

**DISEÑO DE UNA TURBINA PARA IMPLEMENTAR EN FUENTES HÍDRICAS DE
BAJO CAUDAL DENTRO DE ZONAS NO INTERCONECTADAS**

Cardona Moreno Santiago
Corredor Rodríguez Alejandro

Director: Ingeniero Andrés Gerardo Clavijo Vargas

Universidad Santo Tomás
Ingeniería Mecánica
Bogotá D.C.
2020



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
PRIMER CLAUSTRO UNIVERSITARIO DE COLOMBIA
BOGOTÁ



Dedicamos este trabajo a nuestra familia y amigos que siempre nos apoyaron. También a los docentes y compañeros de la Universidad Santo Tomás, la Universidad de Sao Paulo, el Instituto Politécnico Nacional y de nuestros colegios Liceo de Cervantes el Retiro y el IED Colegio Kennedy.

En especial a los ingenieros Felipe de Jesús y Andrés Gerardo Clavijo Vargas. Además de los ingenieros Oscar Mauricio Ochoa y Carlos Andrés Botero que con su ayuda logramos el desarrollo del proyecto en plenitud.

Gracias.



Tabla de contenido

Tabla de contenido	2
Lista de Tablas	3
Lista de Figuras	4
1. Planteamiento del problema.....	6
2. Justificación	7
2.1. Conveniencia.....	7
2.2. Relevancia social	7
3. Objetivos	8
3.1. Objetivo general.....	8
3.2. Objetivos específicos	8
4. Marco referencial	9
4.1. Energía hidráulica	9
4.2. Clasificación y partes de una turbina	10
4.3. Tipos de turbinas hidráulicas e hidro cinéticas.	11
5. Metodología	16
6. Desarrollo.....	18
6.1. Caracterización zona	18
6.1.1. Selección zona hidrográfica.....	18
6.1.2. Zonas factibles para la instalación del proyecto	22
6.2. Metodología de diseño.....	28
6.2.1. Restricciones	28
6.2.2. Especificaciones.....	28
6.2.3. Propuestas de diseño	29
6.2.4. Evaluación de propuestas.....	36
6.3. Elección tipo de turbina	37
6.4. Diseño a detalle de la turbina.....	38
6.4.1. Cálculos rodete.....	41
6.4.2. Diseño del sistema de transmisión.....	51
6.4.3. Diseño de rodamientos, sellos, acoples y tornillería.....	58
6.4.4. Diseño de las carcasas.....	60
6.4.5. Cálculo sección de entrada.....	62
6.4.6. Sistema para salida de agua	63
6.4.7. Sistema de conexión	65
6.4.8. Sistema de flotabilidad y sujeción	66
6.5. Mantenimiento	69
6.6. Resultado final turbina.....	70
6.7. Costos proyecto.....	71
7. Conclusiones	72
Referencias.....	74



Lista de Tablas

Tabla 1. Clasificación de proyectos hidroeléctricos.	9
Tabla 2. Turbinas de impulso, hidro cinéticas y patentes. Recopilación hecha por el autor.	11
Tabla 3. Turbinas hidráulicas del fabricante PowerPal.	15
Tabla 4. Potencial hidroenergético por tipo de central. Fuente: Pontificia Universidad Javeriana.	20
Tabla 5. Regionalización zonas hídricas. [1]	20
Tabla 6. Opciones para el desarrollo del proyecto.....	23
Tabla 7. Elementos esenciales en el diseño de la turbina.	29
Tabla 8. Matriz de Pugh para evaluación de propuestas.....	36
Tabla 9. Datos turbinas.	37
Tabla 10. Datos iniciales.....	39
Tabla 11. Consumo energético	41
Tabla 12. Resumen cálculo de cuerda.....	46
Tabla 13. Perfiles NACA.....	47
Tabla 14. Datos para simulación.....	48
Tabla 15. Análisis de resultados simulaciones NACA 23021 y NACA 63415.....	50
Tabla 16. Materiales de construcción de piezas de la turbina.....	52
Tabla 17. Resultados del estudio de esfuerzos en el eje superior del rodete.	56
Tabla 18. Especificaciones de los engranajes seleccionados.....	57
Tabla 19. Reacciones máximas presentes en los ejes.	59
Tabla 20. Velocidad y presiones teóricas en la turbina.	63
Tabla 21. Datos para el cálculo de flotabilidad.....	66
Tabla 22. Datos para el cálculo de sujeción.....	67
Tabla 23. Especificaciones para cable de acero galvanizado de 7 hilos de grado común. [69] ...	67
Tabla 24. Costos de proyecto.....	71



Lista de Figuras

Figura 1. Partes fundamentales de la turbina. [13]	10
Figura 2. Esquema temático del proyecto	16
Figura 3. Caudal VS Potencia.	18
Figura 4. Sistema interconectado (izquierda) y cobertura total de energía (derecha) en Colombia [1].....	19
Figura 5. Histograma (izquierda) y curva de duración (derecha) del caudal en la región del Orinoco. [1].....	22
Figura 6. Paz de Ariporo. Fuente: Google Maps.	24
Figura 7. Posible punto de instalación. Fuente: Google Maps.	25
Figura 8. Perfil transversal aproximado. Imagen original: Dussaubat-Vargas. [35]	25
Figura 9. Perfil de velocidades en corrientes naturales. [37].....	26
Figura 10. Boceto propuesta 1.	31
Figura 11. Boceto propuesta 2.	32
Figura 12. Boceto propuesta 3.	33
Figura 13. Boceto propuesta 4.	34
Figura 14. Boceto propuesta 5.	35
Figura 15. Boceto propuesta 6.	36
Figura 16. Diseño final turbina.	38
Figura 17. Altura y diámetro de rodete.....	39
Figura 18. Coeficiente de potencia en función de TSR. [60].....	43
Figura 19. Perfiles NACA0021, NACA23021, NACA63415 y NACA662415 (de arriba hacia abajo). [62].....	44
Figura 20. Coeficiente de potencia vs velocidad ideal. [57].....	44
Figura 21. Cl/Cd vs ángulo de ataque para perfiles NACA0021(azul), NACA23021(rojo), NACA63415(gris) y NACA662415(naranja). [62]	45
Figura 22. Perfiles NACA23021 (verde) y NACA63415 (rojo). [62].....	46
Figura 23. Gráfica de velocidad en línea tangente al perfil del alabe NACA 23021 para 50000 y 100000 elementos.	48
Figura 24. Gráfica de presión en línea tangente al perfil del alabe NACA 23021 para 50000 y 100000 elementos.	49
Figura 25. Gráfica de velocidad en línea tangente al perfil del alabe NACA 63415 para 38000 y 168000 elementos.	49
Figura 26. Gráfica de presión en línea tangente al perfil del alabe NACA 63415 para 38000 y 168000 elementos.	50
Figura 27. Sistema de transmisión, rodamientos y sellos	51
Figura 28. Montaje transmisión de potencia.....	54
Figura 29. Diagrama de cuerpo libre del rodete	54
Figura 30. Diagrama de cuerpo libre y resultados de análisis de esfuerzos para el eje rodete - engranaje	55
Figura 31. Diagrama de cuerpo libre engranajes	56
Figura 32. Sistema de transmisión, rodamientos y sellos	58
Figura 33. Explosionado carcasas.....	60



Figura 34. Entrada de la turbina.....	61
Figura 35. Cámara del rodete.....	61
Figura 36. Salida de la turbina	62
Figura 37. Tubo Venturi. [66].....	62
Figura 38. Gráfica de C_p VS λ para turbina con difusor y sin difusor	64
Figura 39. Simulación de diferentes difusores.....	64
Figura 40. Instalación sistema eléctrico de la turbina.....	65
Figura 41. Sistema eléctrico de la turbina.....	66
Figura 42. Coeficiente de arrastre cilindro. [68].....	67
Figura 43. Esquema elementos de flotación e instalación turbina.....	68
Figura 44. Instalación final	70



1. Planteamiento del problema

Las energías renovables han surgido como respuesta a la demanda energética mundial, y también como una alternativa eficiente que no genera grandes impactos ambientales. Por consiguiente, se han creado múltiples sistemas, mecanismos, procesos y dispositivos, cuya finalidad es generar o transformar energía de forma eficiente, segura, limpia y con costos de producción reducidos.

Una de las energías renovables más prometedoras y con gran potencial es la hidráulica. En el 2014 se llegó a un total mundial de capacidad instalada de 1.055 GW, dicha energía en Colombia representa el 64% de todas las fuentes de energía del país, llegando a una capacidad efectiva neta de 10.135 MW ese mismo año [1], valor que en la actualidad sigue en incremento. Según la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME), la demanda energética que requerirá el país para 2030 es de al menos 100.000 GWh/año [2]. Como respuesta, el estado colombiano ha realizado esfuerzos para promoción e incentivación de la producción de energías renovables, implementando herramientas legales o públicas como la ley 1715 de 2014 [3], también ha mostrado un importante apoyo a través de la instalación y puesta en marcha de diversos proyectos, principalmente en zonas rurales o apartadas (siendo estos puntos prioritarios para el desarrollo en departamentos como Santander, Antioquia y Cundinamarca) [4].

A pesar de que en el país hay una amplia cobertura energética (el Ministerio de Minas y Energías hace mención que se cubre el 96,45 % del territorio nacional) [5], existen locaciones en las cuales la red eléctrica convencional es: deficiente, inexistente o costosa, algunas cuentan con un cuerpo de agua cercano, el cual, podría ser aprovechable para proyectos de energía hidráulica.

Para contribuir a la mitigación de la demanda energética causada por los hogares colombianos, aprovechando además fuentes hídricas cercanas. Se diseñará una turbina que haciendo uso del potencial energético de corrientes de agua, genere energía eléctrica suficiente para disminuir el consumo total que se presenta en una casa (según cifras de la UPME se consumen en promedio 112 kWh por mes, en hogares que son habitados por al menos cuatro personas) [6].



2. Justificación

2.1. Conveniencia

En el planeta actualmente existe una gran demanda energética, mantener este sistema energético durante el paso de una o dos generaciones es insostenible, pues contribuye al efecto invernadero, a la contaminación local y a la lluvia ácida. [7] Se pretende que el consumo energético a través de fuentes de energías no renovables disminuya, para ello, en el presente proyecto de grado se propone el diseño de una turbina que sea capaz de suplir o contribuir a la mitigación del consumo energético de una o varias viviendas, reduciendo de esta manera la demanda de producción de energía mediante combustibles fósiles.

2.2. Relevancia social

La energía hidráulica es usada en diferentes lugares del mundo para diversos procesos, entre ellos, los industriales y agroindustriales que benefician a ciudades o pequeñas comunidades que no poseen una cobertura óptima de la red eléctrica. Con el diseño del presente trabajo de grado se pretende impactar de forma positiva en la vida de las personas brindando el diseño de una turbina para la generación de energía, que mejora las condiciones y calidad de vida de las personas que disfrutan de este servicio y además permiten el emprendimiento de proyectos que generen rentabilidad económica; un claro ejemplo es el caso de zonas cafeteras de Honduras y Nicaragua, que hacen uso de sistemas nano-hidráulicos para aplicaciones productivas (pequeños productores de café, lácteos, etc.) y la electrificación de viviendas. [8]



3. Objetivos

3.1. Objetivo general

Diseñar una turbina que aproveche el potencial energético de corrientes de agua y genere suficiente energía eléctrica para contribuir al consumo aproximado de una casa.

3.2. Objetivos específicos

- Establecer las condiciones para las cuales va a trabajar el dispositivo, estudiando las posibles zonas de aplicación del proyecto.
- Determinar qué tipo de turbina y cual sistema de energía hidráulica (mini, micro o pico) es más eficiente y beneficioso para ser utilizado en corrientes de agua en las zonas de aplicación.
- Realizar el diseño a detalle de la turbina, calculando cada uno de los mecanismos que harán parte del dispositivo.
- Analizar el funcionamiento de los álabes por medio de una simulación utilizando dinámica de fluidos computacional (Computational Fluid Dynamics CFD), teniendo en cuenta las condiciones de trabajo.



4. Marco referencial

4.1. Energía hidráulica

La energía hidráulica se refiere al aprovechamiento de la energía potencia¹ que tiene el agua (por diferencia de altura) que se obtiene buscando una caída de agua desde cierta altura a un nivel inferior, la que luego se transforma en energía mecánica (rotación de un eje), con el uso de una rueda hidráulica o turbina [8]. Dependiendo de las condiciones de operación y la cantidad de energía estimada, se clasifica la energía hidráulica en diferentes tipos. Debido a los parámetros establecidos, se utilizarán diferentes clases de turbinas, generadores y otros dispositivos.

4.1.1. Energía hidroeléctrica

La fuerza del agua en movimiento es uno de los recursos energéticos renovables más empleados. Más del 20 por ciento de la electricidad del mundo se origina en las centrales hidroeléctricas [9]. Para generar energía a partir del agua es necesario disponer de un caudal de agua y una diferencia de altura (salto) para producir potencia útil [8], en este caso, en energía eléctrica. A continuación, se mostrarán algunos de los tipos de centrales más comunes, según su capacidad de generación eléctrica.

Inicialmente se explicará el funcionamiento de una central, con la finalidad de abordar mejor el tema. En una central hidroeléctrica la transformación de la energía ocurre de la siguiente forma: en primer lugar, la energía potencial se transforma en cinética a través de las tuberías, cuando el agua pasa por la turbina la energía se transforma en energía cinética de un eje que conectado a un alternador produce la energía eléctrica [10]. Estas centrales tienen la capacidad de generar cantidades considerables de electricidad en forma constante durante ciertos períodos, pero también causan impactos ambientales y sociales como: la obstrucción de la corriente de ríos, la inundación de áreas considerables y la reubicación de comunidades [11]. Según la cantidad de potencia de generación es posible agrupar proyectos hidroeléctricos de la siguiente manera:

Tabla 1. Clasificación de proyectos hidroeléctricos.

Tamaño / Potencia	Usos / Aplicaciones
Nano o Pico: menos de 5 kW	Uso familiar y aplicaciones mecánicas
Micro: de 5 a 100 kW	Red eléctrica comunal (sistema aislado)
Mini: de 100 a 1000 kW	Varias comunidades dentro de un radio de 10 a 40 km, y/o conexión a la red nacional
Pequeña central: de 1 a 5 MW	Una pequeña ciudad y comunidades aledañas, además de conexión a la red.



Para el uso en sistemas domésticos se aplican comúnmente las nano-turbinas, que son pequeños sistemas de energía hidráulica que aprovechan la fuerza de pequeños ríos y quebradas, principalmente para generar energía mecánica. Además, se pueden acoplar estas turbinas con alternadores o generadores de capacidad en el rango de 300 W a 12 voltios, hasta 1 kW a 110 voltios, dependiendo del caudal del agua, la demanda de electricidad y el financiamiento disponible. [12]

Una vez que se cuenta con un determinado caudal es necesario contar con una turbina que se adapte a las condiciones de este, es por esta razón que se procederá a definir las partes y la clasificación de estas, para posteriormente elegir la más adecuada con las condiciones predeterminadas.

4.2. Clasificación y partes de una turbina

En la Figura 1, se muestran las partes fundamentales presentes en las turbinas hidráulicas [13]:

- El eje que es el encargado de transportar la energía mecánica proveniente del rotor.
- El rotor o impulsor: parte móvil que se compone por una rueda con paletas (álabes) o cucharas que rota de manera solidaria con el eje anteriormente mencionado.
- El estator: se encarga de controlar la dirección del fluido transformando la presión de este en velocidad.
- La carcasa: cubre las piezas internas y además puede funcionar como estator sin álbes.

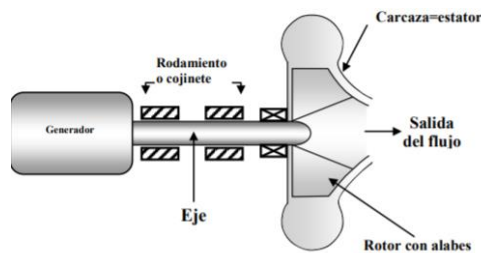


Figura 1. Partes fundamentales de la turbina. [13]

Las turbinas hidráulicas se clasifican en dos grandes grupos [7]:

- Turbinas de reacción: Son máquinas hidráulicas en las cuales el rodete aprovecha la presión ejercida por el fluido a los alabes, en esta clase de turbinas la energía aprovechada es la captada por el rodete en forma de energía cinética; sin embargo, se diferencia de las turbinas de impulso debido a que hay un cambio en la presión importante, que también influye en la conversión de energía. Algunos de los ejemplos más comunes son la Kaplan y Francis.



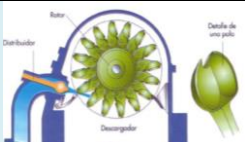
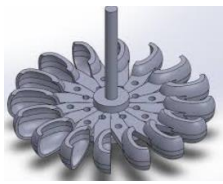
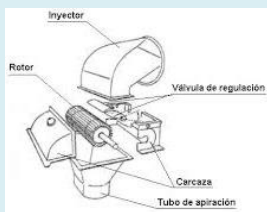
- Turbinas de acción o impulso: En este tipo de turbinas se realiza la conversión de energía cinética a energía mecánica. A causa del aumento de velocidad del flujo provoca la rotación del rodete; sin embargo, la turbina funciona bajo la misma presión (atmosférica) durante todo su funcionamiento.

Se realizará el análisis pertinente para determinar cuál tipo de turbina es mejor para el proyecto a desarrollar.

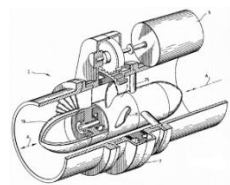
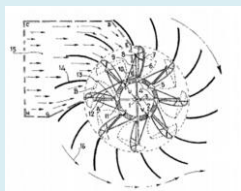
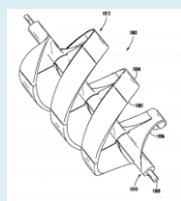
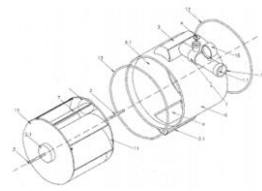
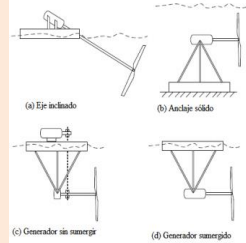
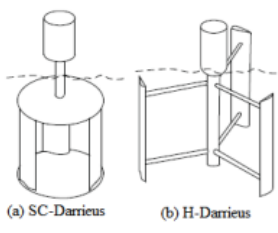
4.3. Tipos de turbinas hidráulicas e hidro cinéticas.

En la Tabla 2, se muestra el estado de arte de las turbinas hidráulicas más utilizadas en la industria. De la siguiente tabla se van a tomar en cuenta varios ejemplos que posiblemente pueden ser implementados en el estudio de caso presentado en este informe.

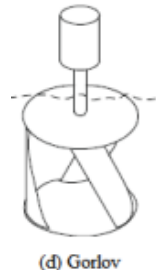
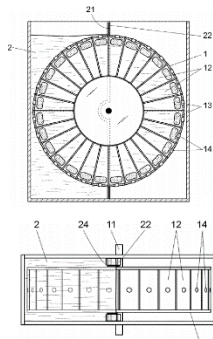
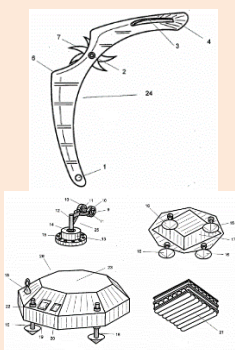
Tabla 2. Turbinas de impulso, hidro cinéticas y patentes. Recopilación hecha por el autor.

Turbina		Características	Ilustración
Turbinas hidráulicas de impulso	Pelton	Turbina de acción de flujo tangencial y admisión parcial. Opera con mayor eficiencia en grandes saltos de agua, caudales bajos y cargas parciales. [14]	
	Turgo	-Diseñada para saltos de desnivel medio. -Turbomáquina de flujo radial, a chorro libre. -Usada mayormente para pequeños aprovechamientos hidroeléctricos. -Se puede montar con eje horizontal y vertical -No necesita una carcasa hermética. [11]	
	Michael Banki	-Turbina de reacción con entrada radial y flujo transversal. -Sencillo diseño y fácil construcción. [12] -La velocidad de giro puede ser seleccionada en un alto rango. -El diámetro de la turbina no depende necesariamente del caudal. -Puede operar en amplios rangos de caudal y altura sin variar apreciablemente su eficiencia. -El caudal y la potencia se pueden ajustar. [15]	
	Girard	Turbina de flujo axial capaz de funcionar con el rodete fuera del agua, cuando este se sumerge la turbina funciona como si fuese de reacción. No se usa en la actualidad. [16]	

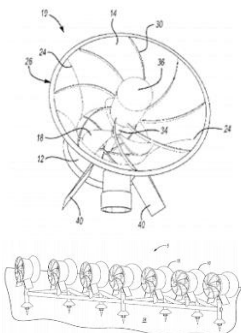
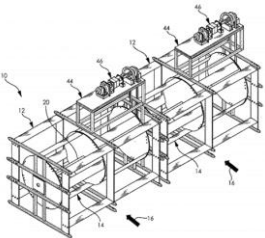
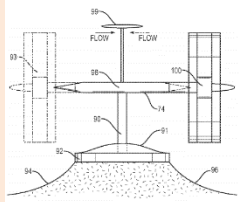


Patentes	Turbina hidráulica plástica	Turbina hidráulica construida principalmente con materiales plásticos, usa agua para lubricar juntas y mecanismos de engranajes. La turbina genera 5 a 30 kW, la construcción de plástico es resistente a los daños de cavitación, corrosión y desgaste. Tiene un engranaje sólido con el rotor, y álabes comunes de una turbina axial. [17]	
	Turbina radial eólica o hidráulica.	Consiste en una turbina radial de disposición vertical, provista de toberas formadas por paredes delgadas verticales y de un rodete que va unido mediante brazos a unos álabes articulados, estos últimos manejan la apertura de manera automática. También se utilizan cables enrollables alojados en depósitos situados en una corona cilíndrica en el centro del rodete, con el fin de ayudar en la apertura. [18]	
	Turbina de tornillo cónico helicoidal	Es una turbina con aspas helicoidales ubicadas en un eje central y una brida que se extiende perpendicularmente a un borde del aspa de la turbina. El tornillo helicoidal puede ser seccionado, dichas secciones cubren un arco radial entre 45° y 180°, y también posee secciones finales cónicas. [19]	
	Turbina de barrido hidráulico avanzada	A través de sus ocho aspas de recorrido amplio y un giro de 90° permite con facilidad la presión necesaria para funcionar eficientemente, cada aspa en el borde posee una ranura con tres orificios y tres resortes permitiendo flexibilidad de adentro hacia afuera y obligando a la junta hacer contacto con el cilindro para sellar la presión del fluido, reduciendo en un 90% las pérdidas por fugas o derrames. [20]	
Turbinas hidro cinéticas	Eje horizontal	La aplicación de este tipo de turbina se presenta con mayor frecuencia en convertidores que utilizan las corrientes oceánicas para la generación. Desde el punto de vista conceptual y de diseño, son similares a las turbinas de generación eólica. [21]	
	Eje Vertical	Su eje de rotación es perpendicular a la dirección del agua, disposición que facilita la colocación de los demás mecanismos requeridos para la generación de energía (el generador, la caja de engranajes, cojinetes) sobre el nivel del agua. [21] Según la geometría de los álabes existen varias clases de este tipo de turbinas, como, Darrieus (Rectos), Gorlov (Helicoidales) y Savonius (Recta / Sesgada). [22]	



Patentes	Turbina Savonius	Esta turbina es de eje vertical fue diseñada por el ingeniero finlandés S.J Savonius en 1922. Consiste básicamente en diseñar dos semicilindros sobre un eje vertical de fácil construcción y con la capacidad de girar sin importar la dirección en la que llegue el agua. [23]	
	Turbina Gorlov	Las turbinas llamadas Gorlov, fueron desarrolladas en la época de los 90 por el profesor Alexander M. Gorlov en Northeastern University. Su característica más llamativa es su rotor helicoidal. Su ventaja con respecto a la tradicional turbina Darrieus, es que reduce la ondulación que se produce en los álabes y que su forma es más amigable con la vida marina que el resto de las turbinas verticales. [23]	
	Prototipo Turbina del INVAP	La empresa INVAP en Argentina, diseñó esta turbina con capacidad de producción de 1 KW, sin embargo, aún no ha sido comercializada. [24]	
	Generador de energía de accionamiento hidráulico	Comprende de una rueda giratoria (1) sobre un eje horizontal (11) introducida en un tanque, dividido en dos mitades; una de las cuales está llena de un líquido (2) (preferiblemente agua). La rueda posee varios compartimientos (12), y en estos compartimientos se encuentran una serie de flotadores (13) que ejercen un impulso hacia arriba a medida que pasan por la mitad del tanque que contiene líquido; generando un primer par de giro en el eje de la rueda. Cuando dichos compartimientos llegan al punto más elevado debido al peso del agua contenido en ellos, y a la fuerza de gravedad, descienden generando un segundo par de giro. [25]	
	Dispositivo sumergible para acoplamiento de turbinas para aprovechamiento energético de una corriente de agua	El dispositivo se compone por un mecanismo (24) en forma de un boomerang además de tener una serie de perfiles (3) que permiten estabilizar y direccionar el dispositivo, también posee un alojamiento para un rotor o algún mecanismo afín (7) para poder obtener energía de una corriente de agua. El mecanismo se acopla a un pivote (25) y este a su vez va fijado a una plataforma (23) la cual es instalada en el lecho marino o fluvial, dicha plataforma posee un tanque de aire presurizado (21) para regular el ascenso del dispositivo en caso de que sea necesario. [26]	



	Estructura y sistema de turbina hidro cinética Patente por: Timothy Smith y Eric Otte	El sistema consiste en varias turbinas colocadas sobre una estructura, cada una posee una entrada para el fluido, direccionándolo hacia los alabes diseñados para rotar en forma de vórtice, también posee aspas de protección justo en la entrada de la turbina para evitar la entrada de objetos que puedan dañar el mecanismo. El agua sale por la parte posterior de la turbina. Tiene un acoplamiento en la parte inferior para ser colocada a la estructura y además posee una serie de aletas o perfiles que estabilizan y permiten el giro de la turbina para impedir daños por cambios de dirección en la corriente. [27]	
	Sistema de turbina hidro cinética con eje horizontal Patente por: V. V. Rjadhaksha, Roger Sam Huff, Mookencheryl P. Cherlan).	Consta de una estructura con un par de turbinas dispuestas de manera horizontal y sus rotores asegurados a los correspondientes ejes. El rotor posee varias aspas separadas, compuestas por espuma (permite la flotabilidad). La estructura es abierta y posee varias partes adaptadas para reducir el coeficiente de arrastre (estas también compuestas por espuma). Las dos turbinas están aseguradas a cada lado de los ejes coaxiales y giran en direcciones opuestas, dichos ejes conducen la fuerza generada por medio de un sistema de transmisión a la parte superior (sobre la superficie del agua) o en la parte inferior (sellado y bajo la superficie del agua). [28]	
	Método y dispositivo de transferencia de energía hidro cinética Patente por: Robert C. Houvener	Se trata de un dispositivo de energía hidrocinética, incluye un rotor con aspas tipo “hidro ala” o aerodeslizador. Diseñado con materiales compuestos y de membrana flexible, con un relativo bajo peso para grandes caudales y bajas velocidades (1-3 m/s) El sistema mide constantemente la corriente, y basado en este ajusta las aspas en tiempo real, además de poder girar según convenga. [29]	

El estado de arte presentado en la Tabla 2, muestra varios aspectos a tomar en cuenta. Primero la escasez de equipos comerciales para su implementación en cuerpos de agua como: ríos, lagos, riachuelos o cascadas. En el mundo son pocas las compañías que prestan servicios o venta de productos relacionados con energía hidráulica micro o pico, en Colombia la ausencia de este tipo de empresas es mayor, a pesar de la variedad hidrológica y el potencial hidroeléctrico de varias fuentes hídricas del país.

En un segundo análisis, los diseños y prototipos derivados de investigaciones o del mismo desarrollo de diferentes proyectos, carece de innovación, creatividad o versatilidad. Muchos de los prototipos y patentes son engorrosamente grandes, complejos, pesados y en algunas ocasiones impertinentes. Algunos casos poseen estructuras grandes, equipos submarinos (con la dificultad de realizar un adecuado mantenimiento o control, además de no tomar en cuenta el tema de



corrosión, desechos y fauna), equipos ineficientes o con requerimientos de caudal y altura neta elevadas.

Una de las pocas empresas que comercializa turbinas para bajos caudales y caídas hidráulicas, corresponde a la empresa PowerPal de Vietnam bajo la supervisión de Phoenix Resources de Canadá. A continuación, en la Tabla 3 se encontrará los valores para la altura, el caudal y energía generada para cada uno de los dispositivos de la empresa PowerPal.

Tabla 3. Turbinas hidráulicas del fabricante PowerPal.

Modelo	H [m]	Q [L/s]	Energía generada [kW]	Turbina
MHG-T8 Turgo	24	33,3	4.7	 [30]
MHG-T2H	24	25	1,9	 [31]
	26		2,4	
	28		2,7	
	30		3,2	
	32		3,5	
MHG-T1	8	21	0,66	 [32]
	9	22	0,78	
	10	23	0,9	
	11		1	
T5-Turgo	11	28	1,5	 [33]
	12	29	1,76	
	12.8	30	2	
MGH-200LH	1.5	35	0,5	 [34]
MGH-500LH		70	0,5	
MGH-1000LH		130	1	

A pesar de que este tipo de turbinas pueden llegar a ser implementadas en ríos o fuentes hídricas de bajo caudal, en ocasiones no son tan eficientes. Además de que algunas requieren de la construcción de pequeños embalses para garantizar su correcto funcionamiento. Sin embargo, los dispositivos mostrados poseen características en las que se puede basar para el diseño, buscando que sea más sencillo, de fácil instalación y eficiente.



5. Metodología

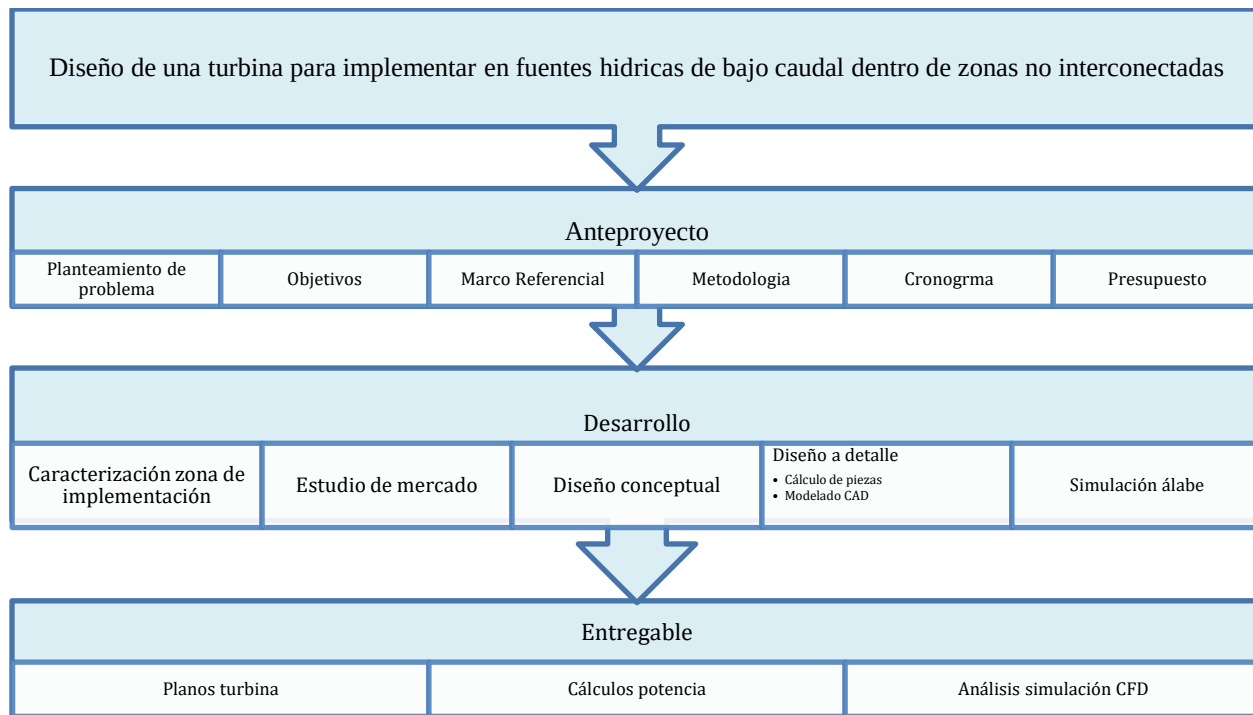


Figura 2. Esquema temático del proyecto

En la Figura 2, se muestran las actividades que necesariamente tienen que ser ejecutadas para cumplir los objetivos de este proyecto, su desarrollo y respectivos entregables; dichas actividades también serán utilizadas para establecer presupuesto y cronograma, las actividades planteadas, son:

1. Estudio de mercado.
2. Caracterización zona de implementación.
3. Establecer parámetros de operación.
4. Selección de turbina.
5. Diseño conceptual.
6. Diseño a detalle.
7. Simulación CFD.
8. Revisión.

Para brindar un mayor detalle sobre el planteamiento de las actividades propuestas, se explica de manera más específica el proceso realizado para el diseño de la turbina:

Con el fin de cumplir con los objetivos mencionados anteriormente, inicialmente se procede con el estudio de mercado que consta de la recolección de información relacionada con el proyecto mediante el uso de patentes, proyectos de grado y productos que se ofertan en el mercado con un



principio de funcionamiento similar o igual a la turbina a diseñar; de esta manera se pueden identificar ventajas, puntos débiles, recomendaciones y requerimientos para lograr una selección de turbina que funcione de manera óptima durante su periodo de operación.

Posteriormente, es necesario establecer las condiciones para las cuales va a trabajar el dispositivo, por esta razón se estudiarán las posibles zonas de aplicación del proyecto mediante una caracterización de la zona de aplicación, lo anterior con la finalidad de determinar en qué departamento del país específicamente se encuentran la mayor cantidad de afluentes aprovechables. Una vez que se ha determinado la zona de aplicación, se procede a establecer los parámetros de operación a los que se verá sometida de la turbina (caudal, presión, velocidad, etc.)

Después de establecer los parámetros de operación de la turbina, se realizará el diseño metodológico empezando con realizar varias propuestas, a través de herramientas como el diagrama morfológico y lluvia de ideas, se selecciona y evalúan todas las propuestas teniendo en cuenta los requerimientos establecidos.

Con una propuesta clara, se avanza hacia el diseño a detalle de la turbina. Se calculan todos los mecanismos que la componen, tanto en estructura como para garantizar el correcto funcionamiento de la misma. Además, se analiza los elementos más críticos sometidos a las diferentes cargas, esfuerzos, teniendo también en cuenta procesos de fabricación, peso, tamaño y especificaciones de operación.

La penúltima actividad contemplada para dar cumplimiento a los objetivos planteados consta del uso de un software con metodología CFD con el cual se pretende someter la geometría de los álabes a simulación bajo condiciones de operación, con la finalidad de optimizar el diseño de este elemento.

Finalmente se prevé una revisión final del proyecto, para la verificación del diseño evitando posibles errores de cálculo u de otra índole.



6. Desarrollo

6.1. Caracterización zona

6.1.1. Selección zona hidrográfica

Para la selección de la zona hidrográfica, se tienen en cuenta una serie de variables relevantes para la instalación de una turbina hidrocinética, algunas de estas variables fueron: caudal, caída hidráulica, potencial hidroenergético, cobertura de energía, topografía, restricciones, etc.

Utilizando como guía el Atlas Hidroenergético de Colombia realizado por la UPME [1], Se analiza el potencial hidroenergético de todas las zonas, el cual depende esencialmente de dos variables: el caudal y la caída hidráulica. Como se puede observar en la Figura 3, cuanto más se aumenta la caída hidráulica o el caudal así mismo aumenta la potencia. Además, la gráfica permite limitar ciertos parámetros del proyecto: la potencia del dispositivo corresponderá a un proyecto de tipo: pico (no superará aproximadamente los 5 kW), lógicamente esta potencia será variable dependiendo del caudal y la caída hidráulica; sin embargo, para la delimitación de la zona hidrográfica se buscan fuentes hídricas con caudales entre 0 – 5 m³/s y caídas hidráulicas de hasta 10 m.

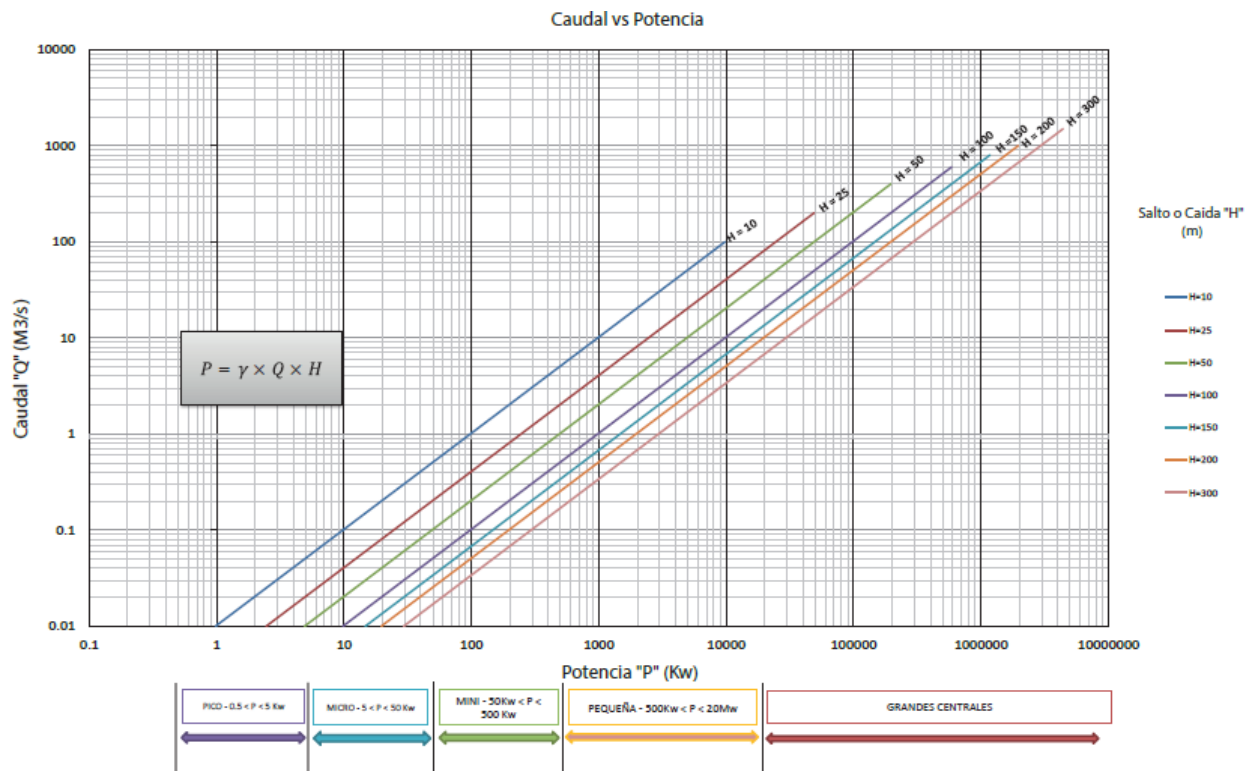


Figura 3. Caudal VS Potencia.



Posteriormente se analizan las zonas posibles de implementación para consecuentemente obtener los datos de caudales de ríos pertenecientes a las zonas predeterminadas, con el fin de establecer los parámetros bajo los cuales trabaja la turbina. Realizando un ejercicio deductivo, se partió de un ámbito general (Colombia) a un ámbito particular (posibles zonas de implementación como: ríos, riachuelos o cuerpos de agua similares).

En una primera instancia se considera que el proyecto tiene como una de sus prioridades que tenga un alcance para las zonas no interconectadas (ZNI), debido a que son lugares donde usualmente los servicios públicos son escasos, generando pobreza y existiendo condiciones de calidad de vida bastante precarias. En la Figura 4 se observan dos mapas de Colombia indicando los departamentos del país donde está instalado el sistema interconectado (izquierda) y el porcentaje de viviendas que cuenta con el servicio de energía también por departamentos (derecha), basados en estos datos se considera que las regiones más críticas son: Pacífico, Amazonia y Orinoquia. Los departamentos correspondientes a estas regiones no cuentan con acceso a la red interconectada. Además, en dichos departamentos, menos del 70% de las viviendas cuenta con cobertura de energía.

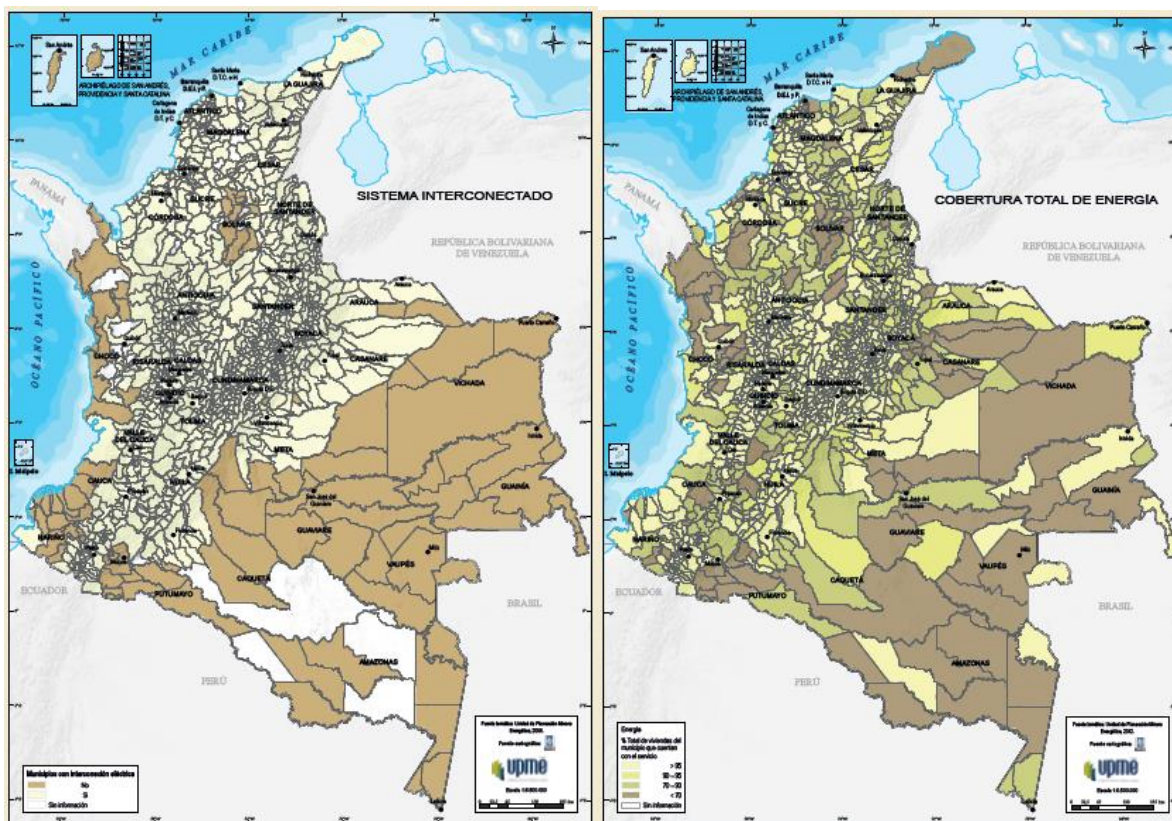


Figura 4. Sistema interconectado (izquierda) y cobertura total de energía (derecha) en Colombia [1]



Posteriormente se procede a delimitar aún más la zona de estudio, se decide continuar con escoger una única región, basados en aspectos más técnicos como el potencial hidroenergético. La UPME en un ejercicio muy provechoso para el estudio de proyectos hidroenergéticos, desarrollo el modelamiento de las zonas hídricas del país, como resultado adicional se obtuvieron datos interesantes como el caudal aproximado y el potencial hidroenergético; este último se muestra en la Tabla 4 [1]. En dicha tabla se presenta el potencial hidroenergético para diferentes tipos de centrales, en nuestro caso es de interés las centrales pico. Entre las tres regiones antes seleccionadas, la región del Orinoco es la que posee mayor potencial hidroenergético para proyectos de tipo pico, con un valor de: 360 MW.

Tabla 4. Potencial hidroenergético por tipo de central. Fuente: Pontificia Universidad Javeriana.

Area hidrográfica	Tipo de central					
	Pico	Micro	Mini	Pequeñas	Grandes	
					20 - 40 MW	> 40 MW
Amazonas	285	2.799	26.948	903.311	1'518.300	9'522.541
Caribe	210	1.935	16.843	436.476	749.309	2'922.066
Magdalena Cauca	514	5.229	47.567	1'646.204	2'808.652	17'713.622
Orinoco	360	3.599	35.789	1'230.958	2'205.013	10'227.236
Pacífico	165	1.647	15.984	568.657	831.949	2'743.598
Total	1.533	15.209	143.132	4'785.606	8'113.222	43'129.063

Para continuar con la delimitación de la zona de implementación del presente proyecto, cabe resaltar que la UPME, realizó un estudio de regionalización de las diferentes zonas hídricas del país. En el Atlas de potencial hidroenergético de Colombia, se establecieron 17 zonas a partir de 5 regiones del país, tal y como se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5. Regionalización zonas hídricas. [1]

AH	Nombre AH	ZH	Nombre ZH
1	Caribe	11	Atrato – Darién
		12	Caribe – Litoral
		13	Sinú
		15	Caribe – Guajira
		16	Catatumbo
		17	Islas del Caribe
2	Magdalena Cauca	21	Alto Magdalena
		22	Saldaña
		23	Medio Magdalena
		24	Sogamoso



		25	Bajo Magdalena – Cauca – San Jorge
		26	Cauca
		27	Nechi
		28	Cesar
		29	Bajo Magdalena
3	Orinoco	31	Inírida
		32	Guaviare
		33	Vichada
		34	Tomo
		35	Meta
		36	Casanare
		37	Arauca
		38	Orinoco Directos
		39	Apure
		41	Guainía
		42	Vaupés
		43	Apaporis
		44	Caquetá
		45	Yarí
		46	Caguán
		47	Putumayo
		48	Amazonas – Directos
		49	Napo
4	Pacífico	51	Mira
		52	Patía
		53	Tapaje – Dagua – Directos
		54	San Juan
		55	Baudó – Directos Pacífico
		56	Pacífico - Directos
		57	Islas del Pacífico

A partir de estas zonas definidas por la UPME, se debe seleccionar una de las 9 zonas establecidas para la región del Orinoco. Para esta tarea, se evaluó nuevamente el caudal que es la variable con más peso para poder desarrollar el proyecto. Como se observa en la Figura 5, la región del Orinoco se dividió en dos “subregiones”, los datos que se muestran corresponden a un histograma del caudal anual (izquierda) y a la curva de duración del caudal (derecha) en la región, ambas gráficas importantes para la elección de una zona en específico. En primer lugar, se decide seleccionar la “subregión” número 14, debido a que los valores de caudal en el histograma no pasan de 300 m³/s y la mayoría oscilan entre 0-5 m³/s, 0-10 m³/s, 0-12 m³/s y 0-30 m³/s (dependiendo de la estación de referencia). Adicionalmente el Q85, obtenido de la curva de duración del caudal, no supera los 50 m³/s y la mayoría están en valores aproximados de 1 m³/s y 2 m³/s. Como resultado se eligió la zona 35 (Meta) de la región del Orinoco, donde los valores de caudal corresponden a los requeridos para la implementación de un proyecto de tipo pico hidro energético.

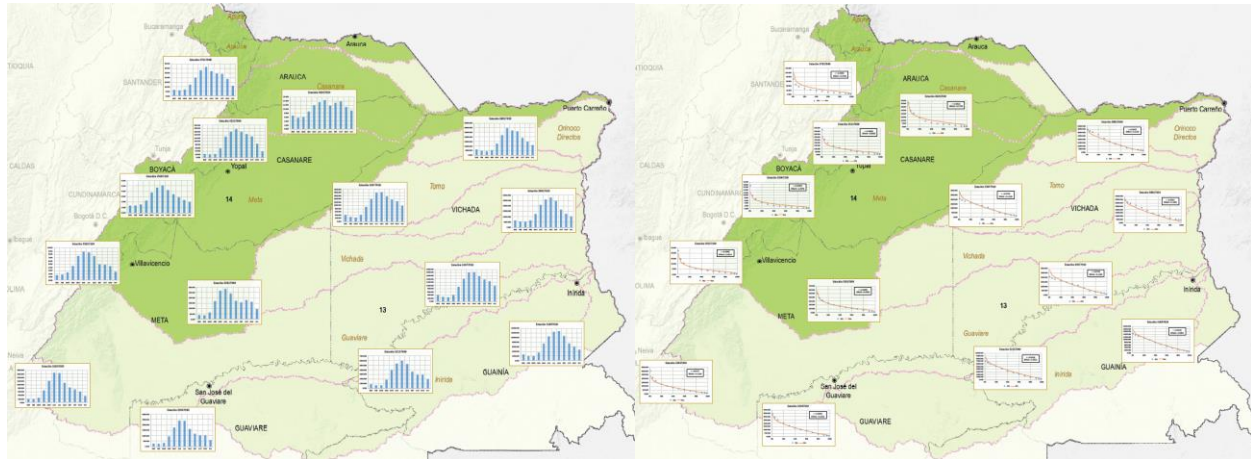


Figura 5. Histograma (izquierda) y curva de duración (derecha) del caudal en la región del Orinoco. [1]

A pesar de que la zona 35 (Meta) aparenta ser bastante prometedora. Cabe anotar que los datos obtenidos de las estaciones estudiadas corresponden a fuentes hídricas de un tamaño considerable, despreciando en ocasiones cuerpos de agua con caudales menores (debido básicamente a la dificultad de hacer un modelamiento completo y sumamente detallado de todos los cuerpos de agua); aun así, es información valiosa y con la que se puede trabajar.

Por lo anterior, se realiza un estudio más detallado en la región del Orinoco para ratificar si la zona 35 es adecuada o si en cambio existen opciones mejores. Además, se busca y escoge la cuenca hidrográfica específica bajo la cual la turbina trabajará.

6.1.2. Zonas factibles para la instalación del proyecto

Por medio de un geo portal diseñado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) llamado Datos Hidrológicos y Meteorológicos (DHIME), y su herramienta para consulta y descarga de datos hidrometeorológicos, es posible revisar cuales son los caudales en cada una de las estaciones a lo largo del país.

Teniendo en cuenta el proceso de selección de la zona hidrográfica, y considerando como la opción más factible la región del Orinoco, más específicamente en el Meta (sin enfocarse únicamente en este), se encontraron las siguientes opciones que cumplen con los requisitos pertinentes para el desarrollo del proyecto (Tabla 6).



Tabla 6. Opciones para el desarrollo del proyecto.

	Caudal (m³/s)				
		Puente Camacho (35017090) - Meta	Puente Carretera (36017030) - Casanare		Puente del amor (35037130) - Meta
Enero	2018	0,742	0,524	2015	1,537
Febrero		0,097	0,236		1,260
Marzo		0,024	0,326		1,777
Abril		3,652	2,476		5,814
Mayo		5,773	3,727		6,550
Junio		4,507	2,164		5,275
Julio		3,589	6,143		4,751
Agosto		3,002	6,167		2,870
Septiembre		1,242	4,767		3,893
Octubre		1,357	1,476		3,647
Noviembre		0,755	0,460		5,218
Diciembre		0,087	0,169		2,974
Promedio		2,069	2,386		3,797
Varianza		3,820	5,247		3,087
DE		1,955	2,291		1,757
Enero	2019	0,003	0,086	2016	0,723
Febrero		0,025	0,072		0,793
Marzo		0,025	0,115		1,455
Abril		1,552	0,800		5,152
Mayo		2,911	0,882		4,120
Junio		3,297	1,400		2,922
Julio		1,760	0,723		3,080
Agosto		1,607	0,682		9,777
Septiembre		0,565	0,320		6,400
Octubre		No hay datos	0,981		No hay datos
Noviembre		No hay datos	0,271		No hay datos
Diciembre		No hay datos	0,157		No hay datos
Promedio		1,305	0,541		3,825
Varianza		1,553	0,186		8,714
DE		1,246	0,431		2,952

En la Tabla 6, se muestran las tres opciones más factibles para el desarrollo del proyecto. La ubicación seleccionada es el Puente Carretera en Casanare, los datos de caudal medio mensual corresponden a $0,541 \pm 0,431$ m³/s. Cabe anotar varios aspectos importantes observados con relación al comportamiento de los datos, y que serán relevantes en el diseño:



- De manera lógica se dedujo que el caudal varía dependiendo de la época del año.
- Algunos datos son ambiguos, tanto que poseen una desviación estándar amplia lo que supone poca precisión en los datos, lo que se traduce una mayor incertidumbre en los mismos.
- Zonas como: Guainía, Guaviare, Vaupés, Vichada y Caquetá; contienen fuentes hídricas sumamente caudalosas, y como se delimito a principio de este capítulo los caudales requeridos para el proyecto debe ser entre $0 - 5 \text{ m}^3/\text{s}$. Por esta razón se determina que en estas zonas es menos probable el desarrollo del proyecto (igual en regiones como el Amazonas).
- Existen otras zonas hidrográficas que, a pesar de ser interconectadas, cumplen con condiciones óptimas para el desarrollo del proyecto. Lo anterior surge como una alternativa para personas que cerca a ciertas fuentes hidrográficas, podrían hacer uso del equipo para ahorrar y obtener una energía mucho más amigable con el medio ambiente.
- Se utiliza un caudal máximo de $1 \text{ m}^3/\text{s}$, debido a que se desea que la turbina opere a pesar de que haya un caudal mayor al promedio. Para esta consideración se toma en cuenta la desviación estándar calculada.

Considerando los datos más recientes, el promedio y desviación estándar, se decide elegir la zona 36017030 del Casanare: Puente Carretera, el cual corresponde al río Tate al nororiente de Casanare aproximadamente a 6 km del municipio de Paz de Ariporo (Figura 6). A pesar de que los datos del 2018 tienen una considerable diferencia con el caudal requerido, son datos ambiguos y esto se ratifica en la desviación estándar; sin embargo, los datos del 2019 son muchos más precisos y cumplen con el caudal requerido.

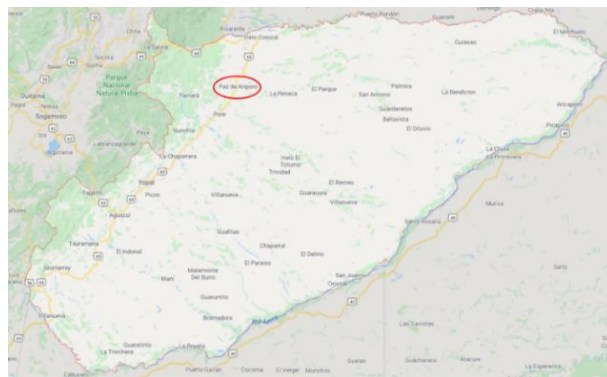
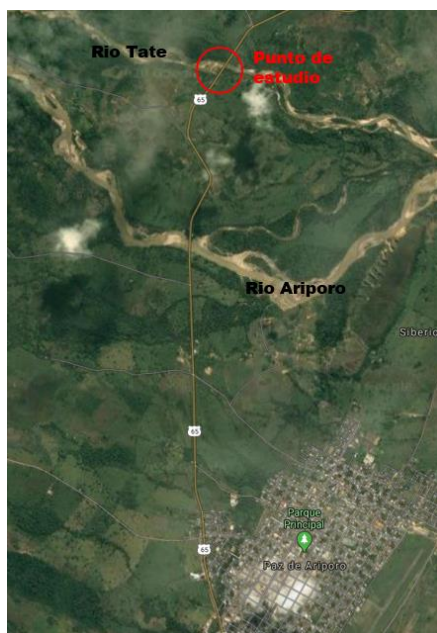


Figura 6. Paz de Ariporo. Fuente: Google Maps.



Adicionalmente se ponderaron los datos del nivel medio mensual de la zona seleccionada y se obtuvo un promedio de 2,152 m (215,166 cm). Como se observa en la



Figura 7, y haciendo uso de Google Maps se logra estimar el ancho del río, que es de aproximadamente 10 m; y se construye un perfil transversal aproximado (Figura 8) con el objetivo de hacer una aproximación a una velocidad media.



Figura 7. Posible punto de instalación. Fuente: Google Maps.

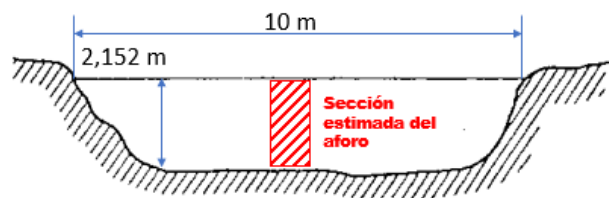


Figura 8. Perfil transversal aproximado. Imagen original: Dussaubat-Vargas. [35]



Tal y como indica Ayala [36], el aforo del cauce de un río suele hacerse por medio de la utilización de un molinete y la división en diferentes secciones, el ancho de dichas secciones varia; en este caso es de 0,5 m. La misma autora presenta una serie de ejemplos realizados por el IDEAM, lo que da a entender que esta institución utiliza dicho procedimiento para el aforo de ríos. Por lo tanto, se estima una sección de área de 0,5 m x 2,152 m (1,076 m²) (Figura 8).

Para conocer la velocidad de la corriente del río se realizó una aproximación por el método de sección-velocidad [36][37][38] por medio de la Ecuación 1.

$$Q = v * A$$

Ecuación 1. Caudal.

Donde: Q : es caudal (m³/s), v es velocidad media del flujo (m/s) y A es el área transversal (m²).

Utilizando una sección de área de: 1,076 m² y el caudal antes mencionado: 1 m³/s, se obtiene como resultado una velocidad de flujo media de 0,929 m/s; lo cual es coherente con lo calculado por Ayala en un estudio de caso con condiciones similares en la quebrada La Concepción. [36]

En la Figura 9, se puede apreciar un perfil de velocidades típico de una corriente natural, los valores varían dependiendo de las propiedades de la corriente. A mayor profundidad se tienen una velocidad menor, siendo máxima a poca profundidad. [37]

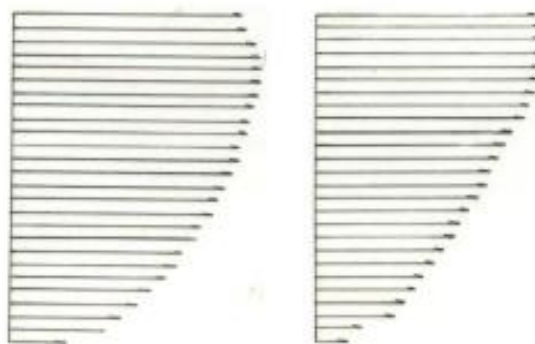


Figura 9. Perfil de velocidades en corrientes naturales. [37]

Adicionalmente, se puede calcular la velocidad en la superficie por medio de la Ecuación 2; la cual está sustentada y puede ser aplicada en cualquier tipo de corriente, únicamente se tiene un error



relativo de 5,03% según lo indica Ayala.[36] El resultado obtenido de la velocidad superficial es de 1,093 m/s.

$$v = 0,85 * v_{sup}$$

Ecuación 2. Velocidad media.

Entrevista con habitante de la región seleccionada

Con el fin de tener una perspectiva mucho más cercana acerca de la problemática dentro de la región del Casanare; se contactó con un habitante, que si bien no es del pueblo donde se realizaría el proyecto, vive en Yopal (capital de Casanare) y conoce muy bien toda la zona. El entrevistado fue el señor Arnulfo Vargas quien ha habitado la ciudad de Yopal por más de 40 años.

Inicialmente Arnulfo comenta que a pesar de ser Yopal una ciudad mediana, los problemas derivados a la energía han sido bastante notables; nos informa que desde hace 10 años el servicio paso de ser brindado por una entidad llamada Electrificadora de Boyacá hacia una institución regional llamada Enerca, a pesar de que se ha fortalecido el compromiso por tener una calidad y cobertura mejor, aún existen varios cortes de energía, que en ocasiones puede ser de hasta de 1 o 2 semanas; situación que se es agravada por los conflictos existentes con grupos armados al margen de la ley presentes en la región, que ocasionan daños a la infraestructura de las redes eléctricas públicas.

Arnulfo también expresa que a pesar de que la electricidad logra llegar a la mayoría de las poblaciones de la región, no suele ser muy fiable ni constante. Además, considera que soluciones como las hidroeléctricas no pueden llegar a ser instaladas debido a que se ha presentado una importante pérdida de fluencia en fuentes hídricas de la región debido al cambio climático, considera que en tiempos de “verano” los ríos no tienen un caudal considerable y en épocas de “invierno” el caudal no logra mantenerse, dando como resultado una fluencia totalmente impredecible y variable.

Considerando las observaciones realizadas por el entrevistado y direccionándolas hacia el presente proyecto, se resalta la importancia de proyectos a menor escala que sean eficientes, considerando la geografía e infraestructura de la región. Es importante tomar en cuenta la versatilidad de la máquina para trabajar con diferentes caudales, pasando a ser de mucha más relevancia aspectos como la velocidad de la corriente del río, así como también el tamaño, facilidad de instalación y transporte.



6.2. Metodología de diseño

Para continuar con el proceso creativo para desarrollar o escoger un modelo adecuado para las condiciones anteriormente señaladas, primero se debe plantear una serie de restricciones y especificaciones que permiten delimitar el diseño conceptual de la turbina.

6.2.1. Restricciones

- Funcionamiento en ríos o riachuelos
- Compacto
- Amigable con el medio ambiente
- Poco mantenimiento
- Sencillo
- Fácil transporte

6.2.2. Especificaciones

- Caudal bajo el cual trabajará de $1 \text{ m}^3/\text{s}$
- Tamaño máximo de $1 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$
- Utilización de piezas estandarizadas
- Peso máximo de 50 kg
- Fácil instalación
- Pocos mecanismos
- Ensamblaje sencillo
- Debe generar aproximadamente 0,5 kW de potencia
- Evitar afectaciones en el ecosistema de cualquier tipo

Recordando que se utilizó un caudal de $1 \text{ m}^3/\text{s}$, debido a la incertidumbre de los datos obtenidos en la Tabla 6, se diseñara para que el equipo pueda funcionar hasta este máximo caudal.

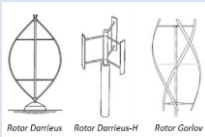
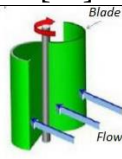
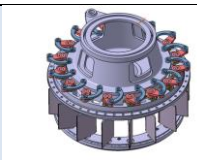
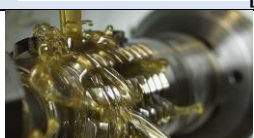


Tomando en cuenta las restricciones y especificaciones anteriormente planteadas, se realizaron varias propuestas basadas en el marco referencial, pero aplicando también cierta innovación y creatividad; dentro de lo posible y tangible. Pero antes de abordar de forma específica cada una de ellas, se indican los sistemas y elementos más relevantes tenidos en cuenta para la conceptualización de las diferentes propuestas.

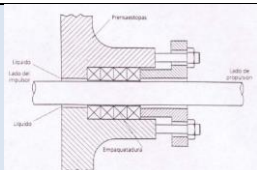
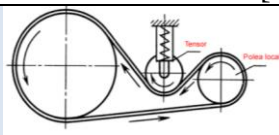
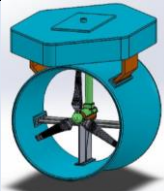
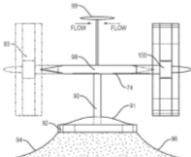
6.2.3. Propuestas de diseño

En la Tabla 7, se definen los sistemas más relevantes junto con sus elementos más esenciales para el diseño del dispositivo; independiente de la propuesta realizada.

Tabla 7. Elementos esenciales en el diseño de la turbina.

Función	Concepto		
Transformación de energía cinética	Rodete (Tipo turbina Kaplan o Hélices, Michelle Banki)	 [39]	 [15]
	Álabes (Darreius, Gorlov, Savonius, NACA)	 [40]	 [41]  [42]
	Caja espiral	 [43]	
	Distribuidor	 [44]	
Sistema de lubricación y sellado	Sistema de lubricación	 [45]	



	Sistema de sellado (prensa estopas, empaquetadura, etc.)		[46]
Transmisión de potencia	Cadenas		[42]
	Correas		[47]
	Engranajes		[42]
Trasformación de energía mecánica en eléctrica	Generador de imanes permanentes		[48]
	Convertidor o inversor		[49]
Estructura de soporte e instalación	Flotación		[22]
	Base para equipos sumergidos		[29]
	Obras civiles		[41]



Sistema de anclaje	Mecanismos de sujeción (mordazas, pernos, placas, etc.)		[50]
	Cables de acero		[51]
	Cadenas		[40]

6.2.3.1. Propuesta 1

Esta propuesta está basada en el diseño de una turbina hidráulica plástica de Normand Levesque. [17] Pero se tienen en cuenta una serie de cambios sustanciales para evitar posibles problemas en filtraciones, estabilidad, fabricación, eficiencia, etc.

Como se muestra en la Figura 10, se proponen una turbina axial, con una serie de alabes (de preferencia que sean de materiales plásticos; posiblemente fabricados por impresión 3D). Consta de tres secciones, la sección “A” donde hay un cambio de área para la entrada del fluido y regulación del caudal, a continuación, se encuentra la sección “B” donde se ubicarán los diferentes elementos que realizarán la transformación de energía y por último en la sección “C” se encuentra otro cambio de sección para la salida del agua.

Contiene al inicio una delgada malla o estructura (1) que sirve como distribuidora del flujo y además como filtro para cualquier tipo de residuos, en esta se ubican una serie de rodamientos que soportan el eje principal (2) y este último a su vez soporta el rotor (3); a continuación, se tiene una estructura posiblemente tubular que también se encarga de soportar el eje principal con su correspondiente rotor. Cabe aclarar que, para esta alternativa, en la sección “C” se ubica toda la parte de transmisión de potencia además de la salida de agua. En una estructura sellada por medio de un sistema de anillo interno y una serie de empaquetamientos [39], se ubica el sistema de transmisión (6) el cual consta de un engranaje ubicado al extremo del eje principal, el cual transmitirá la potencia generada a un segundo engrane que este acoplado a un generador por medio de un segundo eje. La estructura sellada antes mencionada, también contiene un pequeño depósito para el flujo de seguridad del anillo interno, colocado en la parte de abajo del generador. Toda la estructura es soportada por una serie de vigas instaladas en la base de la carcasa del equipo (9).

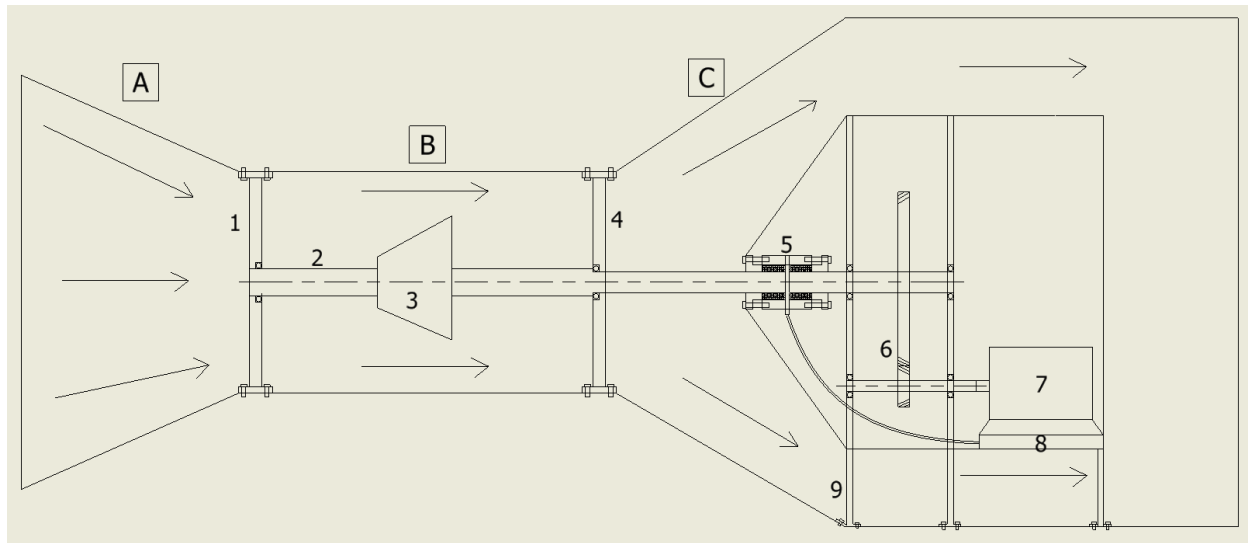


Figura 10. Boceto propuesta 1.

6.2.3.2. Propuesta 2

Similar a la propuesta anterior está basada en el diseño de una turbina hidráulica plástica de Normand Levesque [17]. Pero existen una serie de cambios en cuestión de sellamientos y transmisión de potencia.

Como se muestra en la Figura 11, se proponen una turbina axial, con una serie de alabes (nuevamente materiales plásticos; posiblemente fabricados por impresión 3D). Consta de tres secciones, la sección “A” donde hay un cambio de área para la entrada del fluido y regulación del caudal, a continuación, se encuentra la sección “B” zona donde se ubicarán los diferentes elementos que realizarán la transformación de energía y por último en la sección “C” se encuentra otro cambio de sección para la salida del fluido.

Contiene la misma malla de la propuesta 1, para distribuir el flujo y filtrar residuos (1); también posee un rotor (3) soportado por un eje principal (2) el cual es sostenido por una estructura (5). Sobre el eje hay una rueda dentada (4) que gira en conjunto con el eje, dicha rueda tiene un cambio de sección en los extremos, diseñado para el sistema de sellado (10). Así mismo el engranaje (6) al cual le transmite la potencia la rueda dentada, también tiene un diseño distinto con el fin de sellar la cámara; transmite la potencia por medio de un segundo eje (7) al generador (8). El contacto de rueda dentada – engranaje sucede en una zona libre, la cual servirá para trasladar cualquier posible fuga y trasladarla a un depósito (9) dentro de la misma cámara donde se encuentra el generador.

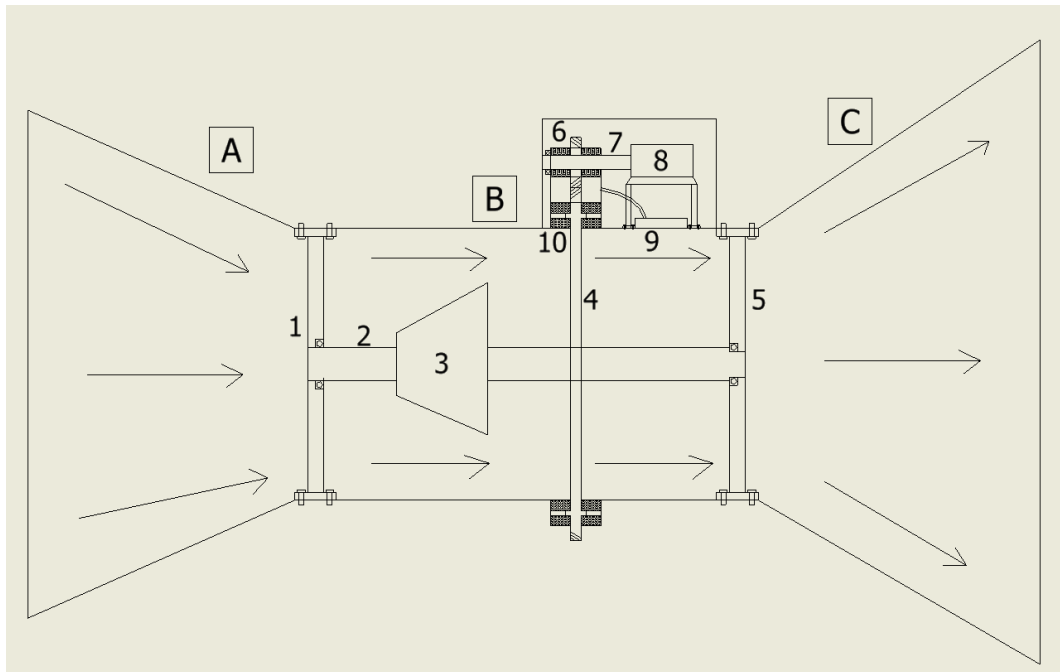


Figura 11. Boceto propuesta 2.

6.2.3.3.Propuesta 3

El diseño postulado está basado en las turbinas hidrocinéticas de eje vertical, claramente se tienen varios tipos de alabes. Además de poseer varias ventajas con respecto a la instalación y los elementos que la componen.

La Figura 12 referente a la propuesta 2, muestra el boceto de una alternativa que consiste en un equipo sumergible que se compone de una estructura en forma de pirámide que servirá como punto de apoyo (evitando que el eje de la turbina fluctué a causa del agua), en la base de la estructura se dispondrá un espacio sellado para los equipos de transformación de energía. En uno de sus costados para evitar daños tanto en la vida acuática como en los álabes se hará uso de una malla. Para la selección de los alabes se tienen tres diferentes alternativas, la (1) consta de un alabe tipo Gorlov, mientras que la (2) y (3) es la combinación de Gorlov con Savonius y Savonius con Darrieus, respectivamente. Una de las desventajas para esta alternativa es la complejidad de implementar un sistema que transporte la energía desde la batería interna hasta el lugar donde va a ser utilizada

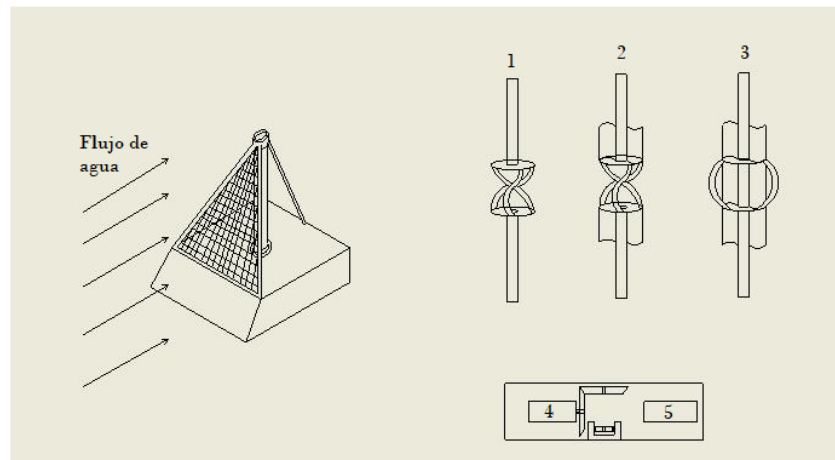


Figura 12. Boceto propuesta 3.

6.2.3.4. Propuesta 4

Esta propuesta consiste en una adaptación; en cuanto dimensiones de una turbina Michel-Banki (turbina de flujo cruzado). Además de simplificar sistemas como el de inyección (esto con el fin de adaptarla a las condiciones planteadas).

Este tipo de turbinas requieren de una obra civil que puede ser desde una desviación del cauce hasta la construcción de una represa. En la Figura 13, se muestra el boceto de la propuesta 4, se considera un desvío del cauce del río hacia un canal paralelo, el flujo de agua será guiado hasta el sistema de inyección de la turbina (1), el cual direccionará el flujo hacia el rotor (que se encuentra conectado mediante un eje (3) a un generador (a) haciendo uso de un sistema de engranajes). La carcasa de esta turbina tiene disposiciones especiales para asegurar que no se inunde la cámara, para ello en la sección (2) se cuenta con una gran apertura para que el agua pueda pasar por la cámara con facilidad, y se dispone en forma inclinada para evitar que se acumule una gran cantidad de agua; esta última parte cuenta, en uno de sus costados, con un lugar de apoyo para el eje de la turbina.

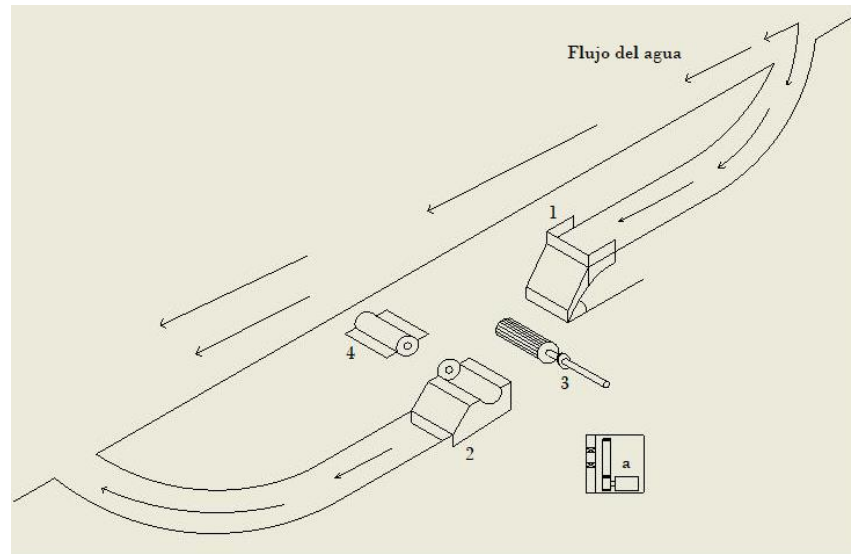


Figura 13. Boceto propuesta 4.

6.2.3.5. Propuesta 5

Esta propuesta se basa en una turbina Kaplan, sin embargo, posee una serie de adecuaciones. Como se muestra en la Figura 14, esencialmente se trata de una estructura que posee dos aberturas, la primera en la parte superior (sección A); la cual servirá para controlar el flujo del agua y estará al nivel del agua. La segunda se ubica en la parte inferior (sección C) y será el desagüe del agua ingresada; para esta abertura se estudiarán dos posibilidades de salida del agua: por medio de tubería o directamente a la fuente hídrica.

El funcionamiento es sencillo: el agua ingresa y pasa a la caja espiral (1) donde se transporta hacia el distribuidor (2) y posteriormente al rodete (4) (se mantiene el mismo diseño de la turbina Kaplan), allí cae hasta el desagüe donde sale el agua. Lógicamente el equipo tiene un eje el cual soporta el distribuidor y el rodete; dicho eje tiene una base (3) que se ubica en la parte superior y esta sujeta a la carcasa, allí se puede acoplar el generador, o bien, se puede alargar el eje y colocar el generador encima del equipo. El mayor reto es diseñar la carcasa para obtener un dispositivo altamente eficiente, idealmente el dispositivo debe funcionar dentro del agua, sin embargo, se pueden realizar adecuaciones al entorno para facilitar: mantenimiento, instalación y aumentar la vida útil del mismo.

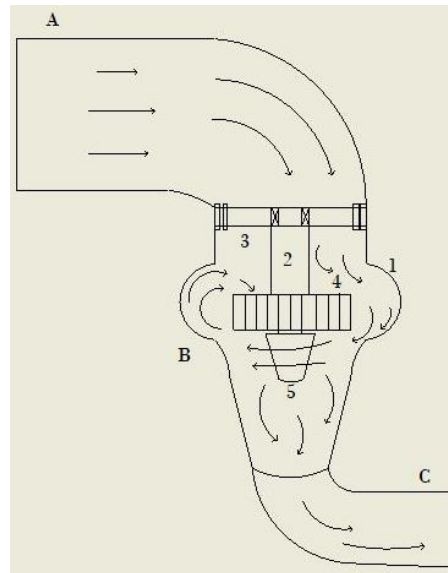


Figura 14. Boceto propuesta 5.

6.2.3.6.Propuesta 6

Esta propuesta surge de la combinación de varias ideas antes mencionadas, este nuevo diseño tiene partes de las propuestas 1, 2 y 3. Una vez más la turbina se divide en 3 partes especificadas en la Figura 15, la sección “A” es un cambio de área para la entrada del fluido y regulación del caudal, a continuación, se encuentra la sección “B” zona donde se ubicarán los diferentes elementos que realizarán la transformación de energía y por último en la sección “C” se encuentra otro cambio de sección para la salida del fluido.

En la parte central ubica el eje principal (2) el cual posee una serie de alabes (las mismas alternativas de la propuesta 3). Se transmite la energía almacenada a un generador (5) por medio de un sistema de engranajes cónicos (4), el sistema de sellado (3) es similar a la propuesta 2 pero de manera vertical.

La principal ventaja de este diseño es la sencillez de todo el mecanismo, se tienen pocas piezas, lo que incide en el peso, tamaño y mantenimiento. Adicionalmente, los alabes sugeridos son pertinentes para el tipo de caudal manejado. También su anclaje es muy versátil, puede utilizarse una estructura flotante, instalarlo al lecho del río, etc.

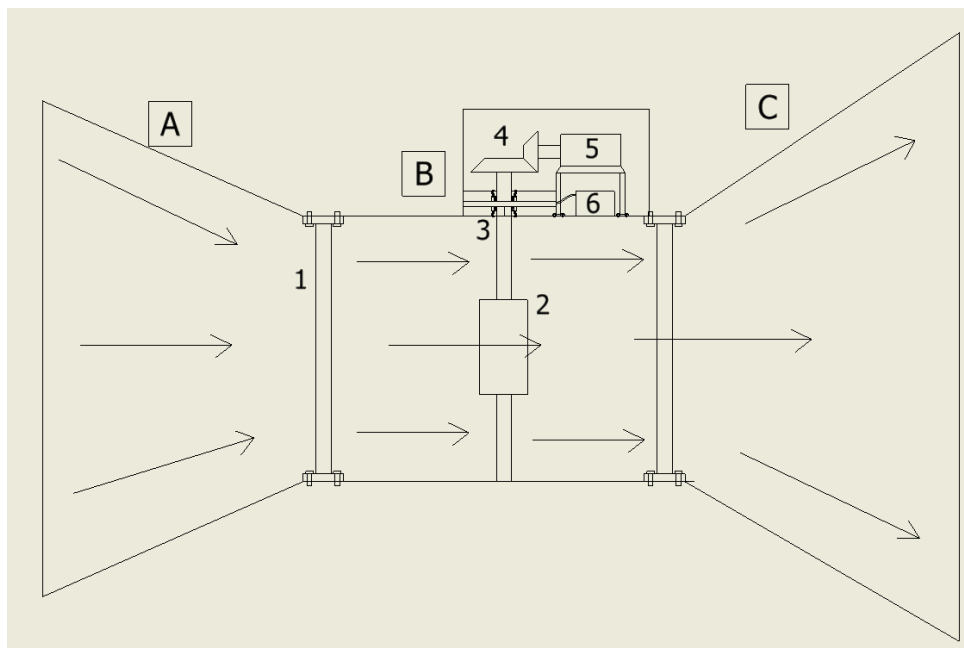


Figura 15. Boceto propuesta 6.

6.2.4. Evaluación de propuestas

Para poder elegir alguna de las propuestas antes descritas, se realiza una matriz de Pugh. Se otorga un porcentaje de importancia para cada aspecto relevante dentro del diseño de la turbina y se evalúa la propuesta en cada aspecto con una calificación de 1 a 5 (calificando con 1 si no cumple en lo absoluto con el requerimiento o 5 si cumple completamente con el requerimiento). En la Tabla 8, se muestra el ponderado de la calificación realizada, como se puede observar la propuesta con mayor puntuación fue la propuesta 6.

Tabla 8. Matriz de Pugh para evaluación de propuestas.

MATRIZ EVALUACION TECNICA DEFINITIVA														
	Manejo del caudal requerido	Tamaño	Piezas estandarizadas	Peso	Fácil instalación	Pocos mecanismos	Ensamblaje sencillo	Estética	Mantenimiento	Eficiencia hidráulica	Amigable con el medio ambiente	Confiable	Vida útil	Total
	90%	70%	50%	60%	30%	50%	50%	30%	70%	80%	70%	80%	60%	
Propuesta 1	4	3.5	3	2	2.5	3	3	3.5	2	2.5	3.5	4	4	3.086
Propuesta 2	4	3.5	2.5	2.5	2.5	3	3	3.5	2	3	3.5	4	3.5	3.105
Propuesta 3	4	4	2	3.5	3.5	3.5	3	3	2	2.5	3.5	3	3	3.056
Propuesta 4	3.5	2	3	2	1.5	3	2	2.5	3.5	4	2	3.5	4.5	2.901
Propuesta 5	3.5	2.5	3	2	2	3	2	3	3.5	4	2	4	4	2.994
Propuesta 6	4.5	3.5	3	3	3	3.5	3.5	3.5	3	3	3.5	4	3.5	3.395



6.3. Elección tipo de turbina

Según lo investigado en el marco referencial, y tomando en cuenta los diferentes tipos de turbinas analizados en el estado de arte. En la Tabla 9, se resume los tipos de turbinas más relevantes junto con datos más técnicos, con el fin de comparar y establecer cuál puede ser más pertinente para el caso de estudio analizado.

Tabla 9. Datos turbinas.

Tipo de turbina			Eficiencia hidráulica	Salto neto (m)	Caudal (m³/s)	Diámetro rodete (m)	Potencia (kW)	Tamaño de proyecto (pico, micro, mini, etc.)
Reacción	Flujo diagonal	Francis, Deriaz	Alta	10-400	0.5-20	0,35-7,65	<10000	De mini en adelante
	Flujo axial	Kaplan, Turbina de hélice, Banki	Media - Alta	<200	<50	1- 10,5	200-10000	De pico en adelante
Acción	Flujo tangencial	Pelton, Turgo	Alta	25-1000	<10	0,36 - 5,2	50-10000	De mini en adelante
Hidro cinética*	Savonius		Media - Baja	NA	0,25-25	0,1 - 1,5	0,46 -460	Pico
	Gorlov		Media	NA				Pico
	Darrieus		Baja	NA				Pico

* Los datos presentados de turbinas hidrocínéticas de caudal, diámetro del rodete y potencia, son variables dependiendo de las dimensiones.

Tomando en cuenta los datos de los diferentes tipos de turbinas, se determinó que las óptimas para el estudio de caso actual son: las turbinas de reacción de flujo axial y las hidrocínéticas. Para el presente proyecto, con base a la evaluación de propuestas realizada, se decide optar por una turbina hidrocínética, posteriormente se determinará cual tipo de configuración (Savonius, Gorlov, Darrieus, etc.) debe tener la turbina.



6.4. Diseño a detalle de la turbina

Basado en la propuesta elegida en el capítulo anterior (Propuesta 6), se diseñó la turbina teniendo en cuenta las restricciones y especificaciones deseadas, el resultado final se puede observar en la Figura 16. El funcionamiento de la turbina es bastante sencillo, el agua ingresa por la sección de entrada (1), y debido al cambio de sección que tiene, aumenta la velocidad del fluido. Posteriormente el agua se dirige hacia la segunda sección (2) donde se encuentra el rodete (3) que gira a causa de la velocidad de corriente aumentada, dicho rodete está unido a un eje principal, dividido en dos partes: eje rodete - engranaje(4) y eje inferior(5), que en conjunto generan un torque que permite el movimiento del mecanismo de transmisión compuesto por dos engranajes cónicos rectos (6), causando la rotación de un segundo eje (7) que a su vez está conectado a un par de engranajes rectos (11), y finalmente transformando la energía captada a electricidad por medio de un generador (8). Luego de pasar por el rodete el agua es evacuada, pero antes hay un cambio de sección que aumenta nuevamente la velocidad fluido (velocidad que ha perdido a causa de hacer girar el rodete) y de esta manera ayuda a la salida rápida del agua, a través de un difusor (9) ubicado en la sección de salida (10) así el líquido sale de la turbina y vuelve al cauce del río; la turbina tiene un sistema de flotación que no permite el hundimiento total de la turbina.

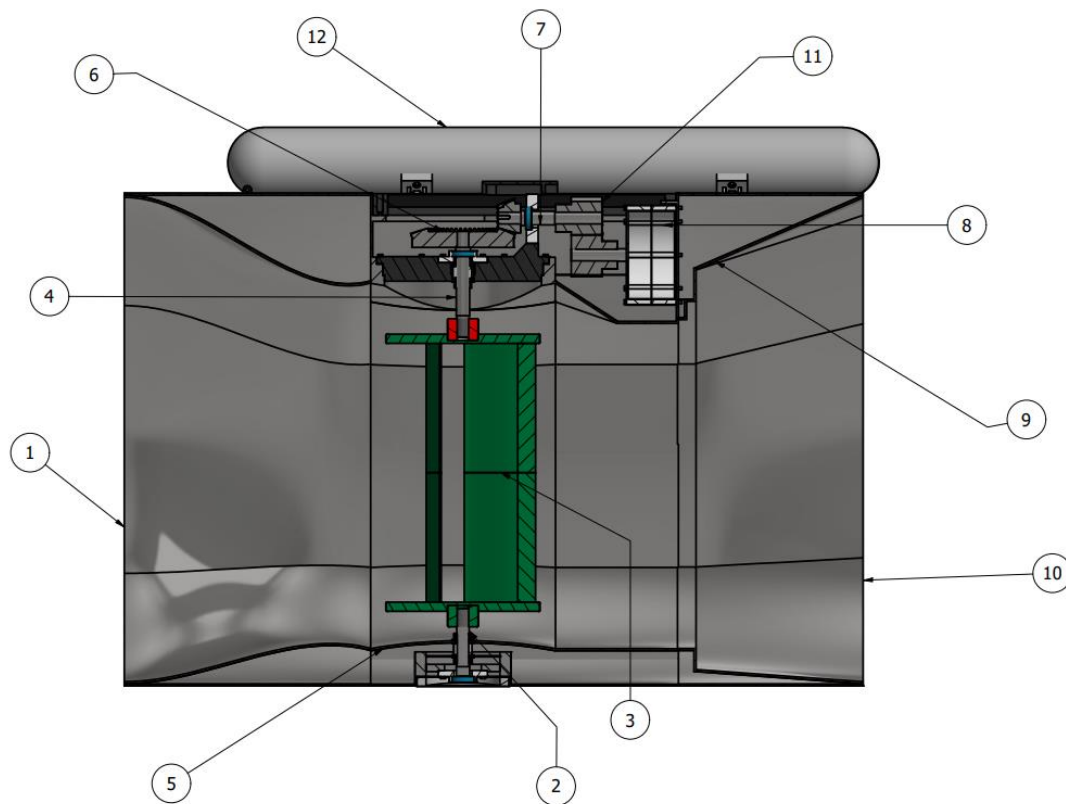


Figura 16. Diseño final turbina.



Con el fin de dar claridad en el diseño conceptual de la turbina se desarrolla una pequeña descripción de los sistemas principales que componen la turbina de manera totalmente conceptual, en el siguiente capítulo se desarrollan los cálculos pertinentes que sustentan y verifican la funcionalidad y fiabilidad de la turbina.

Para iniciar con los cálculos respectivos al diseño a detalle de la turbina, se sintetizaron los datos iniciales más relevantes en la Tabla 10.

Tabla 10. Datos iniciales.

Dato	Valor
Caudal	1 m ³ /s
Velocidad media del flujo	0,929 m/s
Densidad de agua	997,13 kg/ m ³
Diámetro rodete	0,25 m
Altura rodete	0,5 m
Área transversal aforo	1,076 m
Viscosidad cinemática	0,897*10 ⁶
Número Reynolds	232062,282
Número Froude	0,204

De la anterior tabla, cabe anotar varios aspectos relevantes:

- El diámetro del rodete (D) y altura del rodete (A) es apreciable en la Figura 17:

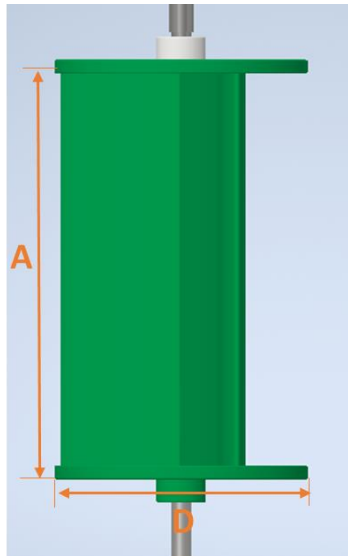


Figura 17. Altura y diámetro de rodete

- Se toma una velocidad de corriente media y no superficial; a pesar de que la turbina se ubique en la superficie del río; esto debido a que se desea tomar el menor valor de velocidad posible; para que la turbina opere sin interrupciones.



- Los diámetros de rodete son estimados y corresponden a los máximos tomando en cuenta la eficiencia y dimensionamiento de la turbina.
- Se toma la viscosidad cinemática y la densidad del agua a 25 °C [52][53], correspondiente a 3 °C menor a la temperatura ambiente media de Casanare (Anexo I).

Considerando los datos de la Tabla 10, inicialmente se realiza el cálculo de la cantidad de energía disponible en el río, se utiliza la Ecuación 3.

$$P_0 = \frac{1}{2} * \rho * A * v^3$$

Ecuación 3. Potencia disponible en el río.

Donde: ρ es la densidad del agua (kg/m^3), v es velocidad media del flujo (m/s) y A es el área transversal (m^2).

Teniendo en cuenta las especificaciones del cauce del río, se obtuvo como resultado una potencia disponible de: 431,862 W.

Se procede con el cálculo del número de Reynolds por medio de la Ecuación 4, se utilizan la base (0,5 m) y la altura (2,152 m) del área de aforo para determinar el radio hidráulico (R), teniendo en cuenta que la temperatura promedio para el departamento de Casanare es de 28° C (Anexo I), y la viscosidad cinemática ($0,00000897 \text{ m}^2/\text{s}$) [52] para una temperatura de 25° C. Obteniendo como resultado un número Reynolds de: 232062,282 correspondiente a un flujo turbulento, tal y como lo expone Gherardelli, también indicando que este régimen de Reynolds es común para canales abiertos (mayor a 12500) [54].

$$Re = \frac{v * R}{\mu}$$

Ecuación 4. Número de Reynolds.

Donde: R es radio hidráulico (m), v es velocidad media del flujo (m/s) y μ es viscosidad cinemática (m^2/s).

Posteriormente y usando el número de Froude (Ecuación 5) se determina que es un fluido subcrítico, ya que su resultado es 0,204 menor a 1. Este dato nos ayuda a caracterizar mejor el fluido, tal y como indica Rosas Ayala, si un fluido es subcrítico significa que la velocidad es relativamente baja y la profundidad relativamente grande; también se puede afirmar que la propagación de onda no es significativa (el fluido va a carecer de ondas superficiales u “olas”, información relevante para la instalación y flotabilidad de la turbina). Además, este dato rectifica la veracidad de los valores hasta ahora obtenidos; debido a que un régimen de fluido subcrítico o lento es común en los ríos de montaña a causa de los sedimentos y demás material particulado en el agua; únicamente llega a ser supercrítico en rápidos o distancias cortas. [55]



$$F = \frac{v}{\sqrt{g * \left(\frac{A}{t}\right)}}$$

Ecuación 5. Número de Froude.

Dónde: v es velocidad media del flujo (m/s), g es la gravedad (m/s²), A es el área mojada (m²) y T es el ancho superficial de la lámina libre (m).

6.4.1. Cálculos rodete

Con el valor de la velocidad en la sección del rodete, se procede a realizar los cálculos correspondientes al rodete. Inicialmente se busca la cantidad de potencia que puede llegar a captar los álabes del rodete, para esta tarea se utiliza nuevamente la Ecuación 3. Pero esta vez se utiliza el área de barrido del rodete y la velocidad obtenida en la sección de este. Además se realiza una corrección por medio del cálculo de una eficiencia estimada de la turbina tal y como lo muestra Behrouzi [56]. Se utilizó una eficiencia mecánica de 0,5 (menor al Límite de Benz; que es de 0,6 [23] y aproximada a la determinada en la práctica según Bastianon [57]) y una eficiencia de transmisión de 0,87; obteniendo como resultado una eficiencia de la turbina de: 0,435 y una potencia captada por el rodete de: 244, 54 W, estimando que la turbina trabajara 12 horas diarias se puede obtener 2934,5 Wh-día. Aunque no se toman en cuenta pérdidas por la transmisión o conversión de esta energía eléctrica, sobre pasa la potencia eléctrica consumida en el estudio realizado por Colina [41] en la misma población y en una vivienda con las especificaciones mostradas en la Tabla 11.

Tabla 11. Consumo energético

Descripción del equipo	Potencia nominal	Cantidad	Tiempo funcionamiento al día	Energía por día	Energía por mes	Energía por día
	Watts	Unidades	Horas	W-h/día	W-h/mes	J/día
celular	5	2	2	20	600	72000
tv	60	1	4	240	7200	864000
nevera	63	1	16	1008	30240	3628800
ventilador	57	2	8	912	27360	3283200
radio	15	1	3	45	1350	162000
bombillos	20	5	6	600	18000	2160000
Total, por casa en W				2825	84750	10170000
total, por casa en kW				2,8 kW-h/día	84,8 kW-h/mes	

Un indicador importante para el diseño de la turbina es la capacidad nominal específica (SRC), la cual “mide la capacidad de generación de potencia por metro cuadrado del área de barrido de los álabes” [58] y se calcula por medio de la Ecuación 6.

$$SRC = \frac{\text{Capacidad eléctrica del generador (kW)}}{\text{Área de barrido del rotor (m}^2\text{)}}$$

Ecuación 6. Capacidad nominal específica.



Utilizando un generador de 800 W que usualmente es para turbinas eólicas (Especificaciones Anexo A) y el área de barrido correspondiente se obtuvo un SRC de: 6,4 kW/m². Según Amaya *“Entre mayor sea el SRC, mayor serán los esfuerzos sobre los álabes, disminuyendo la vida de fatiga del elemento. En estos casos, se deben definir todas las regiones con concentradores de esfuerzos para mejorar el diseño”* [58]. A pesar de que el valor obtenido no es muy alto, se debe tener precaución con ciertas regiones críticas para que la turbinas sea completamente fiable y con una larga vida útil.

Otro indicativo importante es la llamada relación de velocidades o la velocidad específica ideal, más conocida como TSR (por sus siglas en inglés *tip speed ratio*). En el caso de estudio, para la determinación de dicho valor se requiere conocer la cantidad de alabes, autores como Gorlov (77), Bastianon [57] o Chavez [24]; indican que el número de alabes debe estar entre 1 y 3. Debido a la velocidad del rodete y al máximo porcentaje de coeficiente de potencia obtenido; se decidió utilizar 3 alabes para el diseño del rodete. Por medio de la Ecuación 7, se obtuvo el TSR, adicionalmente se calculó el coeficiente de potencia (Ecuación 8) y la velocidad del rotor ideal (Ecuación 9), datos relevantes para el diseño del rodete.

$$\lambda = \frac{4 * \pi}{Z}$$

Ecuación 7. Velocidad específica ideal. [24]

Donde: Z es el número de alabes.

$$C_p = \frac{P}{0,5 * \rho * A * v^3}$$

Ecuación 8. Coeficiente de potencia. [58]

Donde: ρ es la densidad del agua (kg/m³), v es la velocidad en la sección del rodete (m/s), P es la potencia de salida (W) y A es el área transversal de la sección del rodete (m²).

$$\omega = \frac{2 * \pi * v}{Z * s}$$

Ecuación 9. Velocidad angular ideal. [24]

Donde: v es la velocidad en la sección del rodete (m/s), Z es el número de alabes y s es el ancho del álabe (m) (corresponde a la mitad del radio del rotor).

Como resultado se obtuvo un TSR de: 4,189 m/s, un C_p de: 0,404 y un ω de: 27,683 rad/s. Debido a los resultados obtenidos se toman ciertas consideraciones:

- Según Amaya [58], el TSR no corresponde a un valor muy alto (el valor puede variar entre uno, para turbinas con múltiples álabes de baja velocidad, hasta seis para turbinas modernas de alta velocidad con dos álabes), por lo que el rodete no sufrirá grandes esfuerzos; lo que se traduce a que los alabes no necesariamente tienen que ser tan delgados. A demás no tendrá mayores dificultades para empezar a operar a baja carga.



- El C_p obtenido verifica el supuesto realizado anteriormente acerca de la eficiencia de la turbina, con una diferencia apenas de tres décimas.
- La velocidad angular equivale a 264,354 RPM, el generador utilizado trabaja mínimo a 650 RPM (Anexo A) por lo que se requerirá en la transmisión una relación de velocidad aproximadamente de 1 a 3.

Cabe la aclaración de que a pesar de que la velocidad angular calculada aparentemente es elevada, según Yuce & Muratoglu la densidad de potencia de una turbina de agua a una velocidad de 2 m/s es la misma que la de una turbina de viento a velocidades aproximadas de 16 m/s [59], concluyendo que una turbina hidrocínética puede generar energía con un costo notablemente menor que una turbina eólica, además de ratificar el dato de base el cual es la velocidad de la corriente y confirmando a la vez que es posible llegar a los RPM indicados. Dato el cual también es argumentado por el análisis de una turbina hidrocínética realizado por Cardona Macilla donde demuestra que una turbina puede llegar alcanzar los 280 RPM sin difusor, y con difusor puede aumentar hasta 14 m/s TSR (recordar que los cálculos realizados consideran un TSR solo de 4,189 m/s) [60].

A partir de los anteriores cálculos, consideraciones y teniendo en cuenta la Figura 18. Se determina que el rodete debe estar basado en el diseño Darrieus, sin embargo, es importante contemplar otras posibilidades como el diseño Gorlov o diseños con características similares.

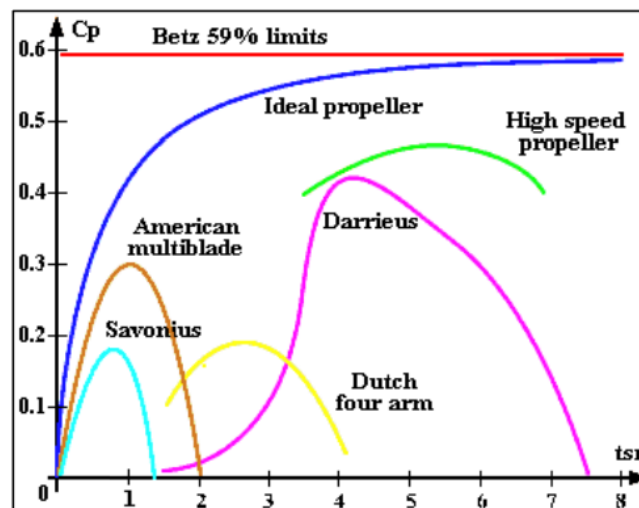


Figura 18. Coeficiente de potencia en función de TSR. [60]

6.4.1.1. Perfil de álabes

Para la elección del perfil requerido para el álabes del rodete, se considera el más apto para las condiciones planteadas y el cual genere una fuerza de sustentación mayor. Autores como Colina [41] o Carrillo [61] utilizaron un perfil NACA0021, sin embargo por medio de una base de datos



de perfiles aerodinámicos online llamada Airfoil Tools [62], se logró encontrar varias alternativas que podían llegar a ser más eficientes que el NACA0021.

Para la comparación se tomaron perfiles de 4, 5 y 6 dígitos [63], además se buscaron perfiles gruesos y combados [64]; este tipo de perfiles suelen ser usados en turbinas hidrocinéticas.

Tomando esta serie de consideraciones se analizaron 4 perfiles aerodinámicos: NACA0021,

NACA23021, NACA63415 y NACA662415. Los dos primeros corresponden a perfiles más

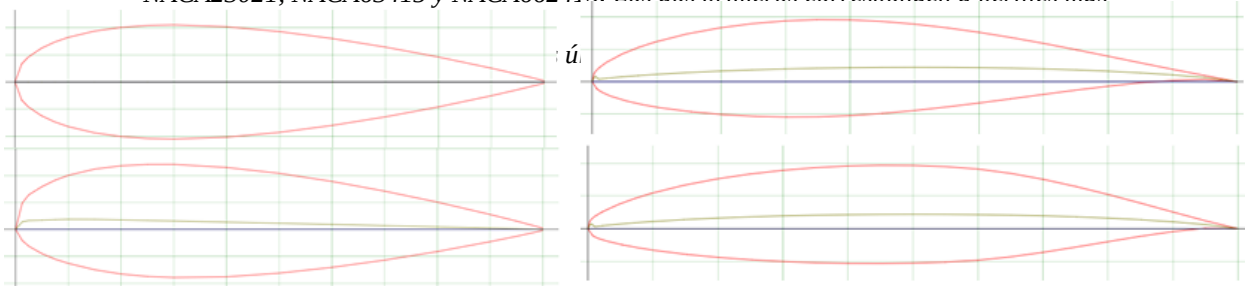


Figura 19).

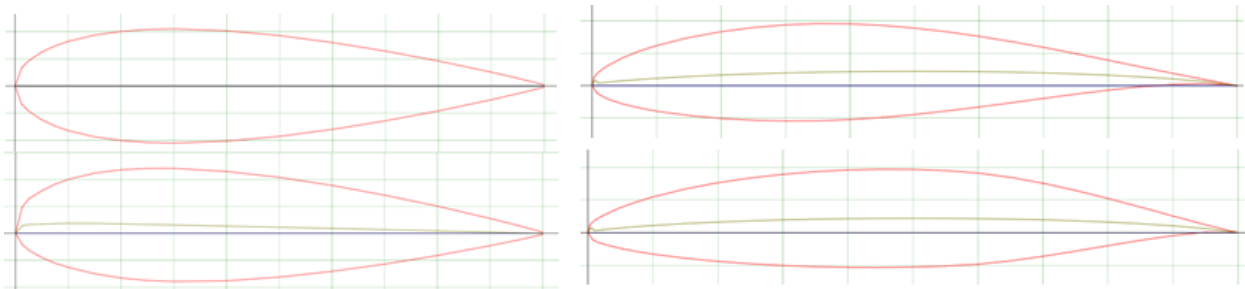


Figura 19. Perfiles NACA0021, NACA23021, NACA63415 y NACA662415 (de arriba hacia abajo). [62]

Como se puede observar en la Figura 20, para el caso de estudio donde se tiene un coeficiente de potencia (C_p) aproximado de 0,404 y una velocidad específica ideal (λ) de 4,189 m/s, se debe buscar una relación de coeficiente de sustentación y de arrastre ($\frac{C_l}{C_d}$) igual a 20, condición que



cumplen ambos perfiles (en un rango de ángulos) tal y como se muestra en la C_l/C_d v Alpha

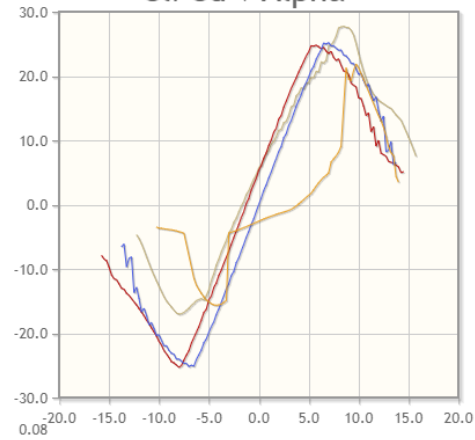


Figura 21.

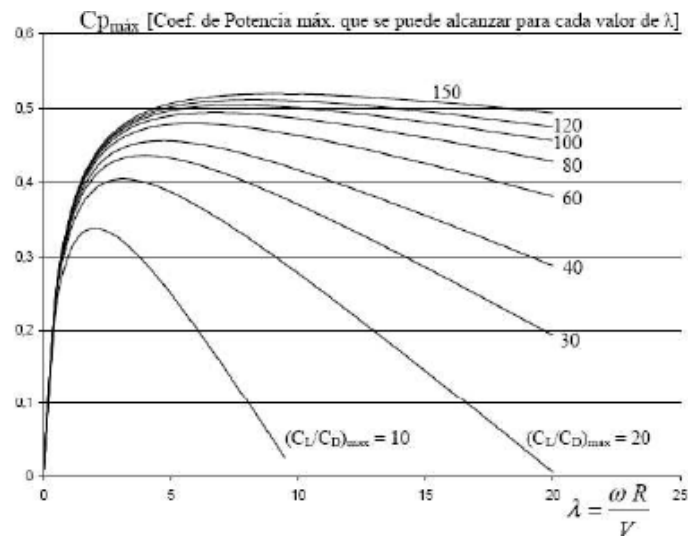


Figura 20. Coeficiente de potencia vs velocidad ideal. [57]

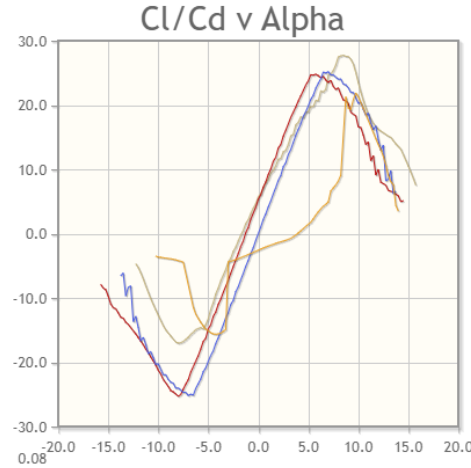


Figura 21. Cl/Cd vs ángulo de ataque para perfiles NACA0021(azul), NACA23021(rojo), NACA63415(gris) y NACA662415(naranja). [62]

Por medio de un procedimiento para hallar la cuerda del álabe [24] que consta del cálculo de un factor de pérdidas (F) (Ecuación 12), el cálculo de una velocidad relativa (v_r) (Ecuación 13), un ángulo de velocidad relativa (ϕ) (Ecuación 10); asumiendo un radio de estudio de 0,15 m y una suposición inicial de un coeficiente de sustentación igual a 1. En la Tabla 12 se resume los cálculos realizados.

$$\tan(\phi) = \frac{1 - \sqrt{1 + 4 * \left(\frac{v_2}{\omega * r}\right)^2 * a * (1 - a)}}{2 * a * \frac{v_2}{\omega * r}}$$

Ecuación 10. Ángulo de la velocidad relativa.

Dónde: ϕ es el ángulo de la velocidad relativa (grados), v_2 es la velocidad en la sección del rodete (m/s), ω es la velocidad angular (rad/s), a es el factor de inducción y r es el radio local de estudio.

$$a' = \frac{v_2 * (1 - a)}{\omega * r * \tan(\phi)} + 1$$

Ecuación 11. Factor de velocidad angular.

Dónde: a' es el factor de la velocidad angular, ϕ es el ángulo de la velocidad relativa (grados), v_2 es la velocidad en la sección del rodete (m/s), ω es la velocidad angular (rad/s), a es el factor de inducción y r es el radio local de estudio.

$$F = \frac{2}{\pi} * \cos^{-1}(e^{-f}) \quad ; \quad f = \frac{Z * (R - r)}{2 * R * \sin(\phi)}$$

Ecuación 12. Factor de pérdidas en las puntas.



Donde: F es el factor de pérdidas en las puntas, ϕ es el ángulo de la velocidad relativa (grados), Z es el número de alabes, R es el radio del rodete (m) y r es el radio local de estudio.

$$v_r = \sqrt{v_2^2 * (1 - a)^2 + \omega^2 * r^2 * (a' - 1)^2}$$

Ecuación 13. Velocidad relativa.

Donde: v_r es la velocidad relativa, ϕ es el ángulo de la velocidad relativa (grados), v_2 es la velocidad en la sección del rodete (m/s), ω es la velocidad angular (rad/s), a es el factor de inducción, r es el radio local de estudio y a' es el factor de la velocidad angular

Tabla 12. Resumen cálculo de cuerda.

Radio local de estudio (r)	0,150	m
Ángulo de velocidad relativa (ϕ)	0,257	radianes
	14,388	grados
Factor de velocidad angular (a')	0,380	
f	2,415	
Factor de pérdida en las puntas (F)	0,943	
Velocidad relativa (vr)	5,834	(m/s)

El valor anterior de cuerda es diferente para cada perfil aerodinámico, por lo cual se debe volver a calcular. Adicionalmente se analiza cual es más eficiente comparando las alternativas por medio del cálculo de un coeficiente tangencial (C_t o C_m) (Ecuación 14); el cual está en función del coeficiente de sustentación (C_l) y de arrastre (C_d) respectivo para cada perfil.

$$C_t = C_l * \sin(\phi) - C_d * \cos(\phi)$$

Ecuación 14. Coeficiente tangencial.

Donde: C_t es el coeficiente tangencial, C_l es el coeficiente de sustentación, C_d es el coeficiente de arrastre y ϕ es el ángulo de la velocidad relativa (grados).

Analizando los datos obtenidos en la Tabla 13, se observa que los valores más altos de coeficiente tangencial (C_t) obtenidos para cada grupo de perfiles son NACA23021 y NACA63415 (Figura 22). Para obtener resultados más verídicos, se realizará una simulación en CFD para los perfiles seleccionados. De esta manera se logrará seleccionar el perfil aerodinámico más adecuado para el caso de estudio.

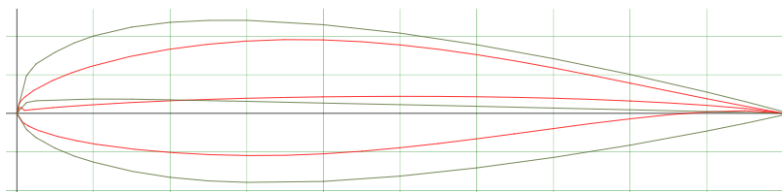


Figura 22. Perfiles NACA23021 (verde) y NACA63415 (rojo). [62]



Tabla 13. Perfiles NACA.

Cl/Cd Aprox. 20							
Perfil tradicional	NACA23021			Perfil combado	NACA 662415		
	Ángulo de ataque (α)	9,000	grados		Ángulo de ataque (α)	9,750	grados
	Coeficiente de sustentación (Cl)	0,886			Coeficiente de sustentación (Cl)	0,974	
	Coeficiente de arrastre (Cd)	0,044			Coeficiente de arrastre (Cd)	0,045	
	Coeficiente tangencial (Ct)	0,178			Coeficiente tangencial (Ct)	0,199	
	NACA 0021				NACA 63415		
	Ángulo de ataque (α)	10,00	0 grados		Ángulo de ataque (α)	10,50	0 grados
	Coeficiente de sustentación (Cl)	0,876			Coeficiente de sustentación (Cl)	1,006	
	Coeficiente de arrastre (Cd)	0,043			Coeficiente de arrastre (Cd)	0,049	
	Coeficiente tangencial (Ct)	0,176			Coeficiente tangencial (Ct)	0,203	

6.4.1.2. Simulación para seleccionar perfil del alabe

Con el fin de hacer una correcta selección del perfil más pertinente para el caso estudiado, se decidió hacer una simulación por medio de la herramienta CFD (Computational Fluid Dynamics) se analiza el comportamiento de cada perfil para el contexto planteado.

Los datos básicos para la simulación se muestran en la Tabla 14. Se utiliza la Ecuación 15 y Ecuación 16, para calcular la intensidad y escala de longitud, respectivamente (necesarios para definir la turbulencia del flujo). Se utilizan estos dos datos debido a que no tenemos grandes cambios de presión o un flujo con fuerte desequilibrio, además de funcionar bien con una amplia gama de flujos limitados. [61]

$$I = 0.16(Re)^{-\frac{1}{8}}$$

Ecuación 15. Intensidad de turbulencia. [65]

Donde: Re es el número de Reynolds y I es la intensidad de la turbulencia.

$$l = 0.07L$$

Ecuación 16. Escala de longitud de turbulencia. [65]

Donde: L es el diámetro de la sección del rodete y l es la escala de longitud de turbulencia.



Tabla 14. Datos para simulación.

Dato		Valor	Unidades
Diámetro rodete		0,25	m
Diámetro sección		0,6	m
Velocidad entrada		1,652	m/s
Velocidad angular		27,683	rad/s
Intensidad Turbulencia		6	%
Escala de longitud de turbulencia		0,042	m
Cuerda	NACA 23021	0,125	m
	NACA 63415	0,125	m
Ángulo de ataque	NACA 23021	9	grados
	NACA 63415	10,5	grados

Para ambas simulaciones se realiza un estudio de independencia de malla, se toman dos Estos datos, igual que Las especificaciones técnicas de las simulaciones, el dominio utilizado, la discretización de malla, estudio de independencia de malla, convergencia de las simulaciones y el resumen de los videos de velocidad y presión para cada perfil, se encuentran en los Anexos B y C.

Simulación NACA 23021

En la Figura 23 y Figura 24, se muestran los resultados de velocidad y presión obtenidos a partir del muestreo de datos en una pequeña línea tangente en el extremo de uno de los álabes (ubicación específica en Anexo B), y se puede deducir que los datos son muy similares con incertidumbres manejables. Debido a lo anterior se toma como referencia la malla con menor número de recursos computacionales; es decir, la que tiene menor número de elementos (50000).

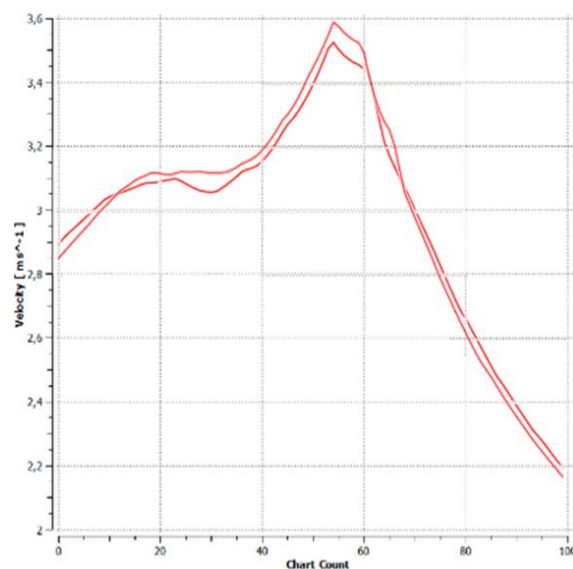


Figura 23. Gráfica de velocidad en línea tangente al perfil del alabe NACA 23021 para 50000 y 100000 elementos.

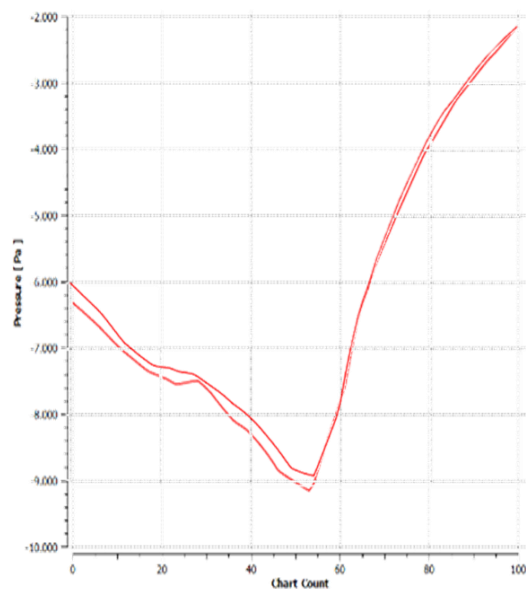


Figura 24. Gráfica de presión en línea tangente al perfil del alabe NACA 23021 para 50000 y 100000 elementos.

Simulación NACA 63415

En la Figura 25 y Figura 26, se muestran los resultados de velocidad y presión obtenidos a partir del muestreo de datos en una pequeña línea tangente en el extremo de uno de los álabes (ubicación específica en Anexo B), y se puede deducir que los datos son muy similares con incertidumbres manejables. Debido a lo anterior se toma como referencia la malla con menor número de recursos computacionales; es decir, la que tiene menor número de elementos (68000).

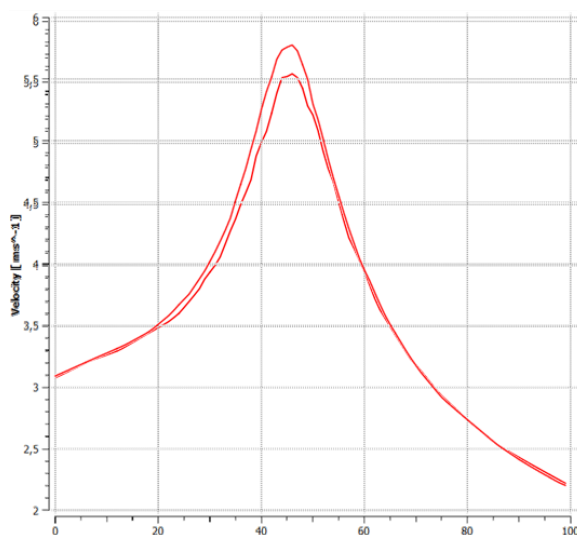


Figura 25. Gráfica de velocidad en línea tangente al perfil del alabe NACA 63415 para 38000 y 168000 elementos.

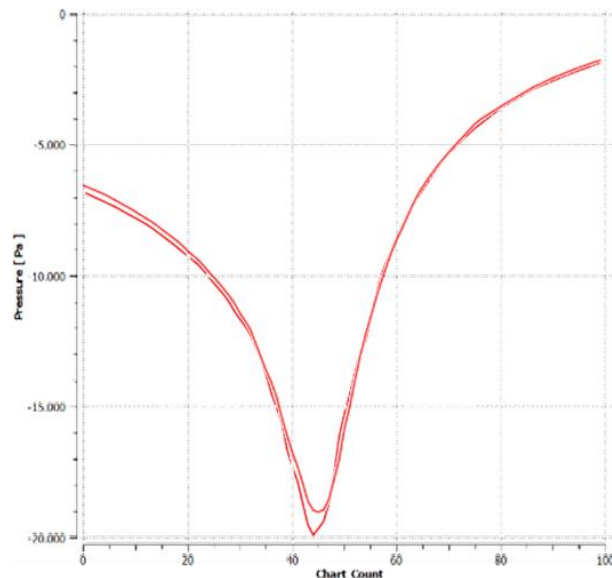


Figura 26. Gráfica de presión en línea tangente al perfil del alabe NACA 63415 para 38000 y 168000 elementos.

6.4.1.3. Elección de perfil del alabe

Tomando en cuenta la Tabla 15 se determinó que el mejor perfil del álabe para la aplicación actual es el NACA 63415; rectificando lo sospechado en los cálculos realizados debido a que tiene coeficiente tangencial (C_t) mayor a cualquier otro perfil estudiado, además la simulación muestra que se obtiene una velocidad mayor y resultados más precisos. Lo cual se traduce a mayor eficacia de la turbina.; cabe anotar que al elegir el perfil NACA 63415 se requiere tener más cuidado con las presiones que se manejan y como afectan en el diseño de la cámara donde se ubicara el rodete.

Tabla 15. Análisis de resultados simulaciones NACA 23021 y NACA 63415.

NACA 23021		NACA 63415	
Velocidad	Presión	Velocidad	Presión
-Se obtiene una velocidad máx. de aprox. 7 m/s. -En todo el rodete se conserva una velocidad de aprox. 3,5 m/s. -Velocidad en el centro muy cercana a 0 m/s. -En la gráfica realizada se obtiene una función un poco brusca, aunque guarda cierta “estabilidad”.	-El rodete trabaja en general entre presiones estáticas de aprox. 2000 Pa y 300 Pa. -Se forma un vacío (aprox. -15000 Pa) en el centro, el cual afecta ligeramente uno de los alabes. -En la gráfica realizada se obtiene una función un poco brusca, aunque guarda cierta “estabilidad”.	-Se obtiene una velocidad máx. de aprox. 9 m/s. -En todo el rodete se conserva una velocidad de aprox. 5 m/s. -Velocidad en el centro muy cercana a 0 m/s. -En la gráfica realizada se obtiene una función suave y más “estable”.	-El rodete trabaja en general entre presiones estáticas de aprox. 3500 Pa y 1000 Pa. -Se forma un vacío (aprox. -17000 Pa) en el centro, el cual afecta ligeramente uno de los alabes. -En la gráfica realizada se obtiene una función suave y más “estable”.



6.4.2. Diseño del sistema de transmisión

Para el diseño del sistema de transmisión se decidió realizar el montaje que se muestra en la Figura 27. El sistema funciona gracias al torque resultante del giro del rodete, dicho movimiento es causado por la velocidad de corriente del agua; la energía es transferida por medio de un eje a un sistema de engranajes cónicos rectos, estos conducen la energía a un segundo eje que está conectado a un par de engranajes rectos para finalmente ser transferida al generador, este último se encarga de transformar la energía rotacional a energía eléctrica.

Cabe aclarar que los elementos del sistema están dispuestos de tal manera que sean extraíbles e intercambiables de manera sencilla. En el diseño se utilizan sellos de goma entre las partes de la carcasa y las diferentes tapas para garantizar que no existan fugas y se estropeen los componentes de transmisión de energía, en cuanto a los ejes conectados al rodete, estos cuentan con prensa estopas para garantizar libre giro sin ingreso de agua tanto a la caja de transmisión como al compartimento del rodamiento.

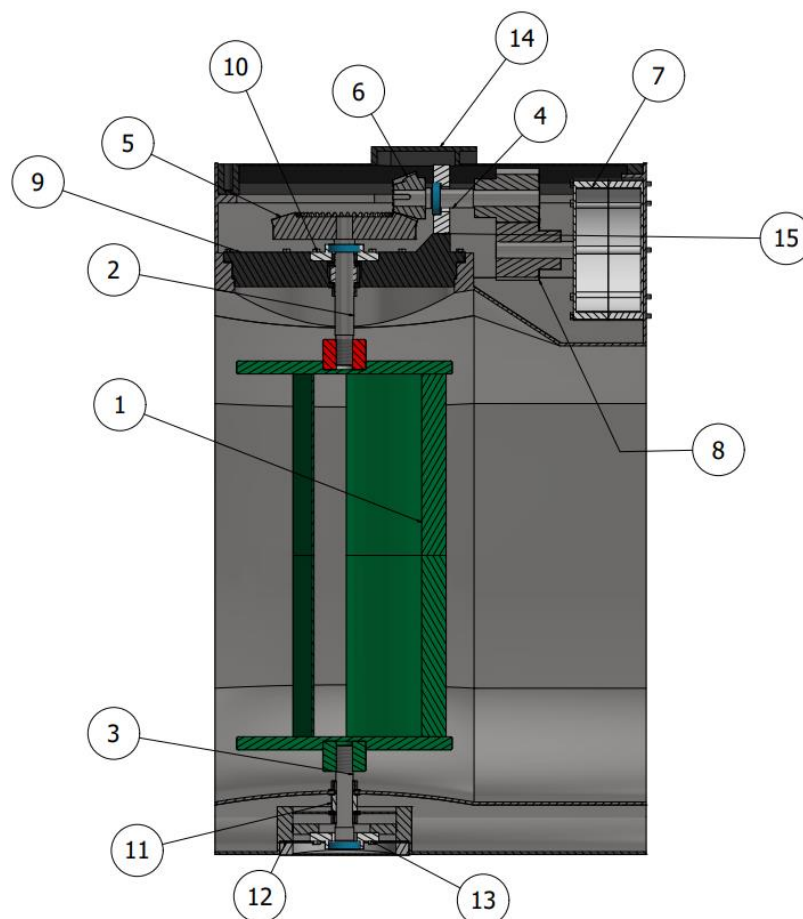


Figura 27. Sistema de transmisión, rodamientos y sellos



Los elementos se pueden dividir en 3 grupos: rodete y ejes, engranajes, generador. Tomando en cuenta la Figura 21, a continuación, se describe cada uno de los grupos de manera detallada (los planos de los elementos descritos se encuentran en el Anexo J):

- Rodete y ejes: son los encargados de conducir gran parte de la energía generada. Por una parte, el rodete (1) fue diseñado basado en los álabes de la turbina hidrocínética tipo Gorlov, debido a su versatilidad y facilidad de fabricación. Además, permiten ser adaptadas a ciertos modelos de alabes tipo NACA o afines, su material es de PLA (peso reducido) y serán fabricadas por medio de impresión 3D. Lo anterior permiten que la intercambiabilidad sea sencilla en caso de daño o desgaste. Los ejes en cambio son de acero estructural, debido a que es importante que su desgaste sea mínimo y su vida útil sea longeva. El eje principal se divide en dos partes: superior (2) e inferior (3) ambos acoplados al rodete arriba y abajo respectivamente, el acople para ambos casos esta predefinido en el diseño del rodete y se ensambla fácilmente. El segundo eje (4) no tiene mayor complicación, las dimensiones corresponden a las mismas establecidas por el primero.
- Engranajes: este grupo está constituido por 2 engranajes cónico-rectos (5) (6), fue elegido este tipo de engranaje básicamente por la facilidad de adaptarse al espacio predeterminado para su disposición (compartimiento encima de la cámara del rodete), su poco ruido de operación y durabilidad. Se buscó la relación que favoreciera la eficiencia de la máquina y se acoplara con los requerimientos establecidos por el generador.
- Generador: el generador (7) fue el elemento principal para establecer que parámetros eran necesarios para el diseño en conjunto del sistema de transmisión. Considerando las RPM necesarias para su funcionamiento y garantizándolas por medio de la integración de todo el conjunto de elementos. Dicho generador está acoplado al eje secundario por medio de un par de engranajes rectos (8) y se encuentra alojado dentro de la caja de transmisión, es atornillado y asegurado; adicional es posible su inspección por medio del compartimiento ubicado en la parte superior de la turbina.

Se prosigue a realizar el diseño propuesto, para ello se hará uso de herramientas CAD con las que se determinan las diferentes geometrías, cargas y materiales que están presentes en la máquina con la finalidad de garantizar su correcto funcionamiento.

A continuación, en la Tabla 16, se encuentran algunas especificaciones para cada elemento que compone la turbina.

Tabla 16. Materiales de construcción de piezas de la turbina.



Masa total	97,367 kg			
Elemento	Material	Especificaciones		
Rodete, prensa estopa, tapas de la carcaza	PLA	Densidad	1.24	g/cm ³
		Límite de resistencia a la tensión	55	MPa
		Límite de resistencia a la tracción	47	MPa
		Módulo de Young	3.3	GPa
		Módulo de corte elástico	1,17	GPa
Eje engranaje – rodete, eje entre engranajes, eje inferior	Acero inoxidable	Densidad	8	g/cm ³
		Límite de resistencia a la tensión	250	MPa
		Límite de resistencia a la tracción	540	MPa
		Módulo de Young	193	GPa
		Módulo de corte elástico	74,2308	GPa
Rodamientos CSN 02 4645 B 71904	Acero	Densidad	7.8	g/cm ³
		Límite de resistencia a la tensión	207	MPa
		Límite de resistencia a la tracción	345	MPa
		Módulo de Young	220	GPa
		Módulo de corte elástico	86.274	GPa
Engranajes	Acero 1045	Densidad	7.8	g/cm ³
		Límite de resistencia a la tensión	207	MPa
		Límite de resistencia a la tracción	345	MPa
		Módulo de Young	220	GPa
		Módulo de corte elástico	86.274	GPa
Carcasa	Láminas de acero inoxidable 430, P3, calibre 10	Densidad	7.8	g/cm ³
		Límite de resistencia a la tensión	207	MPa
		Límite de resistencia a la tracción	345	MPa
		Módulo de Young	220	GPa
		Módulo de corte elástico	86.274	GPa
Sujetadores de los flotadores	Acero 1045	Densidad	7.85	g/cm ³
		Límite de resistencia a la tensión	207	MPa
		Límite de resistencia a la tracción	345	MPa
		Módulo de Young	220	GPa
		Módulo de corte elástico	86.274	GPa
Flotadores	Acero 1045	Densidad	7.85	g/cm ³
		Límite de resistencia a la tensión	207	MPa
		Límite de resistencia a la tracción	345	MPa
		Módulo de Young	220	GPa
		Módulo de corte elástico	86.274	GPa

En la Figura 28, se muestra el montaje que será analizado para la transmisión de potencia, comprendido de: el rodete (1), eje rodete-engranaje (2), eje entre engranajes (3), eje inferior (4),



Engranaje conductor cónico (5), engranaje conducido cónico (6), engranajes rectos (7) y los rodamientos (8), todo ello con la finalidad de verificar que la geometría y los componentes no presenten fallos bajo condiciones de funcionamiento

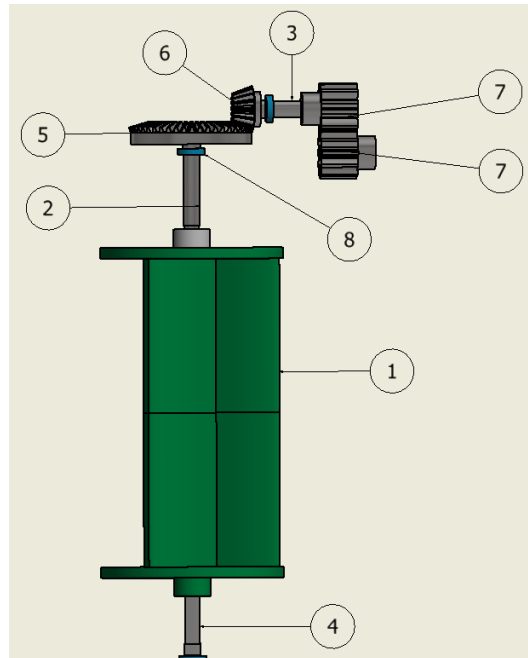


Figura 28. Montaje transmisión de potencia

Una vez que se ha determinado que el torque resultante sobre el rodete es de 19 N m, fuerza axial del agua 152 N tal como se muestra en la Figura 29, se procederá con el cálculo de los ejes, engranajes y rodamientos.

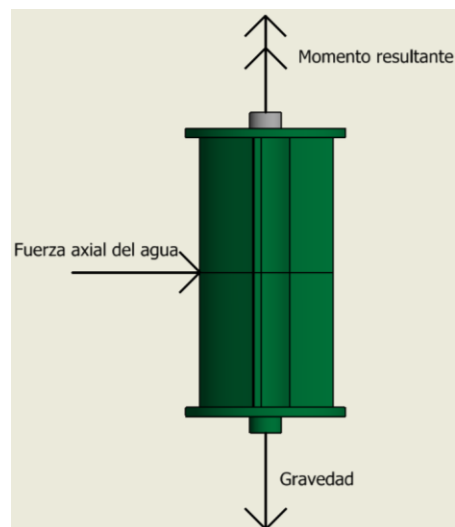


Figura 29. Diagrama de cuerpo libre del rodete



6.4.2.1. Cálculo de ejes

Para el cálculo de los ejes se hizo énfasis en el eje rodete - engranaje, ya que es en este componente donde se presentaba la mayor magnitud de cargas, convirtiéndolo así en el elemento crítico del diseño y por tanto el único al que se detallarán sus características a continuación. Como se muestra en la Figura 30, se evidencia el diagrama de cuerpo libre del eje, para posteriormente determinar: el esfuerzo cortante, momento flector, momento de torsión, deflexión, ángulo de deflexión y diámetro ideal; para ver los diagramas correspondientes a los ejes faltantes ver Anexo D.

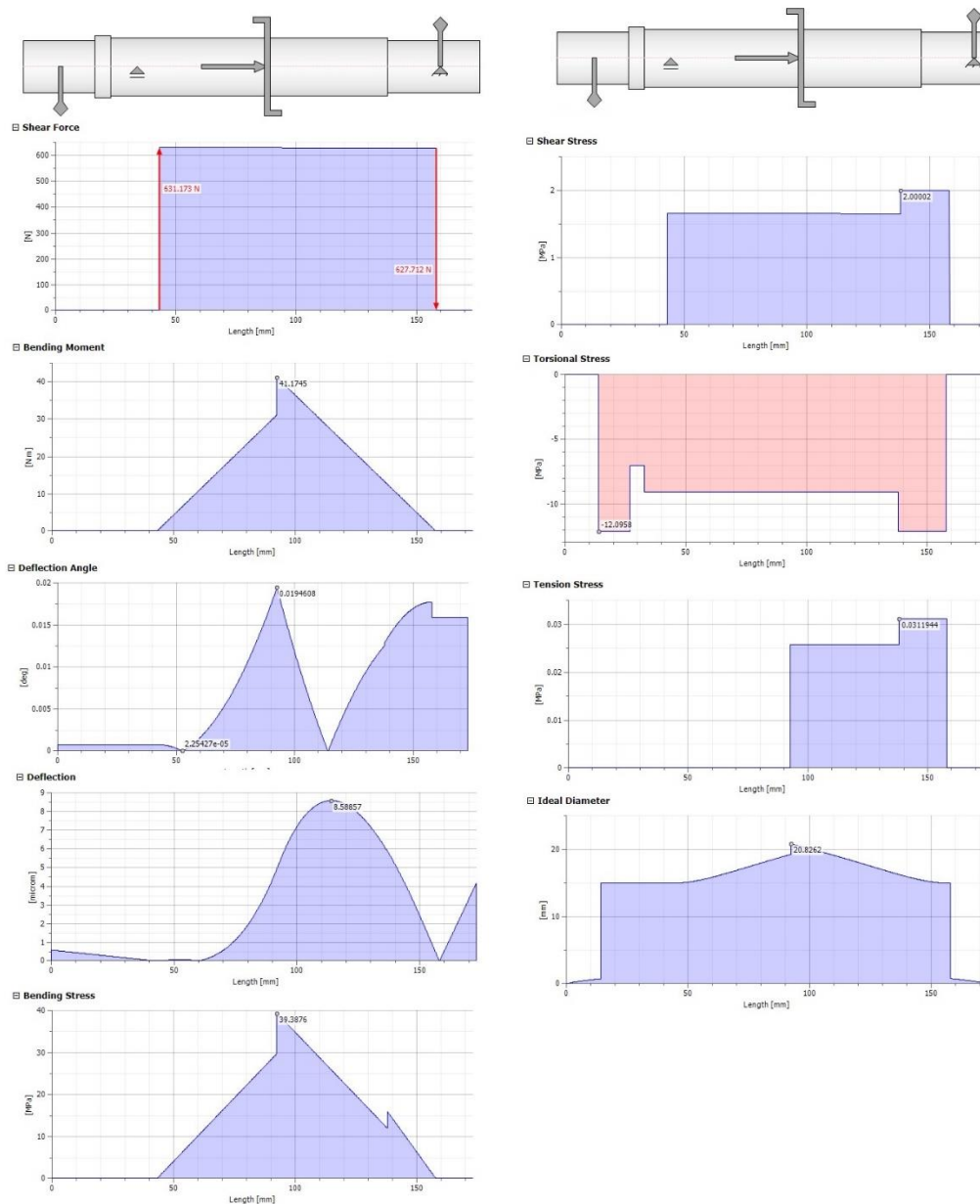


Figura 30. Diagrama de cuerpo libre y resultados de análisis de esfuerzos para el eje rodete - engranaje



En la Tabla 17, se muestran los valores máximos para el elemento crítico. Una vez que se ha determinado el diámetro ideal para el eje en el punto crítico, se sobredimensiona para evitar que el mecanismo falle en caso de que llegue a trabajar a su máxima capacidad, dicho cambio dimensional se evidencia en los planos de la turbina.

Tabla 17. Resultados del estudio de esfuerzos en el eje rodete - engranaje.

Eje rodete - engranaje	Características		
	Longitud	173	mm
	Diámetro ideal	20	mm
	Esfuerzo máximo a la flexión	39.388	Mpa
	Esfuerzo cortante	2	Mpa
	Esfuerzo máximo a tensión	0.031	Mpa
	Esfuerzo máximo a torsión	12.1	Mpa
	Deflexión máxima	0.00859	mm
	Angulo de giro	0.10	°

6.4.2.2. Cálculo de engranajes

Se tomó la decisión de usar engranajes cónicos rectos, esto debido a que por los requerimientos geométricos establecidos anteriormente es necesario transmitir la energía de forma perpendicular al rodete, otro de los factores que se tienen en cuenta para la selección de engranajes es la velocidad nominal requerida para el generador elegido (650 RPM).

Para los engranajes se repetirá el proceso mostrado en la sección anterior, por medio del diagrama de cuerpo libre de los mismos (Figura 31). En el Anexo E, se muestran los engranajes elegidos del catálogo de productos del fabricante CAUSER, además del diagrama de cuerpo libre correspondiente y en la Tabla 18, se pueden observar las especificaciones de los engranajes seleccionados.

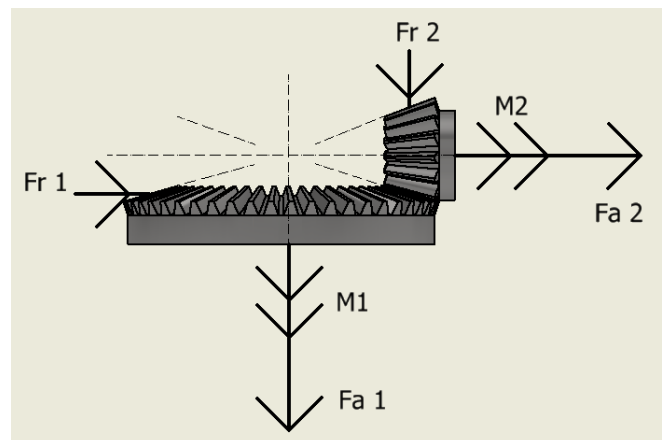


Figura 31. Diagrama de cuerpo libre engranajes



Tabla 18 Especificaciones de los engranajes elegidos.

Características					
Engranajes cónicos	Fuerza radial		Fr 1	30.758	N
			Fr 2	92.274	N
	Torque		M1	19	N m
			M2	5.7	N m
	Fuerza axial		Fa 1	92.274	N
			Fa 2	30.758	N
	Fuerza tangencial		Ft	267.235	N
	Fuerza normal		Fn	284.358	N
	Factor	sobrecarga	Ko	1.2	-
		dinámico	Kv	1.049	-
		tamaño	Ks	1	-
		Confiabilidad	Kr	1	-
		Distribución de carga	Km	1	-
		temperatura	Kt	1	-
		superficie	Cf	1	-
Velocidad	Conductor	n	254.35	RPM	
	Conducido		763.06	RPM	
Eficiencia			η	0.9	



6.4.3. Diseño de rodamientos

Para la turbina es fundamental contar con una serie de elementos que sujeten y aseguren los elementos que hacen parte del sistema de transmisión (rodamientos) y con otros elementos que eviten fugas que afecten o desgasten otras piezas o mecanismos. De igual manera al sistema de transmisión y potencia, todos los elementos, tanto sellos como rodamientos, son fácilmente extraíbles e intercambiables.

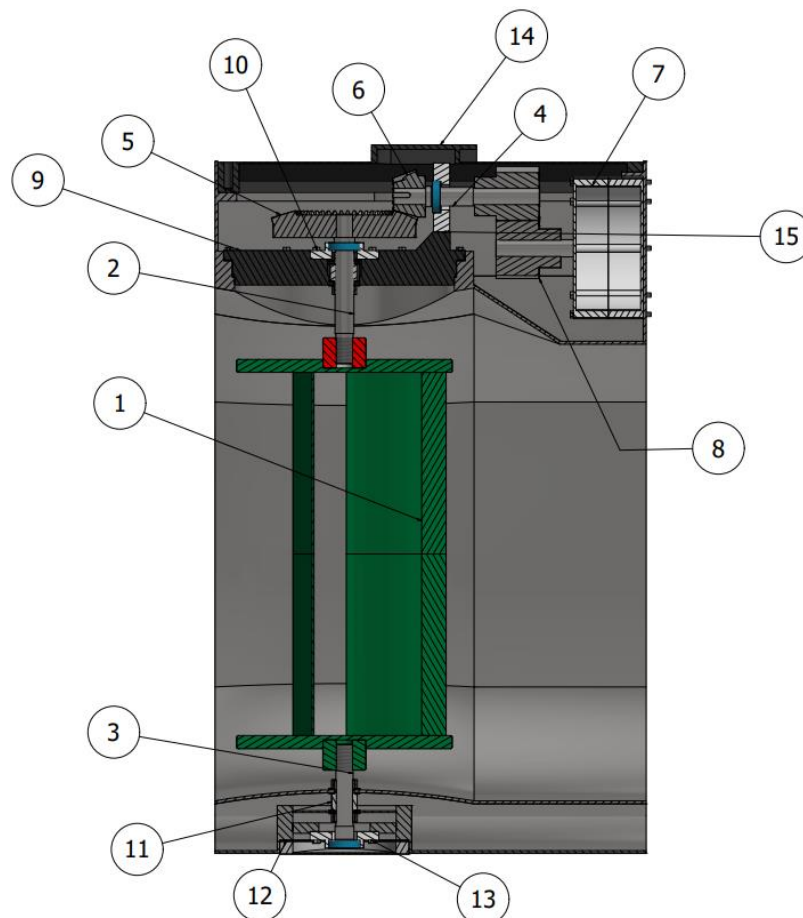


Figura 32. Sistema de transmisión, rodamientos y sellos

Los elementos se pueden dividir en 2 grandes grupos: engranajes y sellos. Tomando en cuenta la Figura 32, a se describe cada uno de los grupos de manera detallada (los planos de los elementos descritos se encuentran en el Anexo J):

- Sellos: en este grupo se involucran todos los elementos asociados a evitar que haya fugas que puedan llegar a comprometer alguna pieza o elemento. En la parte superior de la cámara del rodete, se ubica una tapa (9) para cubrir la abertura dispuesta para el acceso a la misma, dicha tapa tiene un par de sellos como precaución para evitar pequeñas fugas;



encima de este último se encuentra el rodamiento (10), el cual sujeta la parte superior del eje principal superior y el engranaje acoplado a dicho eje. En la parte inferior de la cámara del rodete, se encuentra un prensaestopa (11) con dimensiones precisas para que el eje pase (pero evitando que se filtre agua). Debajo de este elemento, prácticamente en la parte inferior dentro de la carcasa, se ubica una la tapa de acceso al rodamiento inferior (12) donde se coloca otro rodamiento (13), el cual soporta es soportado por una chumacera y a su vez soporta el eje inferior y el rodete. En la carcasa exterior se tiene otra tapa (14) para sellar el compartimiento donde están los engranajes y rodamientos alojados, también con un sello adicional para evitar cualquier posible fuga del exterior.

- Rodamientos: Los rodamientos fueron escogidos según los resultados de cargas calculadas, en la parte superior de la cámara del rodete se ubica un primer rodamiento (10), este está ajustado en la parte inferior del compartimiento designado para el generador y el mecanismo de engranajes. Un segundo engranaje (15) también se ubica en el compartimiento antes descrito, y está alojado en una chumacera la cual esta atornillada a una pequeña base diseñada dentro del compartimiento. Por último, se tiene un tercer rodamiento (13), ubicado como se indicó anteriormente, en una placa en la parte inferior de la turbina, para fácil acceso de dicho rodamiento se habilito un comportamiento con tapa para acceder al elemento por la parte inferior de la turbina.

Una vez que se han determinado cuales son las reacciones máximas que existen en los apoyos, estas magnitudes serán tomadas como base para la selección del rodamiento a través de catálogo de productos del fabricante SNR, el rodamiento elegido para este caso será el SNR 6004 ya que es más pertinente para el caso estudiado y será utilizado para el soporte de los tres ejes que componen la máquina. En la

Tabla 19, se encuentran de manera resumida los datos más relevantes para la elección del rodamiento. Las especificaciones de las chumaceras seleccionadas para estos rodamientos se encuentran en el Anexo F.

Tabla 19. Reacciones características de los seleccionados.

Reacción máxima en X	447.834 N
Reacción máxima en Y	444.765 N
Reacción máxima en Z	4.3 kN

Designación	6004
Diámetro interior	d 20.000 mm
Diámetro exterior	D 42.000 mm
Reacción máxima en X	B 447.834 N
Reacción máxima en Y	α 444.765 N
Reacción máxima en Z	C 4.3 kN
Carga estática	C_0 5000 N
Designación	6004
Diámetro interior	d 20.000 mm
Diámetro exterior	D 42.000 mm
Ancho	B 12.000 mm
Ángulo nominal de contacto	α 25 deg
Carga dinámica	C 9400 N
Carga estática	C_0 5000 N

máximas y
rodamientos



6.4.4. Diseño de las carcasas

La construcción de la carcasa, que abarcará tanto el sistema de entrada como salida del agua, y además soportará estructuralmente el rodete y transmisión de potencia de la turbina, va a ser fabricada con son láminas de acero inoxidable 430, con acabado superficial P3 y calibre 10, las secciones están unidas entre sí por medio de juntas soldadas. Sin embargo, las tapas de acceso a los rodamientos y ejes están construidas en PLA (reduciendo el peso), los planos de dichas piezas se pueden observar en el Anexo J y más adelante son descritas a detalle.

En la Figura 33, es apreciable las tres carcasas correspondientes a las respectivas secciones definidas desde el inicio del diseño: la sección de entrada (1), la sección de la cámara del rodete (2) y la sección de salida (3). Cada sección se describe detalladamente a continuación:

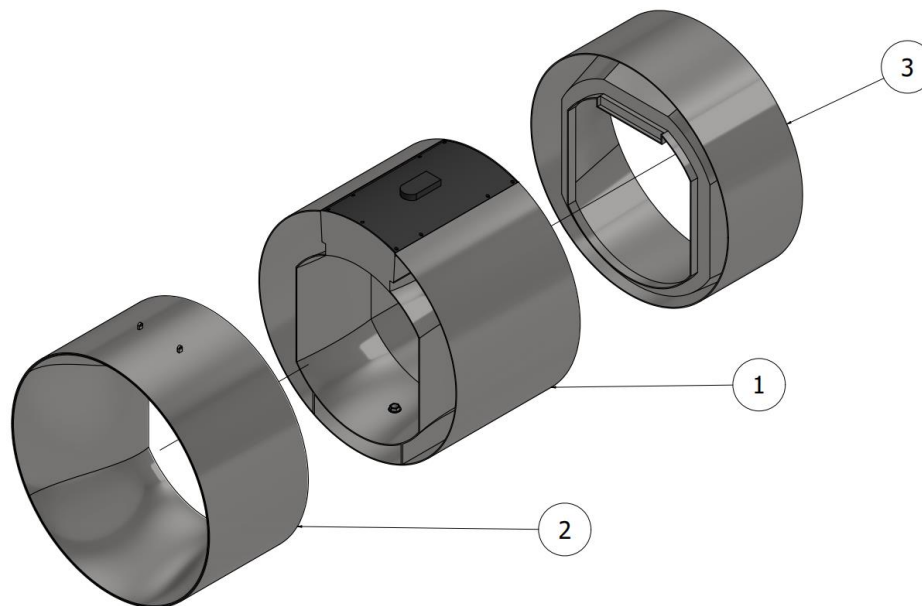


Figura 33. Explosionado carcasas.

En la Figura 34, se observa la entrada de la turbina, es importante resaltar que bajo el cálculo de la sección de entrada (desarrollado en el siguiente capítulo), se realiza un cambio de sección considerable para aumentar la velocidad de corriente.

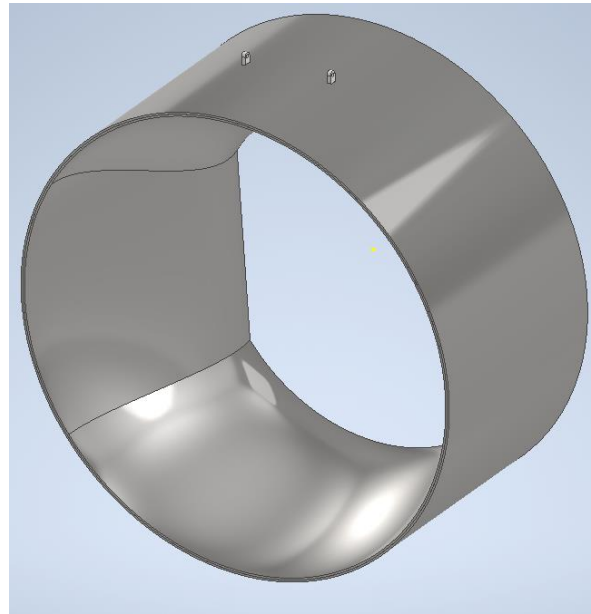


Figura 34. Entrada de la turbina

En la Figura 35, se encuentra la sección denominada cámara del rodete, que se divide en tres grandes partes tal y como se muestra en detalle en los planos, la parte exterior, la caja de transmisión y por último la sección interna.

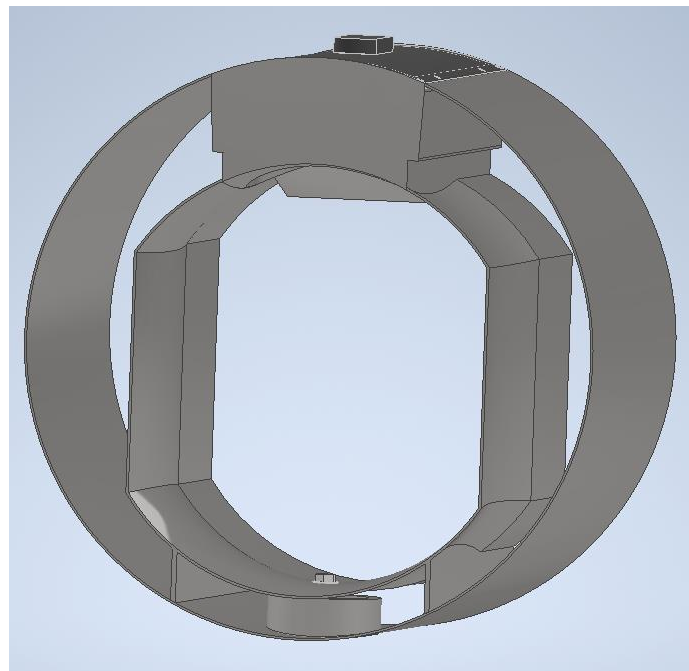


Figura 35. Cámara del rodete.



Por último en la Figura 36, se observa la sección correspondiente a la salida del agua donde se trata de emular un difusor como se muestra mas adelante en los calculos de la sección de salida.

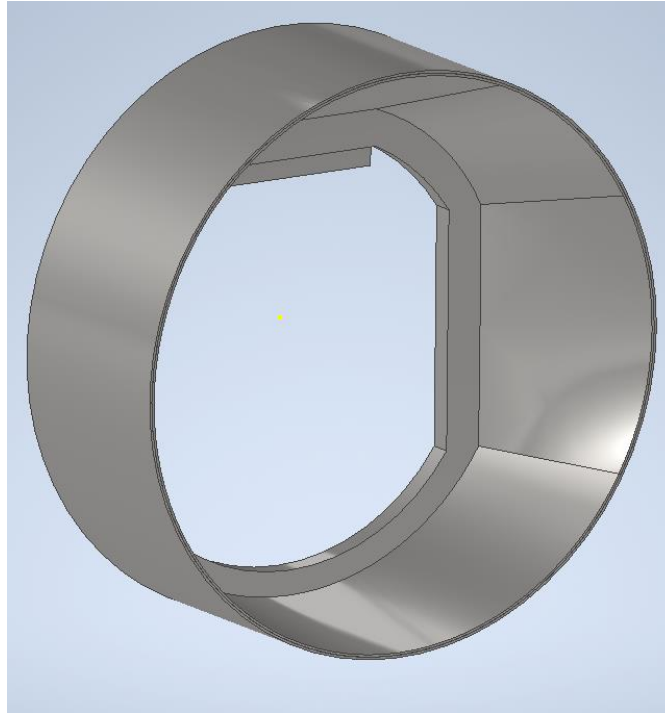


Figura 36. Salida de la turbina

6.4.5. Cálculo sección de entrada.

Se plantea que la sección de la entrada y donde está ubicado el rodete, corresponderá a la forma de un tubo Venturi (Figura 37); aprovechando el aumento de velocidad generado por la disminución de área (Efecto Venturi).

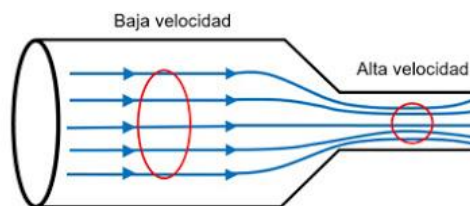


Figura 37. Tubo Venturi. [66]

Tomando en cuenta que el caudal en las dos secciones es el mismo, se hace uso de la Ecuación 17 para hallar el valor de velocidad en la sección del rodete; considerando que la sección de la entrada tiene un diámetro de 0,8 m, la sección del rodete 0,6 m y la entrada de velocidad del flujo a la



entrada es de: 0,929 m/s. Es valida la aclaración, que se usa un valor de 0,8 m y no 1 m a la entrada de la turbina, debido a que se considera que en este punto es donde el nivel de agua va a ser constante y no justo a la entrada de la turbina, a causa básicamente porque la turbina no va a estar del todo sumergida.

$$v_2 = \frac{A_1 * v}{A_2}$$

Ecuación 17. Velocidad en la sección del rodete.

Dónde: v es la velocidad de corriente inicial (m/s), v_2 es velocidad en la sección del rodete (m/s), A_1 es el área transversal de la sección de entrada (m²) y A_2 es el área transversal de la sección del rodete (m²).

Se obtuvo una velocidad en la sección del rodete de: 1,652 m/s, aumentando considerablemente el valor de la velocidad de corriente inicial.

6.4.6. Sistema para salida de agua

Para la salida de agua se determina que la forma más sencilla de evacuar el agua es haciendo uso de un difusor. Inicialmente se realizó un ejercicio en el cual se calcula teóricamente la velocidad en las diferentes secciones de una turbina [23], obteniendo como resultado la Tabla 20. Se usa un factor de inducción correspondiente a 1/3, tal y como lo expone Benz [23]; se observa que a la salida del rodete se tendrá una velocidad de 0,551 m/s y que los cambios de presión entre la entrada y salida del rodete son insignificantes debido a que son muy reducidos. La afirmación anterior se sustenta con las simulaciones realizadas, donde la diferencia de presión entre la entrada y la salida en ningún momento sobrepasan los 2000 Pa.

Tabla 20. Velocidad y presiones teóricas en la turbina.

Factor de inducción	1/3	m/s
Velocidad entrada sección de rodete	1,652	m/s
Velocidad en el rodete	1,102	m/s
Velocidad en la salida de la turbina	0,551	m/s
Presión entrada sección de rodete	101325	Pa
Presión entrada de rodete	102083	Pa
Presión salida rodete	100870	Pa
Presión en la salida de la turbina	101325	Pa

En un robusto análisis realizado por Carona Macilla [60] donde se expone un estudio completo de las ventajas de un difusor en las turbinas, adicionalmente reafirma el uso de difusor realizando una simulación de varias turbinas con y sin difusor, como se puede observar en la Figura 38, el uso de difusor aumenta de manera considerable el coeficiente de potencia de la turbina. Además de mejorar el control de flujo y velocidad de corriente en la salida de la turbina, tal y como se evidencia en el análisis por medio de CFD mostrado en la Figura 39.

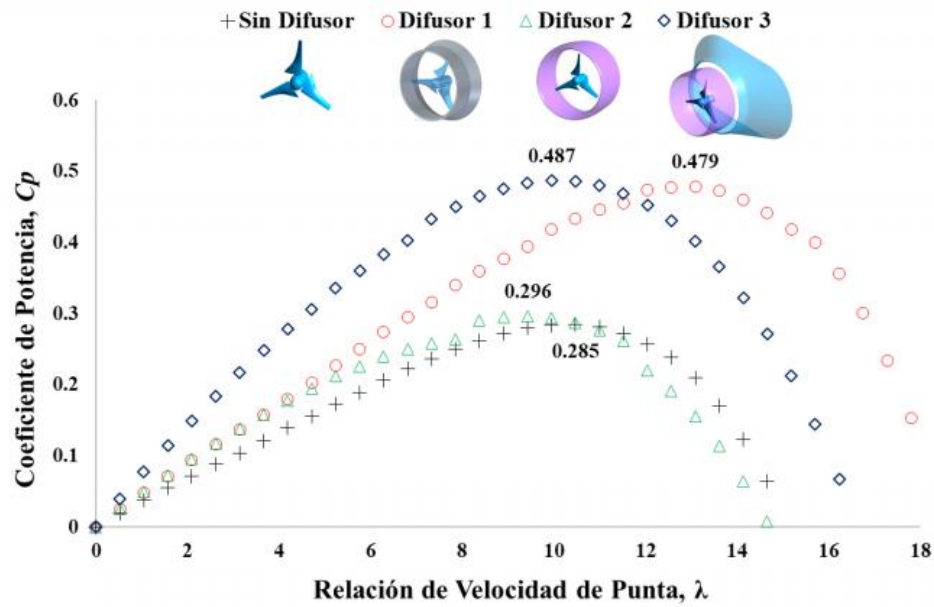


Figura 38. Gráfica de C_p VS λ para turbina con difusor y sin difusor

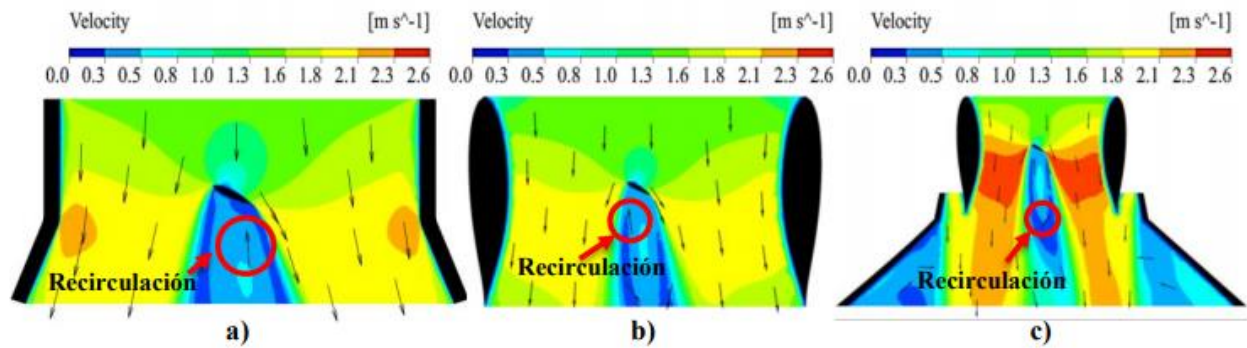


Figura 39. Simulación de diferentes difusores



6.4.7. Sistema de conexión

Para la distribución de la energía obtenida a partir de la turbina, se determina que se debe realizar una línea de cableado desde la turbina hasta un poste elevado a una altura prudente; para evitar el contacto con el agua. En dicho poste se instalará una pequeña estación eléctrica que tendrá como función hacer apta la energía eléctrica para la conexión con la red tradicional. En la Figura 40, se demuestra gráficamente la instalación adecuada del sistema de conexión.

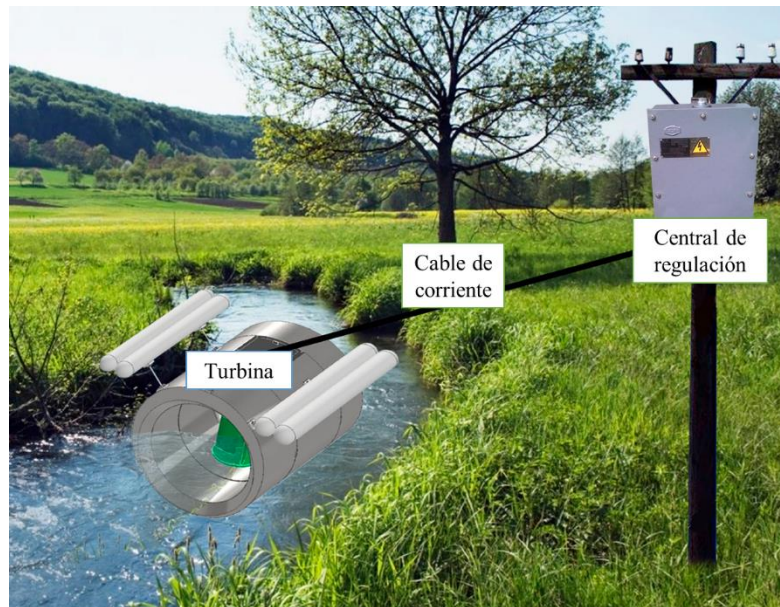


Figura 40. Instalación sistema eléctrico de la turbina

Como se aprecia en la Figura 41, se tendrán una serie de equipos básicos para la correcta distribución de la energía generada:

- Regulador: Este equipo impide el daño de las baterías por exceso de potencia u otros factores. Además, permite controlar el paso de electricidad hacia la red convencional.
- Baterías: Conjunto de baterías conectadas posiblemente en serie, cargadas por medio del regulador, almacenando la energía obtenida. Funciona también como fuente auxiliar en caso de que la energía distribuida directamente por el regulador no sea suficiente e inestable.
- Inversor DC-AC: equipo que realiza la conversión de corriente continua o directa que ha sido almacenada en las baterías o corriente alterna, cambio necesario para poder conectarse con la red convencional.

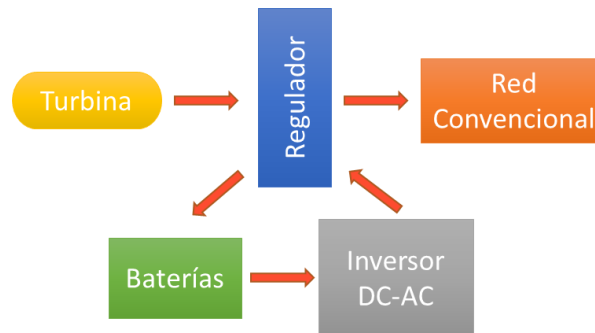


Figura 41. Sistema eléctrico de la turbina

No se profundizó mucho más en la conexión y distribución eléctrica, debido a que no es la naturalidad del proyecto. Sin embargo, se planteó un sistema que garantiza la distribución adecuada y sin interrupciones de electricidad; basado en la realizada en proyectos con condiciones y requerimientos eléctricos similares [67]. Las especificaciones de los posibles equipos a implementar en el proyecto se encuentran en el Anexo H; aunque esta elección está sujeta a cambios, correcciones u optimizaciones para mejorar la eficiencia

6.4.8. Sistema de flotabilidad y sujeción

Para el sistema de flotabilidad y sujeción se realizan los diferentes cálculos pertinentes para garantizar la seguridad y evitar el hundimiento de la máquina, en la Tabla 21 se muestran desglosados los datos utilizados. Para determinar si el equipo no se hundirá se calculó la densidad teórica de la turbina por medio de la Ecuación 18. Como la densidad calculada ($124,78 \text{ kg/ m}^3$) es menor a la densidad del agua ($997,13 \text{ kg/ m}^3$), entonces la turbina no se hundirá; sin embargo, se continuará con el análisis de sujeción para evitar que la turbina sea arrastrada por la corriente del río y asegurando la misma para que funcione sin inconvenientes.

$$\rho_t = \frac{m_t}{V_t}$$

Ecuación 18. Fuerza de empuje

Donde: d_t es la densidad de la turbina (kg/m^3), m_t es la masa de la turbina (kg) y V_t es el volumen de la turbina (m^3)

Tabla 21. Datos para el cálculo de flotabilidad

Gravedad	9,81	m/s
Densidad de agua	997,13	kg/ m ³
Masa de la turbina	98,00	kg
Peso turbina	961,38	N
Diámetro turbina	1,00	m
Largo turbina	1,00	m



Volumen turbina	0,79	m ³
Densidad turbina	124,78	kg/ m ³

Tomando en cuenta el peso de la turbina y considerando el peor de los casos en donde la turbina tenga alguna fisura y se inunde por completo, así como también el cálculo de la fuerza de arrastre (Ecuación 19), considerando un coeficiente de arrastre de 1,1 (Figura 42), se obtuvo como resultado un peso total de 12326,76 N (Tabla 22). Dicha fuerza es la que debe soportar el cable para sostener la turbina, por lo tanto, se estableció que se puede usar un cable galvanizado de 7 hilos de 3/8" (Tabla 23).

$$Fa = \frac{1}{2} * C * \rho * A * v^2$$

Ecuación 19. Fuerza de arrastre

Donde: Fa es la fuerza de arrastre (N), C es el coeficiente de arrastre, ρ es densidad (kg/m³), A es el área transversal de la turbina (m²) y v es la velocidad máxima de la corriente del río (m/s).

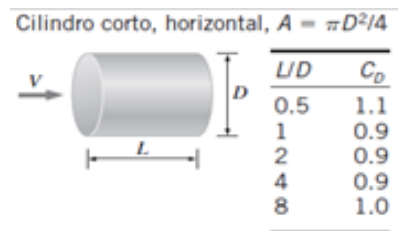


Figura 42. Coeficiente de arrastre cilindro. [68]

Tabla 22. Datos para el cálculo de sujeción

Velocidad máxima	4,96	m/s
Coeficiente de arrastre	1,10	
Área transversal	0,79	m ²
Fuerza de arrastre	10582,23	N
Fuerza total soportado por el cable	12326,76	N

Tabla 23. Especificaciones para cable de acero galvanizado de 7 hilos de grado común. [69]

Diámetro nominal del cable		Tensión de rotura cable de grado común		
[Plg]	[mm]	[lbf]	[kN]	[kgf]
1/4"	6.35	1900	8.452	862
3/8"	9.52	4250	18.90	1927
7/16"	11.11	5700	25.36	2856



En la Figura 43, se muestra un esquema general de cómo se instalaría la turbina, se decidió hacer el sistema lo más simple posible pero seguro a la vez. A pesar de que solo el cable es el responsable de la sujeción de la máquina, es la manera más sencilla y menos costosa, además no solo sujeta sino también evita el volcamiento de la turbina, ayudando a su estabilidad. Adicional se adicionaron dos flotadores únicamente con la función de estabilizar la turbina, el mecanismo anclado turbina-flotador, permite una mayor estabilidad cuando haya cambios bruscos en la dirección de la corriente.

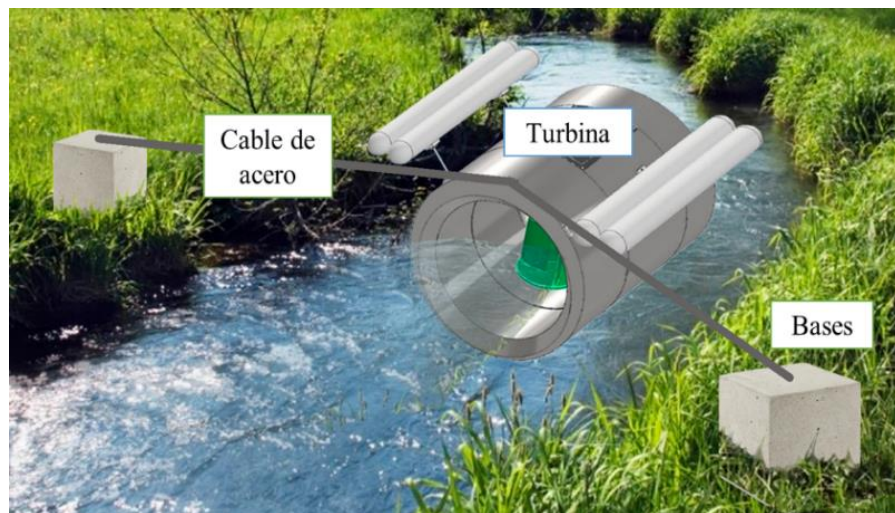


Figura 43. Esquema elementos de flotación e instalación turbina



6.5. Mantenimiento

A pesar de que, para establecer un plan de mantenimiento en la turbina es necesario tomar en consideración detalles de manufacturación y aspectos de otra índole. Se considera que de manera general se deben realizar una serie de inspecciones para evitar daños dentro de los mecanismos y la integridad misma de la turbina. También se aconseja realizar una serie de cambios a sellos y otros componentes que se irán desgastando con el tiempo. Las consideraciones principales se resumen a continuación:

- Realizar una inspección rutinaria, semanal o mensual (según sea conveniente). Donde se revise la integridad y funcionalidad de la máquina. En dicha supervisión se comprobará la integridad de la carcasa, se sacarán los diferentes implementos como: engranajes, sellos, prensaestopas, eje, rodete, etc. Verificando que no tengan daños mayores y de que no hallan fugas dentro de los comportamientos cerrados.
- A pesar de que el equipo estándar no tiene integrados equipos de telemetría o afines, se debe supervisar los picos de voltaje que tiene la turbina en su servicio diario, hacer seguimiento y control de este. En la estación eléctrica destinada para la regulación de electricidad obtenida del generador se considera de suma importancia contar con los equipos en buenas condiciones y estricto orden, así como también contar con una parada de emergencia y otros protocolos de seguridad.
- Se recomienda también estar al tanto de cambios climáticos abruptos en los que la turbina pueda estar comprometida, si es posible implementar mecanismos sencillos para medir el caudal y la velocidad de corriente con el fin de garantizar el buen funcionamiento de la turbina. Así como también es relevante estar al tanto de cualquier tipo de fauna o flora en el lugar de instalación, si bien la turbina no emite agentes contaminantes, puede llegar afectar el ecosistema que no ha sido intervenido.
- Es importante hacer cambio de sellos, rodamientos y otros implementos que muestren cierto desgaste importante, puesto que si fallan pueden permitir fugas y comprometer el generador y otros dispositivos.
- Realizar una inspección visual, si es posible diaria o semanal, en donde se verifique que la carcasa no ha sufrido cambios, que el cable esta tensionado y sin daños. También observar el nivel en el que se encuentra la turbina y si está arrastrando algún tipo de desecho que pueda afectar el funcionamiento correcto de la máquina.



6.6. Resultado final turbina

El resultado final es apreciable en la Figura 44, la unión soldada da rigidez a la parte estructural de la turbina, adicionalmente el sistema de flotabilidad y sujeción impide que la turbina se vea afectada por fuertes corrientes, rocas, desechos u otros factores externos. Al ser tan sencilla, es fácil de transportar e instalar; además de ser amigable con el medio ambiente, puesto que no emite directamente ningún tipo de contaminante, ni siquiera afecta a la fauna y flora (a diferencia de otras turbinas tradicionales que afecta no solo el ecosistema si no que interviene con peces y demás seres vivos dentro de los ríos). Los compartimientos los cuales tienen piezas de más cuidado como: rodamientos, generador, engranajes; se encuentran sumamente sellados y salvaguardados nuevamente por el sistema de flotabilidad y sujeción.

Muchas alternativas de energía hidrocinética son sumamente complejas; hasta para su supervisión y mantenimiento, es necesario parar la operación por completo, en ocasiones por días hasta a veces semanas. En cambio, la turbina del proyecto desarrollado está diseñada para el fácil cambio y mantenimiento de sus componentes principales (incluyendo ejes y rodete).

A pesar de que la turbina no genera la misma cantidad de energía comparándola con otras alternativas similares, si garantiza una frecuencia constante de energía, hasta en épocas de sequía. Adicional se pueden incorporar otras turbinas en serie para tener un efecto multiplicador.

Es una solución que puede llegar a resultar económica debido a la facilidad de obtención de sus piezas, facilidad de fabricación, ensamble, transporte e instalación. Es un proyecto se puede replicar en otras regiones del país con parámetros similares, hasta modificar para adaptarse a otros caudales y velocidades de corriente distintos. Su bajo costo y poco impacto ambiental, ayuda que socialmente sea una alternativa acertada para trabajar en lugares inhóspitos y donde la cobertura de la red tradicional es sumamente compleja y costosa, en caso de ser instalada.

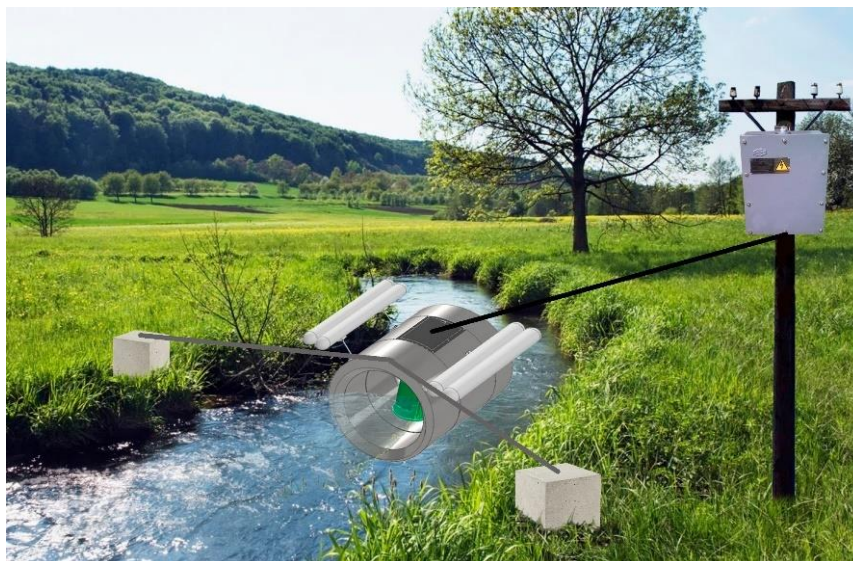


Figura 44. Instalación final



6.7. Costos proyecto

En la Tabla 24, se puede apreciar el costo total del proyecto. Para desglosar dicho costo se tomó en cuenta inicialmente el valor estipulado en el anteproyecto, donde se toma en cuenta las horas de labor de los integrantes asociados al proyecto, así como otros costos derivados de la conceptualización de este. Posteriormente se estimó los costos derivados de la manufactura, ensamble, transporte e instalación de la turbina, cabe aclarar que todos los costos son aproximados y pueden variar, se realiza este análisis simplemente como base para un posterior estudio económico mucho más robusto.

Tabla 24. Costos de proyecto

Concepto			Cantidad	Unidad	Costo unidad (COP)	Costo total (COP)
Proyecto teorico			1	UN	\$ 4.588.000	\$ 4.588.000
Manufactura	Materiales	PLA	10	kg	\$ 70.000	\$ 700.000
		Barra de acero inoxidable 304 (1 in x 6m)	1	\$	115.000	\$ 115.000
		PVC (4 in * 1 m)	4	UN	\$ 20.000	\$ 80.000
		Laminas de acero calibre 10 (4 X 10 pies)	2	UN	\$ 350.000	\$ 700.000
	Labor	Maquinado	8	horas	\$ 20.000	\$ 160.000
		Impresión	12	horas	\$ 72.000	\$ 864.000
Soldadura y trabajos varios		48	horas	\$ 4.000	\$ 192.000	
Ensamble	Elementos standard	Sellos	4	UN	\$ 5.000	\$ 20.000
		Prensaestopas	2	UN	\$ 50.000	\$ 100.000
		Rodamientos	2	UN	\$ 30.000	\$ 60.000
		Engranajes	2	UN	\$ 50.000	\$ 100.000
		Acople	1	UN	\$ 20.000	\$ 20.000
	Elementos electricos	Baterias	1	UN	\$ 3.000.000	\$ 3.000.000
		Inversor	1	UN	\$ 1.150.000	\$ 1.150.000
		Regulador	1	UN	\$ 165.000	\$ 165.000
	Labor	Tecnico	48	horas	\$ 4.000	\$ 192.000
Transporte	Camión y conductor	Hasta el lugar de instalación	1	UN	\$ 1.500.000	\$ 1.500.000
Instalación	Materiales	Poste (en caso de ser necesario)	1	UN	\$ 500.000	\$ 500.000
		Cable (3/8 in)	12	m	\$ 6.000	\$ 72.000
		Bases cementadas	2	UN	\$ 25.000	\$ 50.000
		Cajon de control electrico	1	UN	\$ 20.000	\$ 20.000
	Labor	Tecnico	48	horas	\$ 4.000	\$ 192.000
		Especialista	16	horas	\$ 10.000	\$ 160.000
		Supervisor	8	horas	\$ 25.000	\$ 200.000
Proyecto completo			Total		\$ 14.900.000	



7. Conclusiones

Después de la realización del diseño a detalle de la turbina se deben considerar varias cosas importantes, si bien la turbina no tiene un impacto importante en cuanto a la cantidad de energía capaz de producir, puesto que solo puede llegar a 3 kWh por día, si lo hace de una manera limpia y amigable con el medio ambiente, además alcanza el objetivo primario dentro del rango de energías “pico”. Es versátil para transportar y su instalación, aunque es algo engorrosa, permite la conexión a red tradicional asegurando la distribución de la electricidad generada.

Se considera que existen varias oportunidades de mejora y de optimización del diseño planteado, la versatilidad de la turbina permite que se hagan uso de diferentes materiales y al ser tan sencilla también da cabida a cambios que pueden abaratar costos y hacerla más eficiente. También cabe anotar que la turbina puede ser instalada junto con otras con el fin de generar un efecto multiplicador, así mismo se debe investigar más en cuanto a cómo se podría hacer más eficiente la pequeña central eléctrica, para que así sea mucho mayor el beneficio.

En cuanto a las simulaciones realizadas por medio de CFD, se logró realizar lo propuesto, gracias a la aplicación de esta herramienta se pueden realizar varios estudios y análisis interesantes si necesidad de hacerlo de manera práctica. Este proyecto permite que se hagan múltiples análisis que logren simular situaciones en las que la turbina sea partícipe, pero ya en un ámbito más real, adicionalmente se pueden realizar estudios más específicos como el realizado con los alabes del rodete. Es importante resaltar la importancia que tiene establecer un tipo de alabe, debido al análisis realizado se considera que la forma y tipo de alabe es fundamental para tener un sistema eficiente de captación de energía, esto sustentado con un análisis completo incluyendo una simulación realizado por CFD da más peso a la parte teórica, no solo verificando los valores obtenidos, si no también asegurando un funcionamiento acorde a la realidad y que en la práctica será más certero. Siendo de gran utilidad para el diseño de la máquina y para demás consideraciones como: instalación, manufactura, ensamble, etc.

Siendo la salida del agua un inconveniente inicial desde el principio, y después de estudiar varias posibilidades se consideró una solución más sencilla, como muchos sistemas de evacuación de agua en otras máquinas, se utilizó simplemente una manguera que con ayuda de la forma característica de la turbina (la cual aumenta la velocidad de corriente), permite que la evacuación sea sencilla pero eficaz. A pesar de ser algo rústica, es de resaltar que no utiliza mecanismos adicionales favoreciendo el peso y sencillez de la máquina, lo que se traduce en versatilidad en el momento de ensamblar, transportar e instalar.

El sistema de flotabilidad y sujeción de la turbina no es menor, los datos calculados garantizan la seguridad de la máquina, el aspecto más relevante dentro del diseño de esta. Adicionalmente su impacto ambiental es mínimo, puede llegar a compararse con sistemas telemétricos en función al espacio que ocupa y la forma en que es instalado. Por esta razón representa una ventaja absoluta frente a centrales hidroeléctricas (micro, pequeñas o medianas), además asegura una funcionalidad independiente de otros factores, sumando otra ventaja a lo esperado por cualquier otra máquina similar.



Su instalación también es sencilla, a pesar de que puede llegar a ser en un punto tedioso debido al posible tiempo de instalar postes, asegurar cables u otras tareas similares, definitivamente aseguran la turbina y lo hacen con un mínimo de recursos y esfuerzo.

Por medio de este proyecto también se establece la importancia y necesidad de seguir trabajando en la sostenibilidad y energías renovables, campo que ha cobrado mucha fuerza y donde los ingenieros son protagonistas para que desde sus conocimientos puedan aportar para lograr tecnologías más limpias y sustentables.



Referencias

- [1] UPME, *Atlas Potencial Hidroenergetico de Colombia*. .
- [2] UPME, “Proyección de Demanda de Energía Eléctrica en Colombia,” *Unidad Planeación Min. Energética-UPME*, pp. 1–50, 2013.
- [3] “LEY 1715 DE 2014,” 2013.
- [4] A. L. Fecf, “Lista de priorizacion de proyectos que solicitan recursos del FECF,” p. 2012, 2012.
- [5] Ministerio de Minas y Energía de Colombia, “Energía Eléctrica en Colombia,” *Memorias del Congr. la República*, 2013.
- [6] UPME, “Costos indicativos de generación eléctrica en Colombia,” 2005.
- [7] P. Fernández Díez, “Turbina Pelton.”
- [8] BUN-CA, *Manual sobre energía renovable. Hidráulica a pequeña escala*, vol. 66. 2002.
- [9] EPEC, “La tecnología hidroeléctrica,” *Epec*, pp. 1–18, 2010.
- [10] H. Villalba, “Energía hidráulica,” 2008.
- [11] T. Reyna, M. Lábaque, S. Reyna, C. Riha, and B. Irazusta, “Energía mini y micro hidráulica: aporte contra el Cambio Climático,” 2017.
- [12] F. Coz *et al.*, “Manual de mini y microcentrales hidráulicas.” 1995.
- [13] R. Santos and J. Muñoz, “Guía de Turbinas Hidráulicas,” 2014.
- [14] ITDG, “Ficha técnica turbinas Pelton.”
- [15] ITDG, “Ficha técnica turbina Michell-Banki.”
- [16] P. Fernández Díez, “Turbinas hidráulicas.”
- [17] N. Levesque, “Plastic hydraulic turbine,” no. 19, pp. 4–6, 2014.
- [18] S. Campos Alvarez, “Turbina radial eólica o hidráulica,” no. 12, 2008.
- [19] S. A. Winfiel, “Tapered helical auger turbine to convert hydrokinetic energy into electrical energy,” vol. 2, no. 12, 2012.
- [20] M. R. Gutierrez Nuñez, “Turbina de barrido hidraulico avanzada,” no. 12, 2012.
- [21] C. Sánchez, “Turbinas hidrocínicas una alternativa para generación eléctrica,” 2016.
- [22] A. F. Yachou, “Diseño y Cálculo de Turbina Hidrocínetica para Ríos,” p. 117, 2015.
- [23] M. Jimenez Castaño, “Análisis de un sistema de conversión para generación hidrocínetica basado en máquinas multifásicas,” 2015.
- [24] H. A. Chavez Muñoz, “Pre-Diseño Del Rodete De Turbinas Para Ríos De Chile,” p. 57, 2013.
- [25] J. L. Gomez Gomar, “Generador de energía de accionamiento hidráulico,” 2012.
- [26] E. Whaletailturbine, “Dispositivo sumergible para acoplamiento de turbinas o ruedas hidráulicas para aprovechamiento energético de una corriente de agua.” .
- [27] T. Smith and E. Otte, “Hydrokinetic turbine structure and system,” vol. 2, no. 12, 2015.
- [28] Rajadhyaksha, R. S. Huff, and M. P. Cherian, “Horizontal-axis hydrokinetic water turbine system,” vol. 1, no. 19, 2013.
- [29] R. Houvener, R. E. Doyle, and T. N. Doyle, “Hydrokinetic energy transfer device and method,” vol. 1, no. 19, 2010.
- [30] Asian Phoenix Resources., “Low Head Micro-hydroelectric Generator T8 Turgo,” pp. 1–14, 2008.
- [31] Asian Phoenix Resources., “T2H - Low Head Micro-hydroelectric Generator,” pp. 1–14,



- 2008.
- [32] Asian Phoenix Resources., “T1- Low Head Micro-hydroelectric Generator,” pp. 1–14, 2008.
- [33] A. Phoenix, “T5 - Turgo Micro-Hydroelectric Generator.”
- [34] Asian Phoenix Resources., “MGH - 200/500/1000 - Low Head Micro-hydroelectric Generator,” pp. 1–14, 2008.
- [35] S. Dussaubat and X. Vargas, “Aforo en cauce natural.” [Online]. Available: http://mct.dgf.uchile.cl/AREAS/hidro_mod1.htm.
- [36] E. J. Mejía Rodríguez and G. P. Rosas Ayala, “CALCULO DE LA VELOCIDAD MEDIA Y EL CAUDAL CON BASE EN LA VELOCIDAD SUPERFICIAL DEL AGUA EN PEQUEÑAS CORRIENTES,” p. 1939, 2016.
- [37] R. Marbello Pérez, “Manual De Prácticas De Laboratorio De Hidráulica Universidad Nacional De Colombia,” *Man. Pract. Lab. Hidraul.*, p. 37, 2013.
- [38] L. E. Prato T., “AFOROS PRACTICOS DEL AGUA DE RIEGO,” *Inst. Colomb. Hidrol. , Meteorol. Y ADECUACION TIERRAS*, 1979.
- [39] ZECO, “TURBINA KAPLAN.” [Online]. Available: <https://www.zeco.it/zeco-turbinas/turbina-kaplan?lang=es>.
- [40] D. Y. E. D. E. Una, “TURBINA GORLOV PARA CANALES DE REGADÍO ”, 2018.
- [41] GUILLERMO ANDRES COLINA ORTIZ, “DISEÑO DE UN ROTOR HIDROCINÉTICO TIPO GORLOV PARA EL SUMINISTRO DE ENERGÍA ELÉCTRICA A UNA VIVIENDA UBICADA EN UNA ZONA NO INTERCONECTADA DEL DEPARTAMENTO DE CASANARE,” p. 87, 2018.
- [42] J. Fredy, “Transmisión por cadenas,” pp. 1–26, 2011.
- [43] A. R. Gamboa Urquiza and A. V. Rodríguez Manzano, “AUTOMATIZACIÓN DE LA TOMA DE DATOS EN TIEMPO REAL DEL BANCO DE PRUEBAS DE LA TURBINA HÉLICE DE EJE HORIZONTAL DEL LABORATORIO DE TURBOMAQUINARIA DE LA FACULTAD DE MECÁNICA,” 2016.
- [44] C. . Aguilar, “Montajes mecánicos de turbinas,” *HIDROMONT*. [Online]. Available: <http://hidromont.es/c-h-aguilar-palencia/>.
- [45] A. Partida, “Lubricación, herramienta fundamental de mantenimiento,” *Mantenimiento & Mentoring INDUSTRIAL*, 2016. [Online]. Available: <https://mantenimiento-mi.es/2016/lubricacion-herramienta-fundamental-de-mantenimiento>.
- [46] “EMPAQUETADURAS Y SELLOS,” *bibing.us.es*.
- [47] M. Abasolo, J. Corral, and E. Iriondo, “Transmisión Por Correas,” no. Issn 2255-2316, p. 24, 2016.
- [48] “Generador de imán permanente.” [Online]. Available: https://es.aliexpress.com/item/32846857443.html?spm=a219c.search0302.3.44.31bf5cd7HxCOIM&ws_ab_test=searchweb0_0,searchweb201602_0,searchweb201603_0,ppcSwitch_0&algo_pvid=d9c739a2-e2cf-4d38-874e-52177d06646a&algo_expid=d9c739a2-e2cf-4d38-874e-52177d06646a.
- [49] “Inversor de corriente.” [Online]. Available: <https://minieasy.co/productos/energia-solar/paneles-solares/nversor-convertidor-corriente-12v-110v-800w/>.
- [50] J. Torres, “Elementos de sujeción,” *Lifeder*. [Online]. Available: <https://www.lifeder.com/elementos-sujecion/>.



- [51] “Cables de acero galvanizado,” *CSBEAVER*, 2017. [Online]. Available: <https://csbeaver.com/blog/como-fabrican-cables-acero-galvanizado/>.
- [52] G. Estrada, “Laboratorio de Hidraulica de Canales,” *Uach*, pp. 45–50, 2016.
- [53] Vaxasoftware, “Densidad del agua líquida entre 0 °C y 100 °C,” vol. 0, p. 961, 2014.
- [54] L. Portillo and C. Soto, “Flujo en Canales Abiertos,” *J. Chem. Inf. Model.*, vol. 53, no. 9, pp. 1689–1699, 2016.
- [55] R. L. Alonso, “Características hidráulicas y geomorfológicas de ríos de montaña (II),” *Water Resour.*, no. Ii, pp. 20–23, 2004.
- [56] F. Behrouzi, M. Nakisa, A. Maimun, and Y. M. Ahmed, “Renewable energy potential in Malaysia: Hydrokinetic river/marine technology,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 62, pp. 1270–1281, 2016.
- [57] R. a Bastianon, “Cálculo Y Diseño De la Hélice Óptima Para Turbinas Eólicas,” p. 48, 2008.
- [58] A. Rodríguez Amaya, “SIMULACIÓN COMPUTACIONAL DEL DESEMPEÑO HIDRÁULICO DE UNA TURBINA HIDROKINÉTICA DE EJE HORIZONTAL,” vol. 1, no. 1, 2018.
- [59] M. I. Y. and A. Muratoglu, “Hydrokinetic energy conversion systems: A technology status review,” *Renew. Sustain. Energy Rev*, pp. 72–82, 2014.
- [60] C. C. Cardona, E. L. Chica, B. Quintero, and D. Occidente, “Desarrollo de una turbina hidrocínética de eje horizontal de 1 HP para picogeneración de energía eléctrica en zonas no interconectadas Investigador principal Nombre,” pp. 1–25, 2018.
- [61] J. Carrillo, “Diseño mecánico de una turbina hidrocínética para generación de energía en la estación de biodiversidad del Tiputini,” p. 93, 2018.
- [62] “Airfoil Tools.” [Online]. Available: <http://airfoiltools.com/search/index>.
- [63] V. Peña García, “Diseño de una turbina hidro-cinética para aprovechamiento energético de ríos no caudalosos,” *Univ. Piura*, 2013.
- [64] M. Victorino, C. V. Labriola, and H. Moyano, “Sistemas Conversores Fluido - Dinámicos de energía renovable para la Patagonia Argentina Fluid-Dynamic system converter of renewable energy for Patagonia Argentina,” pp. 113–138, 2016.
- [65] ANSYS, “Theory Guide.” [Online]. Available: <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/ug/node1.htm>.
- [66] “El efecto Venturi.” [Online]. Available: <http://www.novaalquimia.net/2018/12/el-efecto-venturi-y-su-relacion-con-los.html>.
- [67] J. Alvarado Ladron de Guevara, “Diseño y Cálculo de una instalcion fotovoltaica aislada,” p. 90, 2018.
- [68] J. C. Miranda, “Apuntes de ingenieria,” 2015. [Online]. Available: <https://apuntes-ing-mecanica.blogspot.com/2015/11/resistencia-del-fluido.html?m=0>.
- [69] G. EPM, “Especificación técnica para alambres y cables de acero galvanizado,” pp. 1–15, 2017.