	0.131	0.131

La potencia estimada* es un valor calculado de la corriente obtenida a la salida del generador hacia los bombillos multiplicada por el voltaje de salida, el cual resultó mostrarse pequeño al ser unos bombillos de 7w, los focos en prueba encendieron, lo que indica que el sistema logra suministrar los 14 w que son cercanos a la potencia neta necesaria de 16,51 w.

La tabla 12, indica muestra valores de corriente cercanos, al estar la turbina con un TSR entre 0,95 y 2,09 (ver figura 75).

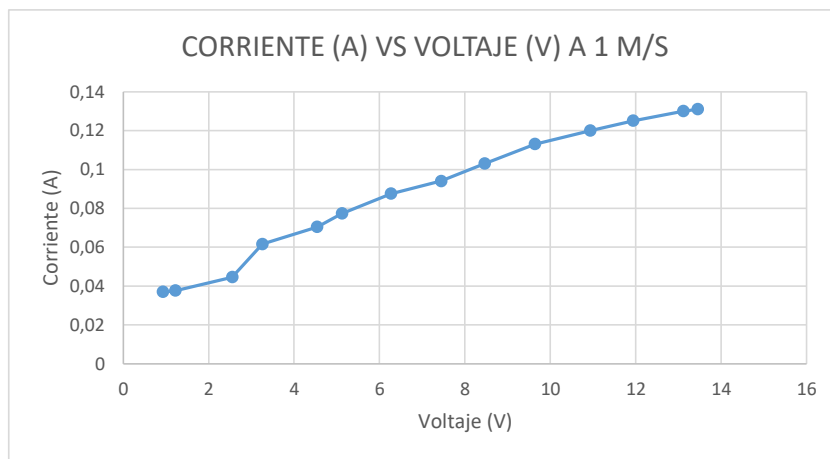


Fig 75. CORRIENTE (A) VS VOLTAJE (V) A 1 M/S (Fuente: autor)

Tabla 15. Variación de TSR en velocidad de 0.8 m/s (Generador con bombillas).

FRECUENCIA VARIADOR-MOTOR (HZ)	RPM TURBINA	VOLTAJE (V)	TSR CORRESPONDIENTE	CORRIENTE (A)	Potencia estimada* (W)
3	8.6	0.93	0.101415094	0.03699	0.0344
3.5	9.5	1.22	0.112028302	0.03759	0,04
4	15.3	2.55	0.180424528	0.0445	0.11
4.5	25.8	3.26	0.304245283	0.0616	0.19
5	29.6	4.54	0.349056604	0.0704	0.31
5.5	43	5.12	0.507075472	0.0773	0.36
6	60.2	6.27	0.70990566	0.0875	0.5
6.5	64	7.44	0.754716981	0.094	0.66
7	85.9	8.46	1.012971698	0.103	0.95
7.5	100.3	9.64	1.182783019	0.113	1.23
8	120.3	10.93	1.418632075	0.12	1.31
8.5	149.9	11.94	1.767688679	0.125	1.49
9	199.6	13.11	2.353773585	0.13	1.7

La tabla 13 indica mejores rendimientos con un TSR máximo, lo que significa un escenario ideal para la turbina a 0,8 m/s (ver figura 76).

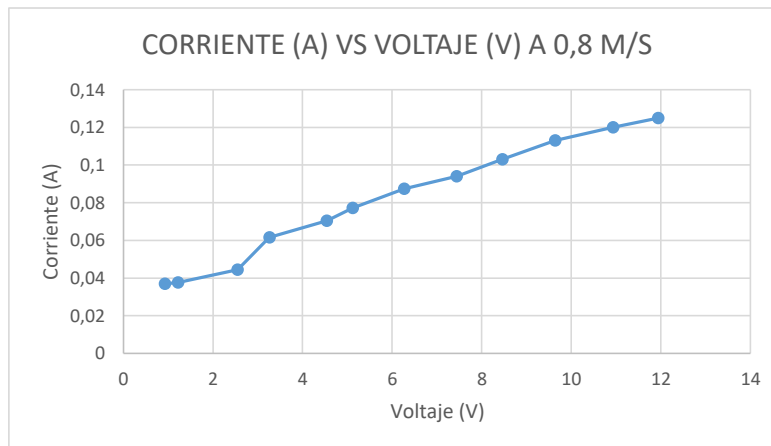


Fig 76. CORRIENTE (A) VS VOLTAJE (V) A 1 M/S (Fuente: autor)

Tabla 16. Variación de TSR en velocidad de 1.2 m/s (Generador con bombillas).

FRECUENCIA VARIADOR- MOTOR (HZ)	RPM TURBINA	VOLTAJE (V)	TSR CORRESPONDIENTE	CORRIENTE (A)	Potencia estimada* (W)
3	8.6	0.93	0.067610063	0.03699	0.0344
3.5	9.5	1.22	0.074685535	0.03759	0,04
4	15.3	2.55	0.120283019	0.0445	0.11
4.5	25.8	3.26	0.202830189	0.0616	0.19
5	29.6	4.54	0.232704403	0.0704	0.31
5.5	43	5.12	0.338050314	0.0773	0.36
6	60.2	6.27	0.47327044	0.0875	0.5
6.5	64	7.44	0.503144654	0.094	0.66
7	85.9	8.46	0.675314465	0.103	0.95
7.5	100.3	9.64	0.788522013	0.113	1.23
8	120.3	10.93	0.945754717	0.12	1.31
8.5	149.9	11.94	1.178459119	0.125	1.49
9	199.6	13.11	1.56918239	0.13	1.7
9.3	266	15.43	2.091194969	0.17	2.62
9.5	300	16.7	2.358490566	0.2	3.34

Para la tabla 15, se aprecian los mejores rendimientos que podría tener la turbina a su velocidad máxima de 1,2 m/s permitiéndose alcanzar altos valores de corriente y voltaje con un rango de TSR considerable de entre 0,6 y 2 (ver figura 77).

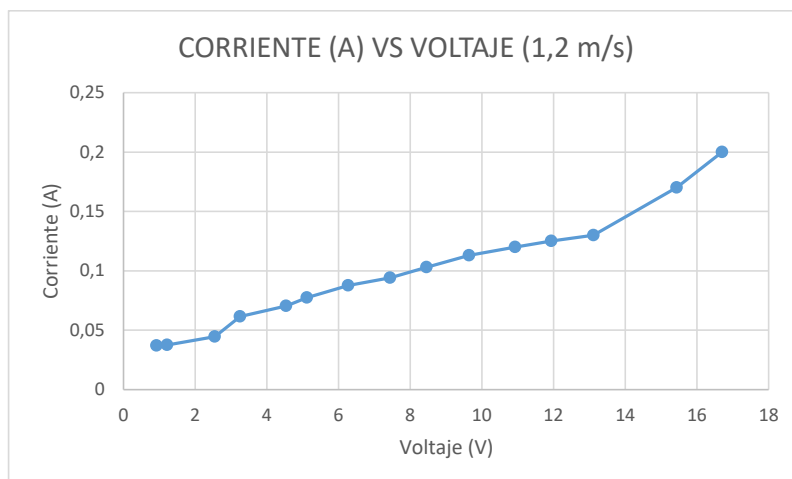


Fig 77. CORRIENTE (A) VS VOLTAJE (V) A 1 M/S (Fuente: autor)

Por otro lado, se tiene una tabla con los valores de voltaje salida generador eléctrico vs salida controlador de voltaje para unos valores mayores a 10V y menores que 20 V para validar su correcto funcionamiento. (Ver tabla 15)

Voltaje salida generador eléctrico	Salida de controlador de voltaje
10.25 V	9.72 V
11.31 V	10.54 V
12.11 V	11.62 V
13.40 V	12.71 V
14.50 V	13.60 V
15.16 V	14.52 V
16.20 V	15.03 V
17.31 V	15.11 V
18.60 V	15.16 V
19.31 V	15.25 V
21 V	15.33 V
22.32 V	15.40 V

Tabla 17. Voltaje de salida generador Vs Salida de controlador de voltaje.

En la tabla 15, tenemos que el circuito regulador empieza a entrar en funcionamiento luego de que la salida de generador empieza a subir de 15 V, el funcionamiento es correcto, aunque no es un 15 V exacto, pero mantiene una salida constante alrededor de ese valor (ver figura 78).

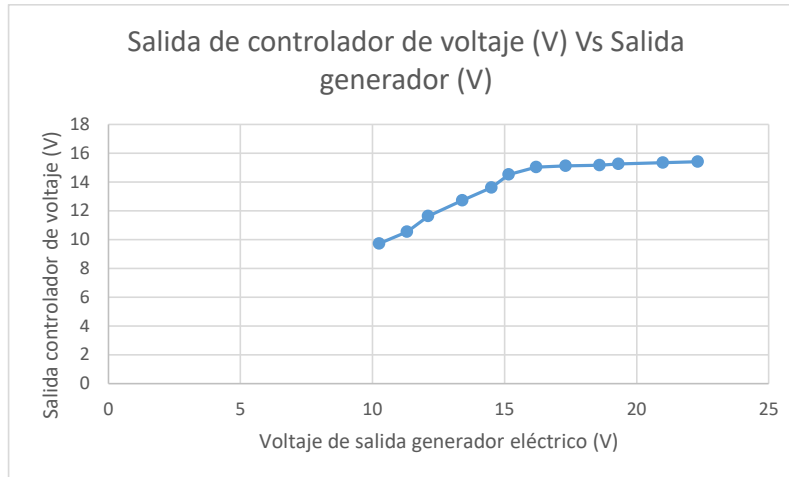


Fig 78. Voltaje de salida generador Vs Salida de controlador de voltaje (Fuente: autor)

10.4 Análisis usando el teorema Pi

Se analiza el comportamiento de la turbina, mediante la obtención de los coeficientes π de Buckingham [35], para obtener un parámetro adicional que nos permita describir su comportamiento en función de las principales variables propias de la turbina y las condiciones y restricciones del canal, se tiene entonces:

$$\pi_1 = p = f(C, \omega, U, \mu, \rho) \quad (14)$$

p = potencia

C = longitud de la cuerda

ω = velocidad angular de la turbina

U = Velocidad del río

μ = Viscosidad dinámica del fluido

ρ = Densidad del agua

Las dimensiones involucradas en estas variables son tres: Longitud L, Masa M y tiempo T, por tanto, $j = 3$. Como se tiene 6 variables:

$$K = J - 6 = 6 - 3 = 3$$

Es decir, existen 3 coeficientes π , para conseguir uno de ellos, que es objeto de nuestro interés, se parte de obtener relaciones adimensionales:

$$p = \pi_1 = (C)^a (\rho)^b (\omega)^c$$

$$M^1L^2T^{-3} = (L)^a(M * L^{-3})^b(L^{-1})^c \quad (15)$$

Resolviendo para cada dimensión se tiene:

$$a = 5$$

$$b = 3$$

$$c = 1$$

Por tanto, el coeficiente:

$$p = \pi_1 = (C)^5(\rho)^3(\omega)^1 \quad (16)$$

Con esta ecuación se obtiene los datos, tabulados en la tabla 16 y cuya gráfica se muestra en la figura 79.

Cuerda del alabe = 0,07m		
W (RAD/S)	RPM TURBINA	POTENCIA (W)
0.90058989	8.6	0.001226045
0.99483767	9.5	0.001652654
1.60221225	15.3	0.006903755
2.70176968	25.8	0.033103219
3.09970475	29.6	0.049990357
4.50294947	43	0.153255642
6.30412926	60.2	0.420533481
6.70206433	64	0.50530201
8.99542696	85.9	1.221773202
10.5033914	100.3	1.94497446
12.5977865	120.3	3.355892078
15.6974913	149.9	6.492560458
20.9020631	199.6	15.32825493
23.2477856	222	21.0896818

Tabla 18. Velocidad angular y potencia para el coeficiente π_1

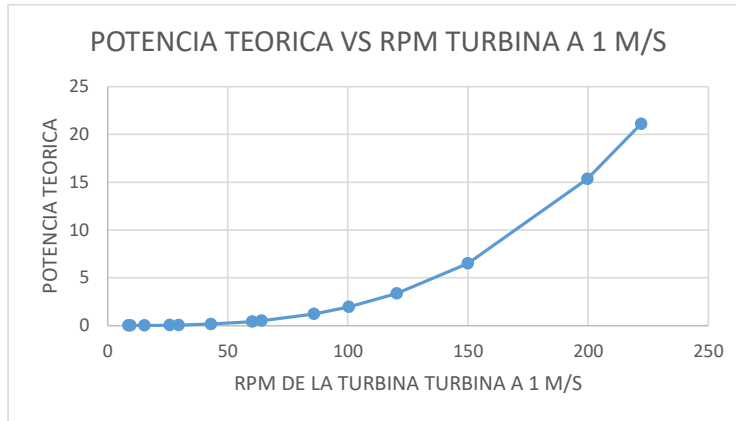


Figura 79. Curva de potencia versus RPM del coeficiente π_1

Se ha graficado la curva teórica obtenida del análisis del coeficiente π de Buckingham y la potencia estimada* con los datos experimentales. Ver figura 80.

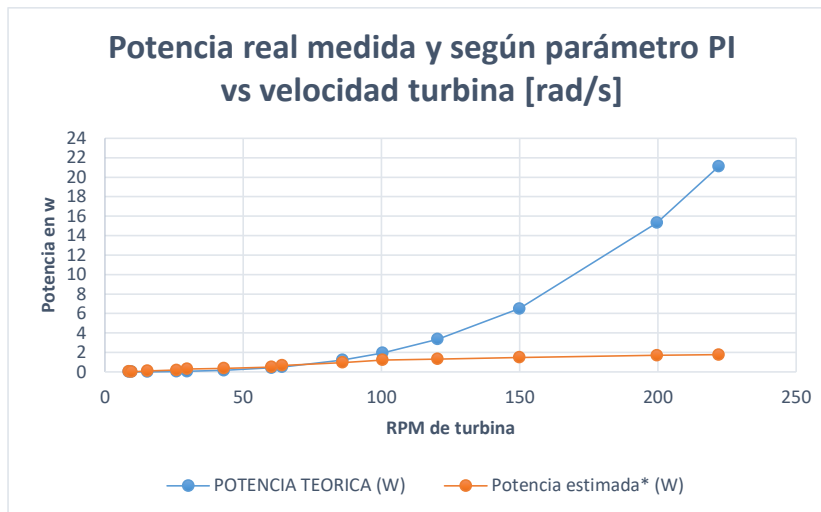


Figura 3.18. Curvas de potencias: real y según parámetro P_i .
(Fuente: autor)

Se puede ver que la curva real la cual es estando conectado el generador a los bombillos que juntos hacen 14 W, tiene cierta limitación en comparación a la teórica. Las diferencias se deben a la resistencia interna de los bombillos y al consumo de este mismo ahorrativo y a factores no considerados como rozamientos del acople, alineación en sitio de la turbina, etc.

11. CONCLUSIONES

- La implementación del prototipo de una turbina Gorlov en un sector a la orilla del río Magdalena para obtener energía renovable de este recurso hídrico, en las actuales circunstancias necesita de una buena inversión para elaborar un dispositivo 100% funcional, debido entre otros factores a los todavía altos costos de desarrollo y manufactura, las limitaciones propias del medio, para la investigación, ejemplo el no contar con un canal de pruebas, con la instrumentación adecuada. Pese a esto constituye una línea de investigación para profundizar en aspectos tales como la modelación de turbo máquinas, el prototipado e inclusive el estudio en detalle de su aplicabilidad, todos estos temas que por su extensión constituyen nuevas líneas de investigación por sí mismas.
- Teniendo en cuenta que el TSR promedio que suelen tener este tipo de turbinas en el río ya funcionando es de 1, en los resultados obtenidos al manejar ese mismo TSR y cantidades cercanas a ese valor se alcanzó a producir 12 V, por lo que es un buen indicador para las instalaciones en el río a futuro.
- La simulación en Ansys®, debido a la complejidad de diseño, y a pesar de emplear el modelo k – ϵ para la turbulencia, presentó dificultades en el mallado y la obtención de resultados para simular el movimiento de la turbina, llegando al límite en el poder computacional disponible y en tiempo razonable de entrega de resultados.
- La construcción del prototipo de la turbina tuvo como componente principal la elaboración de los álabes, estos debido a su tamaño y complejidad se los tuvo que realizar en Solid Works e implementarlo por partes en una impresora 3D. Dividir un alabe en varias secciones para la impresión garantizaba una entrega rápida de los mismos, menos costosos y seguros, ya que la impresión de un alabe completo puede durar hasta 2 días y en eso pueden haber cortes de luz, perjudicando el proyecto y el bolsillo. Más partes pequeñas para un solo componentes implicaban un menor tiempo de maquinado de los mismos, con los consecuentes decrementos en tiempo y costo. Este es uno de los factores que inciden en el precio de desarrollar un prototipo, el cual está sujeto a cambios y modificaciones para optimizar su rendimiento. Este proyecto demuestra que la mejor alternativa para el desarrollo de este tipo de tecnologías es la implementación de modelos a

escala para evitar sobre costos en la impresión 3D y estudios centrados en los álabes, previo a la implementación de una turbina completa y su estructura asociada.

- Las diferentes visitas a sectores del río y a otros cuerpos de agua, permitió identificar con más claridad la zona donde sería ubicada la turbina, ya que en una misma zona de río se pueden presentar disparidades en las velocidades de este, debido a la turbulencia y otros factores como profundidad ya que el río en su interior tiene una forma parabólica.
- Se confirmó la dependencia entre la velocidad angular de la turbina, el TSR y el coeficiente de rendimiento C_p a fin de obtener mucho más voltaje y corriente en las diferentes tablas construidas para los resultados. Se concluye entonces que, para obtener mayores rendimientos y por tanto más potencia útil, se debe incrementar la velocidad angular.
- El generador al empezar a producir energía, se frena un poco y obliga a la turbina a girar más fuerte.
- El sistema electromecánico funciona bien ya que el generador es de tipo dinamo que tiene un momento de inercia bajo.
- Al poner una polea más grande en el eje de la turbina queriendo rapidez en el generador, se aumenta igualmente la fricción en el sistema.
- El circuito hace su función de mantener el voltaje hacia los 15 V, claro que no los da exacto, ya que hay pérdidas.
- Al circuito controlador con diodo zener debe agregársele un transistor para aumentar el paso de corriente a la salida.
- El soporte se construyó satisfactoriamente en madera, pero presentó efectos de vibración fuerte debido al eje roscado.
- El eje roscado fue una buena alternativa, ya que todo el sistema se sujetó mediante roscas, pero al ser de ese tipo no puede desgastar a largo plazo las chumaceras.

12. RECOMENDACIONES

- El montaje realizado de la turbina, acoplada al eje y con la polea sujeta al generador, aporta una gran cantidad de fricción que no es conveniente si se trata de aprovechar la energía del río, se puede evitar, si se plantean al inicio otras alternativas u otros materiales, juntas que no aporten tal cuantía de rozamiento.
- Para romper el momento de inercia de la turbina junto con todo el sistema acoplado, es necesario la instalación de una caja amplificadora que permita facilitar el arranque de esta, ayudando con el torque inicial.
- El funcionamiento del circuito controlador es óptimo, pero debe agregarse a la entrada un circuito rectificador para mantener unas entradas de voltaje más constantes constante.
- Se deben tener en cuenta factores como peligro de vida, inseguridad para realizar el montaje del dispositivo a la orilla del río ya que resulta ser costoso y llevar dispositivos eléctricos sería muy inseguro y además los sectores aledaños al río son muy inestables y existen animales como las rayas de río que son mortales y siendo el río profundo debe estudiarse una forma segura de poder llevar a cabo el acoplamiento final a orilla del río y toma de datos de este.
- Para imprimir la turbina debe tenerse en cuenta el tamaño y la forma que usará la empresa contratada para realizar el trabajo ya que, sin la manera adecuada de hacerse, podría resultar demasiado costoso el proyecto e imposible de realizar.
- Al principio de este proyecto se optó por utilizar un alternador como generador de energía eléctrica siendo esta una decisión equivocada ya que el momento de inercia que tiene este al activarse es demasiado grande, estudiar otros tipos de generadores como dinamos u otros que estén disponibles en el mercado

12. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- [1] VENCE, J. (2016). *CRISIS EN LA COSTA CERIBE DEL SERVICIO DE ENERGIA ELECTRICA PRESTANDO POR LA EMPRESA ELECTRICARIBE* [Ebook]. UNIVERSIDAD SANTO TOMAS. Retrieved from <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/2155/Vencejorge2016.pdf?sequence=1>
- [2] Smart hydro Power. (09 de abril de 2018). obtenido de Smart hydro Power: <http://smart-hydro.de/hydrokinetic-turbines-river-canal/>
- [3] SuZhou Newmeil Machinery, 2kw, 48v dc generator mini hydro axis turbinegenerator [en línea], ¿disponible en:http://www.alibaba.com/product-detail/2kw-48v-dc-generator-minihydro_60230605235.html?spm=a2700.7724857.29.39.iv6z8c
- [4] Energy systems & desing. obtenido de Energy systems & desing: <http://microhydropower.com/our-products/>
- [5] Smart hydro poder. obtenido de Smart hydro poder: <http://smart-hydro.de/hydrokinetic-turbines-river-canal/>
- [6] Eviron génesis 005 <https://www.newenergycorp.ca/envirogen-005-series.html>
- [7]
- [8] (N. Cotella, 2002) diseño y construcción de una microturbina hidráulica de 1 kw (tesis de pregrado). río cuarto (cba.) - argentina: universidad nacional de río cuarto - facultad de ingeniería.
- [9] (N. Cotella P. V., 2006) desarrollo de pico turbinas hidráulicas de reducido costo para generación eléctrica aislada. río cuarto (cba.) - argentina: universidad nacional de río cuarto - facultad de ingeniería.
- [10] Marchegiani, a. Audisio o. (1999) ensayos de una turbina de flujo axial de fabricación local memorias del xiii encuentro latinoamericano y del caribe sobre pequeños aprovechamientos Hidroenergéticos.
- [11] Quispe, f. m. (2005). diseño de una turbina de río para la generación de electricidad en. lima-Perú: universidad nacional mayor de san marcos.
- [12] J. Anderson, B. Hughes, C. Johnson, N. Stelzenmuller L. Sutanto, B. Taylor, «Capstone Project Report: Desing and manufacture of a cross flow helical tidal turbine, » Washington University, Mechanical Engineering Department, Washington, 2011.
- [13] Walterio, p. (2012). "evaluación de una turbina hidrocínética de tipo darrieus para la localidad de melinka" [ebook]. valdivia. retrieved from <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2012/bmfcij.81e/doc/bmfcij.81e.pdf>

[14] Víctor Peña-García. “diseño de una turbina hidro-cinética para aprovechamiento energético de ríos no caudalosos”. universidad de Piura. facultad de ingeniería.

[15] Keough, r., & mullaley, v. (2019). design, fabrication and testing of a water current energy device [ebook]. newfoundland: university of newfoundland. retrieved from

https://www.researchgate.net/profile/prem_baboo/post/what_should_i_consider_during_the_design_and_fabrication_of_water_turbine_system/attachment/59d6289879197b8077986f7f/as%3a331152654127104%401455964353335/download/design-fabrication-and-testing-of-a-water-current-energy-device.pdf

[16] Martínez, e. (2014). diseño y optimización por medio de análisis exergéticos de una turbina hidrocinetica para generación de energía eléctrica a partir de fluidos de bajo caudal. retrieved from <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/7140/tesis.pdf?sequence=1>

[17] García, a. (2014). diseño de un banco de ensayos de turbina hidrocínética tipo Gorlov para el laboratorio de termo-fluidos del instituto universitario de tecnología del estado bolívar, ciudad bolívar, estado bolívar. [ebook]. ciudad bolivar. retrieved from

https://www.researchgate.net/publication/301691585_diseno_de_un_banco_de_ensayos_de_turbina_hidrocinetica_tipo_gorlov_para_el_laboratorio_de_termo-fluidos_del_instituto_universitario_de_tecnologia_del_estado_bolivar_ciudad_bolivar_estado_bolivar

[18] Filali, a. (2015). diseño y cálculo de turbina hidrocínética para ríos [ebook]. retrieved from <https://riull.ull.es/xmlui/handle/915/1429>

[19] Zubialde, i. (2016). título: diseño de una turbina hidrocínética tipo savonius. [ebook]. pinar del río. retrieved from <https://academica-e.unavarra.es/handle/2454/26565>

[20] romero, a. (2016). diseño de una turbina para una pico central hidroeléctrica para las condiciones del río vaupés. bogotá: universidad distrital francisco josé de caldas.

[21] Vasquez, j., & campos, r. (2017). analisis tecnico- economico, diseño y evaluacion experimental de la implementacion de una turbina hidrocinetica para generacion electrica [ebook]. quito. retrieved from <http://repositorio.usfq.edu.ec/bitstream/23000/7442/1/138603.pdf>

[22] Colina, g. (2017). diseño de un rotor hidrocínético tipo gorlov para el suministro de energía eléctrica a una vivienda ubicada en una zona no interconectada del departamento de casanare [ebook]. bogotá. retrieved from

<https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/14490/2018andrescolina.pdf?sequence=1&isallowed=y>

[23] Carrillo, J. (2018). Diseño mecánico de una turbina hidrocínética para generación de energía en la estación de biodiversidad del tiputini. (2018). [ebook]. quito. retrieved from <http://repositorio.usfq.edu.ec/handle/23000/7442>

[24] Chacon, h., & labriola, c. (2018). desarrollo preliminar de turbina hidrocínética flotante para corrientes marítimas y fluviales [ebook]. cordoba. retrieved from https://cadi.org.ar/wp-content/uploads/2018/09/4_cadi_y_10_caedi_paper_208.pdf

[25] Paparazzo, d., & bachi, f. (2018). diseño y estudio numerico de turbina hidrocínética de baja potencia [ebook]. san miguel de tucuman. retrieved from <https://cimec.org.ar/~mstorti/mecom2018/paper-6046.pdf>

[26] Khan m.j., bhuyan g., iqbal m.t., quaicoe j.e., «hydrokinetic energy conversion systems and assessment of horizontal and vertical axis turbines for river and tidal applications: a technology status review, » elsevier: applied energy 86, pp. 1823-1835, 2009

[27] Electricaribe. Consumo de tus electrodomésticos. [En línea] 2010. [Citado el: 20 de 06 de 2018.] <http://www.electricaribe.com/co/hogar/consejos/consejos+de+ahorro+de+energia/1297110312235/consumo+de+tus+electrodomesticos.html>.

[28] Osinerg. Guía para calcular el consumo eléctrico doméstico. Lima : Gerencia fiscalización eléctrica, 2012.

[29] White, f. (2003). fluid mechanics. 5th. boston: mcgraw-hill book company.

[30] Guardianes del agua. «[nuestro río magdalena](#)». sociedad de acueducto, alcantarillado y aseo de barranquilla s.a. e.s.p. archivado desde [el original](#) el 1 de febrero de 2004. consultado el 7 de junio de 2008.

[31] Propiedades del agua en función de la temperatura. (2019). [ebook] (p. 1). retrieved from http://www.vaxasoftware.com/doc_edu/qui/denh2o.pdf.

[32] Viscosidad dinámica del agua líquida a varias temperaturas. (2019). [ebook] (p. 1). retrieved from http://www.vaxasoftware.com/doc_edu/qui/viscoh2o.pdf

[33] M. shiono, k. s. (2002). output characteristics of darrieus water turbines with helical blades for tidal current generation. output characteristics of darrieus water turbines with helical blades for tidal current generation, (págs. 859-864).

[34] Gorlov, Alexander. Helical turbine and fish safety. [En línea] 08 de 2018. [Citado el: 18 de 04 de 2018.]

<http://www.mainetidalpower.com/files/gorlovrevised.pdf>.

[35] Mata, a. (2009). diseño de una turbina hidrocínética para la realización de pruebas en un canal de ensayos hidráulicos, por el centro de investigaciones aplicadas ciap de edelca. puerto ordaz

- [36]** Keough, r. m. (2014). design, fabrication and testing of a water current energy device. saint johns: memorial university of newfoundland.
- [37]** Nasir, b. a. (2014). design considerations of micro-hydro-electric power plant. energy procedia, 50,19-29
- [38]** J. Anderson, B. Hughes, C. Johnson, N. Stelzenmuller L. Sutanto, B. Taylor, «Capstone Project Report: Desing and manufacture of a cross flow helical tidal turbine, » Washington University, Mechanical Engineering Department, Washington, 2011.
- [39]** A. Inc., «Ansys Help. Guía de ayuda para el usuario del programa Ansys,» 2016
- [40]** Complementary power transistors. (2019). [Ebook]. Retrieved from <https://www.st.com/resource/en/datasheet/tip42c.pdf>