

**UNIVERSIDAD DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA UTEC**

**Carrera de Ingeniería Mecánica**



**DISEÑO MECÁNICO DE UNA TURBINA  
HIDROCINÉTICA PARA GENERACIÓN DE  
ELECTRICIDAD EN RÍOS AMAZÓNICOS**

Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Mecánico

**Yordan Oliver Guerra Zurita**

**Código 201210087**

**Asesor**

**Jose Luis Mantari Laureano**

Lima – Perú

Febrero 2020

La tesis

**DISEÑO MECÁNICO DE UNA TURBINA HIDROCINÉTICA PARA  
GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD EN RÍOS AMAZÓNICOS**

Ha sido aprobada

-----

[Nombres y apellidos del Presidente de Jurado]

-----

[Nombres y apellidos del Asesor de la tesis]

-----

[Nombres y apellidos del Tercer jurado]

*Dedicatoria:*

A mis padres Carlos e Isabel, por el apoyo incondicional en este gran reto que estamos logrando. Sin ustedes, nada hubiera sido posible. A mis hermanos Carlin y Mary, fueron motivación y ejemplo diario para mis decisiones. A mi tía Teresa por acogerme siempre en las buenas y malas. A Jazmin, por la ayuda y compañía de estos años.

*Agradecimientos:*

A Jose Luis Mantari, por la orientación profesional y el consejo de siempre.

A José Ramos Saravia, por ser apoyo y siempre absolver mis dudas.

A Miguel Dávila, Alex Atamari, Dany Yucra y Guillermo Tubilla por ser parte de este camino que recorrimos juntos y donde siempre nos apoyamos.

A UTEC, por ser mi mayor soporte para esta gran aventura profesional que ahora comienza.

# TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
<b>RESUMEN</b> .....	14
<b>CAPÍTULO 1: ASPECTOS GENERALES</b>	
1.1. Identificación del problema .....	15
1.2. Objetivos.....	17
1.3. Contexto del proyecto.....	17
1.4. Alcances del proyecto.....	18
1.5. Metodología de trabajo .....	19
<b>CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE</b>	
2.1. Condición energética nacional.....	21
2.2. Estado de la industria y tecnología existente .....	25
2.3. Minicentrales de generación eléctrica .....	32
<b>CAPÍTULO 3: GENERACIÓN Y SELECCIÓN DE SOLUCIÓN</b>	
3.1. Identificación de oportunidades.....	36
3.2. Identificación de necesidades .....	40
3.3. Especificaciones objetivo .....	47
3.4. Generación de conceptos .....	50
3.5. Selección de concepto .....	58
3.6. Especificaciones finales.....	61
3.7. Prueba del concepto.....	66
<b>CAPÍTULO 4: TEORÍA BEM</b>	
4.1. Modelo del disco actuador.....	67
4.2. Teoría del momento angular .....	74
4.3. Análisis de la geometría del álabe .....	78

4.4. Teoría del elemento del álabe ..... 84

4.5. Teoría del momento del elemento del álabe (BEM)..... 85

## **CAPÍTULO 5: DISEÑO DE LA TURBINA**

5.1. Cálculo del rotor ..... 90

5.2. Modelado del rotor ..... 99

5.2. Modelado de la estructura..... 105

5.4. Ensamble general..... 108

## **CAPÍTULO 6: ANÁLISIS DE RESULTADOS**

6.1. Resultados..... 110

6.2. Benchmarking..... 115

## **CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES**

### **RECOMENDACIONES**

### **REFERENCIAS**

### **ANEXOS**

### **PLANOS**

## ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 2.1. Mercado actual de Proyectos en THC's .....	29
Tabla 2.2. Producción masiva a nivel mundial.....	30
Tabla 3.1. Selección de clientes de acuerdo a niveles .....	41
Tabla 3.2. Documentación de necesidades de clientes.....	42
Tabla 3.3. Integración de datos de clientes con directrices .....	43
Tabla 3.4. Jerarquización de necesidades primarias y secundarias .....	44
Tabla 3.5. Importancia de necesidades para el rotor .....	45
Tabla 3.6. Importancia de necesidades para el sistema de transmisión.....	46
Tabla 3.7. Importancia de necesidades para el generador .....	46
Tabla 3.8. Importancia de necesidades para el sistema en general.....	47
Tabla 3.9. Lista de métricas.....	48
Tabla 3.10. Comparación de parámetros con la competencia .....	51
Tabla 3.11. Valores ideales y marginales .....	52
Tabla 3.12. Patente 1. Horizontal – Axis Hydrokinetic Water Turbine System .....	53
Tabla 3.13. Patente 2. Hydrokinetic turbine structure and system .....	54
Tabla 3.14. Patente 3. Marine Hydrokinetic Turbine .....	54
Tabla 3.15. Combinación de conceptos – Matriz morfológica.....	57
Tabla 3.16. Matriz de filtro de conceptos .....	59
Tabla 3.17. Matriz de evaluación de conceptos.....	60
Tabla 3.18. Modelo de costos para el producto .....	64
Tabla 3.19. Especificaciones finales del producto .....	65
Tabla 5.1. Potencias generadas de la competencia.....	91
Tabla 5.2. Características principales de los perfiles a analizar .....	91

Tabla 5.3. Geometría básica para perfil NACA 23012 .....	94
Tabla 5.4. Geometría básica para perfil NACA 4412 .....	94
Tabla 5.5. Geometría básica para perfil NACA 64206 .....	94
Tabla 5.6. Parámetros hallados para el perfil NACA 23012 en el proceso de iteración .....	96
Tabla 5.7. Parámetros hallados para el perfil NACA 4412 en el proceso de iteración .....	97
Tabla 5.8. Parámetros hallados para el perfil NACA 64206 en el proceso de iteración .....	97
Tabla 5.9. Fuerzas y potencia de salida para el NACA 23012 .....	98
Tabla 5.10. Fuerzas y potencia de salida para el NACA 4412 .....	98
Tabla 5.11. Fuerzas y potencia de salida para el NACA 64206 .....	99
Tabla 6.1. Comparativa de resultados de acuerdo a fuentes de información .....	116

# ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1. Proceso genérico de desarrollo del proyecto .....	20
Figura 2.1. Energía renovable estimada en la producción de electricidad.....	22
Figura 2.2. Nuevas inversiones mundiales en energía renovable por tecnología .....	23
Figura 2.3. Producción de electricidad a nivel nacional .....	23
Figura 2.4. Zonas rurales sin electricidad a nivel nacional.....	24
Figura 2.5. Clasificación de turbinas de flujo axial .....	26
Figura 2.6. Clasificación de turbinas con flujo vertical .....	27
Figura 2.7. Investigación, proyectos y fabricantes a nivel mundial.....	31
Figura 3.1. Identificación de oportunidades horizonte .....	36
Figura 3.2. Importancia relativa de necesidades de acuerdo a estructura de la THC .....	45
Figura 3.3. Caja negra.....	50
Figura 3.4. Estructura de funciones .....	55
Figura 3.5. Árbol de clasificación de conceptos .....	56
Figura 3.6. Modelos técnicos de la THC .....	61
Figura 3.7. Comparación de propuesta mediante el “trade off”. .....	63
Figura 3.8. Bosquejo final de la THC .....	66
Figura 4.1. Control de volumen para el modelo de disco actuador .....	68
Figura 4.2. Coeficientes de potencia y empuje para turbina ideal .....	73
Figura 4.3. Control de volumen considerando el factor de inducción axial .....	74
Figura 4.4. Terminología de la geometría de un perfil hidrodinámico .....	79

Figura 4.5. Comportamiento del fluido de acuerdo al perfil de uso .....	80
Figura 4.6. Tipos de fluidos y su comportamiento con el número de Reynolds.....	80
Figura 4.7. Capa límite de acuerdo al tipo de fluido.....	81
Figura 4.8. Parámetros geométricos y de fuerza de un perfil hidrodinámico .....	82
Figura 4.9. Fuerzas actuantes en una sección del álabe.....	84
Figura 5.1. Perfil NACA 23012.....	91
Figura 5.2. Perfil NACA 4412 .....	91
Figura 5.3. Perfil NACA 64206.....	92
Figura 5.4. Coeficientes de potencia con los tres diseños.....	99
Figura 5.5. Coeficientes de sustentación respecto al ángulo de ataque .....	100
Figura 5.6. Vista frontal del álabe en toda su longitud .....	100
Figura 5.7. Geometría del álabe modelada .....	101
Figura 5.8. Dimensiones de la punta del álabe .....	101
Figura 5.9. Modelo final del álabe .....	102
Figura 5.10. Dimensiones del buje central.....	103
Figura 5.11. Modelo final del buje.....	103
Figura 5.12. Dimensiones de la punta de la THC .....	104
Figura 5.13. Modelo final de la punta de la turbina.....	104
Figura 5.14. Caja multiplicadora de engranajes.....	105
Figura 5.15. Especificación de medidas de la caja multiplicadora .....	106
Figura 5.16. Esqueleto de soporte para caja y generador .....	107
Figura 5.17. Recubrimiento del sistema de transmisión y generador .....	107
Figura 5.18. Detalles de la pernería del rotor.....	108
Figura 5.19. Ensamble general.....	108
Figura 5.20. Explosión de componentes del ensamble .....	109
Figura 6.1. Coeficiente de potencia vs RPM .....	111

Figura 6.2. Potencia vs velocidad del río.....	112
Figura 6.3. Eficiencia vs velocidad del río .....	112
Figura 6.4. Torque y potencia vs RPM .....	113
Figura 6.5. Torque y fuerza vs TSR.....	114
Figura 6.6. Benchmarking de acuerdo a velocidad y $C_p$ .....	115

## ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 2.1: Representantes de la tecnología hidrocínética a nivel mundial .....	119
Anexo 3.1: Identificación de Oportunidades .....	120
Anexo 3.2: Identificación de Necesidades.....	121
Anexo 3.3: Lista de métricas general.....	122
Anexo 3.4: Matriz necesidad - métrica.....	123
Anexo 3.5: Identificación de modelos técnicos de la THC .....	124
Anexo 3.6: Conceptos de solución de la THC .....	125
Anexo 3.7: Selección del río para diseño de THC.....	126
Anexo 5.1: Selección de coeficientes de sustentación y arrastre .....	128
Anexo 5.2: Cálculo de pernería para el rotor.....	130

## RESUMEN

El aprovechamiento del agua para generar energía ha sido utilizado por muchas décadas y este ha favorecido enormemente para la electrificación a nivel mundial de millones de personas. Sin embargo, aún en estos días los servicios básicos como este no llegan a todo el mundo y sobre todo a las personas de bajos recursos económicos. Para esto, el desarrollo de esta tesis hace referencia al diseño de una turbina hidrocínética que favorezca a una comunidad amazónica específica para poder generarle energía.

El primer capítulo especifica cuáles son nuestros puntos de vista generales empezando por el objetivo principal que es el diseño de la turbina hidrocínética y la metodología con la que esta trabajará. Esta metodología abarca el concepto de diseño más ampliamente ya que a pesar que se tomó como base a los procesos de diseño alemanes (como el VDI 225) o el sistema i+P+p, se destaca por hacer un enfoque especial en el cliente, en la persona que va a ser parte del funcionamiento y el aprovechamiento del equipo. Procesos específicos como la planeación, el desarrollo del concepto y el diseño a detalle son parte de esta metodología y son las que más detalle tienen en este trabajo.

Además, es importante mencionar que el trabajo pone énfasis en la aplicación de la turbina en el río Santiago que está ubicado en el distrito de Santiago, provincia de Condorcanqui en la zona de Amazonas. Esta fue seleccionada gracias a los reportes de la falta de electrificación en las zonas con menos conexión a la red del país y en las que la mayoría de gente no cuenta con un servicio básico como la electricidad.

Por otra parte, si bien la planeación y el desarrollo del concepto apuntan al diseño total de la turbina, los alcances de esta tesis conllevan a realizar el diseño del rotor, buje y sistema de protección, por lo que, el sistema de transmisión y la selección del generador quedan como trabajo a futuro para la profundización de este proyecto.

Finalmente, se concluye con el diseño de un rotor de 3 álabes distanciados a  $120^\circ$  con 2.82m de diámetro que cuenta con un rotor de 1.20m de longitud y que operará con una velocidad mínima de 0.77m/s (época de estiaje) y una máxima de 1.9m/s (época de avenidas). Esta generará una potencia de 6.73kW y cumplirá con la demanda anual de la comunidad de Río Santiago con un total de 2445.6kW anual por familia.

# **CAPÍTULO I**

## **ASPECTOS GENERALES**

La energía que se capta del agua es una tecnología que lleva más de cien años en el mercado y es una de las que más se ha explotado en todo este tiempo. Sin embargo, aún no se ha investigado del todo para el área de las energías renovables, por lo que, este es un reto para los próximos años.

El presente capítulo describe la motivación del proyecto junto con la identificación y planteamiento de los problemas que existen actualmente en el mercado peruano para el ámbito de las energías limpias. Además, se establece los límites, el contexto y la metodología a aplicar.

### **1.1 Identificación del problema**

Establecer tecnologías que ayuden al desarrollo humano de personas que carecen de recursos económicos, sociales, políticos y hasta medioambientales es un trabajo de todos los estados, y por ende de todos sus ciudadanos. Esto lo establece el mandato de la Organización de las Naciones Unidas (ONU), en la que menciona que todos tenemos derecho a percibir los mismos beneficios, empezando por los servicios básicos de luz y agua [1].

#### **1.1.1. Motivación**

Para el año 2016, la Red de Políticas de Energía Renovable para el siglo XXI (REN21) publicó en su memoria anual el estado de la participación estimada de energía renovable en la producción de electricidad a nivel mundial en la que se deja informado que, del total de producción de electricidad en el mundo, solo el 23.7% proviene de fuentes netamente renovables, y el 16.6% corresponde al desarrollo de energías hidráulicas [2]. Sin embargo, a pesar del gran porcentaje mostrado y de la importancia que tiene el agua, las nuevas inversiones mundiales en lo que son las pequeñas centrales hidroeléctricas y en la energía oceánica son las que más han decaído (-29% y -42%

respectivamente) [2]. Este, es un punto de partida para dar un enfoque en la realidad nacional en relación a saber cuál es la situación actual del desarrollo de las energías hidráulicas renovables y cómo estas están ayudando o no al desarrollo de las zonas rurales.

En el último Reporte Estadístico Minero Energético 2016, dado por la Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía (SNMPE), se informa que, del total de producción de electricidad a nivel nacional, solo el 2.6% corresponde a estas pequeñas centrales hidroeléctricas, energías oceánicas, entre otras más pequeñas [3]; a pesar del gran potencial que se tiene tanto en los mares, lagos, ríos, etc. En suma, esta información se relaciona perfectamente con la información presentada por la Encuesta Nacional de Hogares 2015 realizada por el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI), donde se señala que el 42% de las zonas rurales de la selva peruana no cuentan con energía eléctrica, en comparación con las zonas rurales de la costa y sierra que si cuentan con este servicio (78.5% y 72.4% respectivamente) [4]; por lo que, la promoción por la generación de electricidad con energías hidráulicas renovables en las zonas rurales selváticas es un problema grande a tener en cuenta.

### **1.1.2. Planteamiento del problema**

- La implementación de nuevas tecnologías que aprovechen los recursos naturales en la selva peruana, no han sido suficiente base para proyectos de mayor envergadura en la que el gobierno pueda intervenir. Esto debido a problemas con la accesibilidad, mal estudio del usuario, falta de enfoque por las tecnologías sostenibles, y principalmente por la falta de conocimiento en estas tecnologías y el costo del proyecto en sí.
- La tecnología de sistemas de generación de energía hidráulica no convencional (llámese no convencional a aquellas que no son centrales hidroeléctricas) no es investigada y usada en el país como en otros países. Más aún que en la zona donde mayores recursos hídricos se tiene del país, menos es el desarrollo de energías sostenibles que ayuden al desarrollo de sus habitantes.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo General**

- Realizar el diseño mecánico de una turbina hidrocínética para la generación de electricidad en distintos ríos Amazónicos a diferentes condiciones, mediante la metodología del Proceso Genérico de Desarrollo.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

- Estudiar las teorías de cantidad de movimiento, momento angular y del momento del elemento del álabe (BEM) para establecer la geometría del álabe.
- Seleccionar el perfil hidrodinámico del álabe con mayor eficiencia hidrodinámica de acuerdo al diseño a realizar en el rotor.
- Seleccionar partes y componentes mecánicos para el diseño de los elementos de la máquina (rotor, sistema de transmisión, generador, estructura).
- Realizar un estudio comparativo de los resultados teóricos calculados y de la simulación numérica a realizar.
- Realizar planos dimensionados y estandarizados de los álabes, el sistema de transmisión, la estructura y el sistema de anclaje de la turbina.

## **1.3. Contexto del proyecto**

La selva ha sido y es hasta el momento, la zona de menor desarrollo sostenible en lo que concierne a tecnologías que permitan dar electricidad a sus comunidades y por ende el de elevar la calidad de vida de sus habitantes. Esto lo demuestra el estudio del INEI al 2015 [4], por lo que, esta información es la que ayuda a determinar el enfoque principal del presente trabajo de tesis: el desarrollo del diseño de una tecnología capaz de aprovechar la energía hidráulica, sin la necesidad de dañar ni modificar el medio ambiente en una zona específica de la selva peruana.

#### **1.4. Alcances del proyecto**

- A nivel usuario: estudio a detalle de las oportunidades, necesidades y exigencias que requiere la comunidad a escoger, para que un diseño como el de la turbina, cumpla con sus demandas de electricidad y no exceda los límites tanto de conocimiento y manejo del equipo.
- A nivel sistemático: se establecerá a fondo el estudio mecánico de la turbina, pero no con el desarrollo de los sistemas tanto eléctricos como de instrumentación. Así mismo, no se especificará las conexiones ni el sistema “Smart Grid” que son necesarios para la puesta en marcha del equipo.
- A nivel ingenieril: desarrollo de teorías basadas en la mecánica de fluidos, resistencia de materiales, elementos de máquinas y sistemas energéticos renovables. No sujeta a profundizar en temas sobre mecánica computacional, Smart Grid, instrumentación, sistemas eléctricos y de potencia, etc.

#### **1.5 Metodología de trabajo**

Basados en el Proceso Genérico de Desarrollo elaborado por Ulrich y Eppinger [5] se desarrollará cinco pasos fundamentales (Ver figura 1.1) que tendrán dentro de su proceso, metodologías sobre el diseño mecánico de equipos como la norma alemana VDI 2225 y el método heurístico-categorial i+P+p. Las secuencias de actividades serán utilizadas para planear de manera adecuada el estudio del usuario, el diseño de sistemas, el diseño a detalle y el refinamiento del diseño mecánico final. Desarrollado de la siguiente manera:

a. Planeación. Estudio de la tecnología actual que existe acerca de energías renovables que puedan ser utilizadas en la zona escogida, específicamente en los ríos del Amazonas. Información acerca de la situación de la energía en Perú, el estado actual de las energías renovables en el país y sobre todo la tecnología a nivel mundial y nacional acerca de la investigación, proyectos y fabricación de turbinas de generación eléctrica en ríos.

b. Desarrollo del concepto - Diseño en el nivel sistema. Evaluación de las características del río escogido para su aprovechamiento como recurso renovable, a través del estudio de su hidrología, hidráulica y navegación fluvial. Del mismo modo, se

hará la identificación de oportunidades y necesidades, la generación de posibles soluciones y finalmente la selección de la mejor solución a diseñar.

c. Diseño en el nivel sistema - Diseño a detalle. Desarrollo del modelo: aplicación y comprobación de teorías para diseño de álabes, diseño y selección de piezas y componentes mecánicos para el sistema de transmisión, generador, estructura y sistema de anclaje. Así mismo, las pruebas a través de las simulaciones en los softwares AutoCAD, Autodesk Inventor, Qblade y Ansys Workbench para verificación del comportamiento de los distintos parámetros de trabajo.

d. Pruebas y refinamiento. Evaluación de los resultados de las simulaciones computacionales para verificar mejoras, y de esta forma, pasar a la comparación con los resultados teóricos y hacer el análisis general del diseño. Adicional a esto, se proyectará los planos tanto de los álabes, del sistema de transmisión y de toda la estructura.

e. Cierre de trabajo. Comprobación del cumplimiento de los objetivos, análisis del trabajo desarrollado, identificación de posibles mejoras, recomendaciones para trabajos a futuro y/o proyectos que puedan tomar al trabajo como punto de partida; y por último el reporte final de la memoria de trabajo realizado.

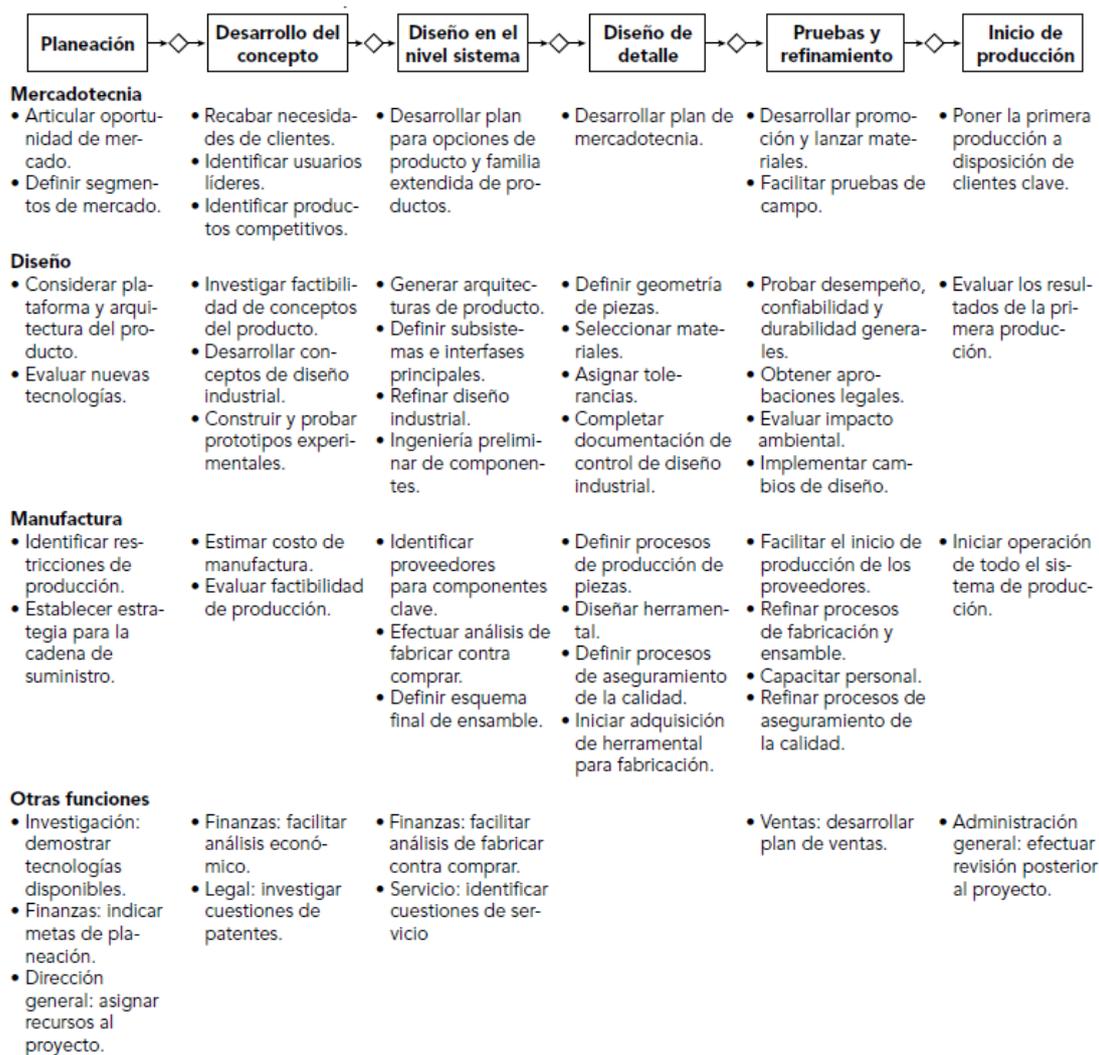


Figura 1.1. Proceso genérico de desarrollo del proyecto.

(Fuente: Ulrich, K., Eppinger, S. (2013). Product Design and Development 5<sup>th</sup> Edition. Mc Graw Hill Education)<sup>1</sup>

<sup>1</sup> La metodología para el trabajo de tesis contempla los primeros cinco pasos ya que al ser un proyecto netamente de diseño, no engloba la etapa de fabricación y/o producción por unidades.

# **CAPÍTULO II**

## **ESTADO DEL ARTE**

Las tecnologías que se enfocan en aprovechar la energía hidráulica se han desarrollado por más de cien años y han atravesado por muchos cambios tanto de Ingeniería como a nivel social y económico por el grado de envergadura que estos conllevan. Sin embargo, siempre han ido enfocadas a las centrales hidroeléctricas convencionales, es decir, a la construcción de presas, tuberías, túneles, canales y otros, que afectan normalmente a la arquitectura natural de la zona donde son instaladas. Este es entonces el reto de los últimos años: desarrollar tecnologías que aprovechen el agua sin la necesidad de destruir la naturaleza.

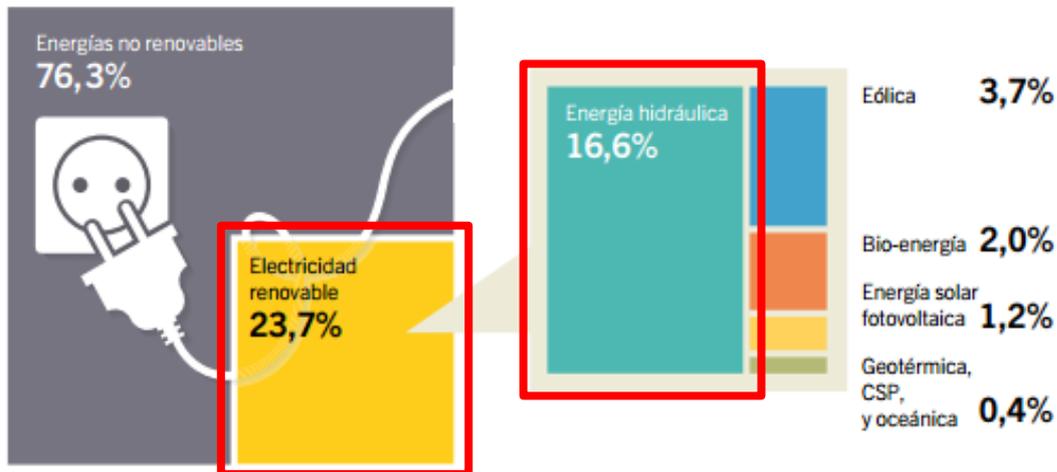
En este contexto, las turbinas hidrocínicas son las que más aceptación han tenido y es una de las que más desarrollo tienen hoy en día. Empezando por su aplicación en mares y corrientes de gran alcance; ya se está proyectando su aplicación en ríos y póngos donde se aprovecharía de mejor manera sus propiedades principales. Este capítulo presenta las condiciones actuales en las que se trabaja este tipo de turbinas en la industria y el enfoque principal de su aplicación como minicentrales hidroeléctricas.

### **2.1 Condición Energética Actual**

#### **2.1.1 A nivel mundial**

Una de las entidades responsables por velar el desarrollo de las energías renovables a nivel mundial es la Red de Políticas de Energías Renovables para el Siglo XXI (REN 21) la cual informa y establece puntos para la evolución a través de los años de la energía sostenible en todas las partes del mundo. El último reporte del REN 21 respecto a la situación energética actual da a conocer que, del total de producción de electricidad existente en el planeta, sólo el 23.7% corresponde a la “electricidad

renovable” [6], donde la energía hidráulica es el 16.6% del total. Una cifra bastante importante y que se ha mantenido durante muchos años hasta el día de hoy (Ver figura 2.1). El resto de estas energías renovables corresponde a la eólica (3.7%), Bio – energía (2.0%), energía solar – fotovoltaica (1.2%) y la energía geotérmica que representa el 0.4% (Tener en cuenta que la suma de los porcentajes no da igual al 23.7% debido al redondeo que se hizo).



*Basado en la capacidad de generación de energía renovable a finales de 2015. Los porcentajes no corresponden a la suma total debido al redondeo.*

*Figura 2.1. Participación estimada de energía renovable en la producción de electricidad a nivel mundial, fines del 2015.*

(Fuente: REN 21. Reporte Anual 2016)

Por un lado, la capacidad mundial para la generación de electricidad por medios hidráulicos ha llegado a ser 1.064 GW, donde existen países líderes como China, Brasil, Estados Unidos, Canadá, Rusia e India (juntos tienen 60.3%), que ya tienen centros de investigación dedicados al estudio de tecnologías para aprovechar el agua de la mejor manera posible [7].

Por otro lado, a pesar de contar con una capacidad superior a otro tipo de recursos en la naturaleza, las nuevas apuestas de capital por el desarrollo de la energía hidráulica han disminuido súbitamente y no sólo para países en desarrollo sino también para los desarrollados. El reporte de la REN 21 informa que la inversión por las pequeñas centrales hidroeléctricas y la energía oceánica han bajado en un 29 y 42% respectivamente y este será el problema a resolver.

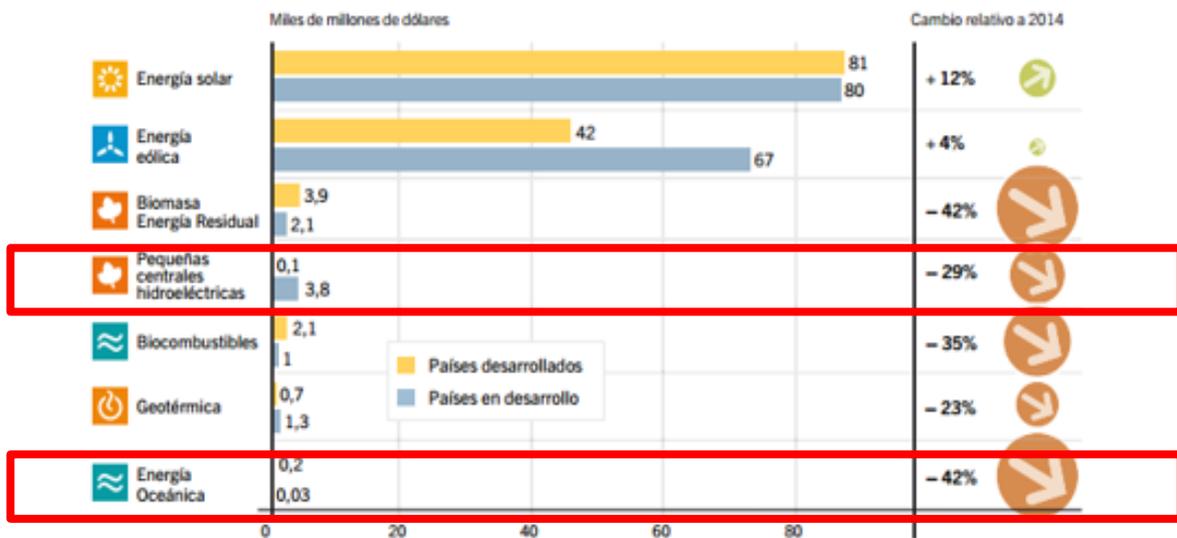


Figura 2.2. Nuevas inversiones mundiales en energía renovable por tecnología.

(Fuente: REN 21. Reporte Anual 2016)

### 2.1.2 A nivel nacional

Respecto a la situación de la energía hidráulica en el país, el último informe de la Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía (SNMPE) respecto a la producción de electricidad (en base a las energías que lo generan), reporta que solo el 2.6% pertenece a las pequeñas centrales hidroeléctricas y a la energía oceánica [8], cifra que debería mejorar por el gran potencial hidráulico existente en el país.

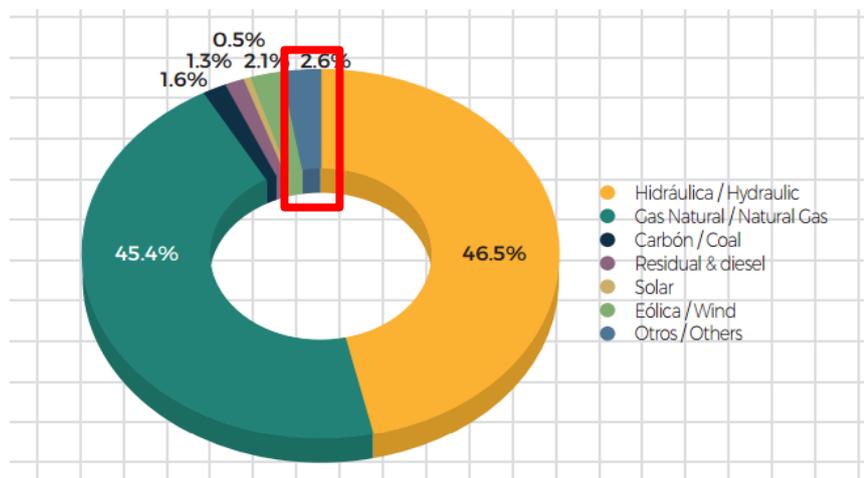
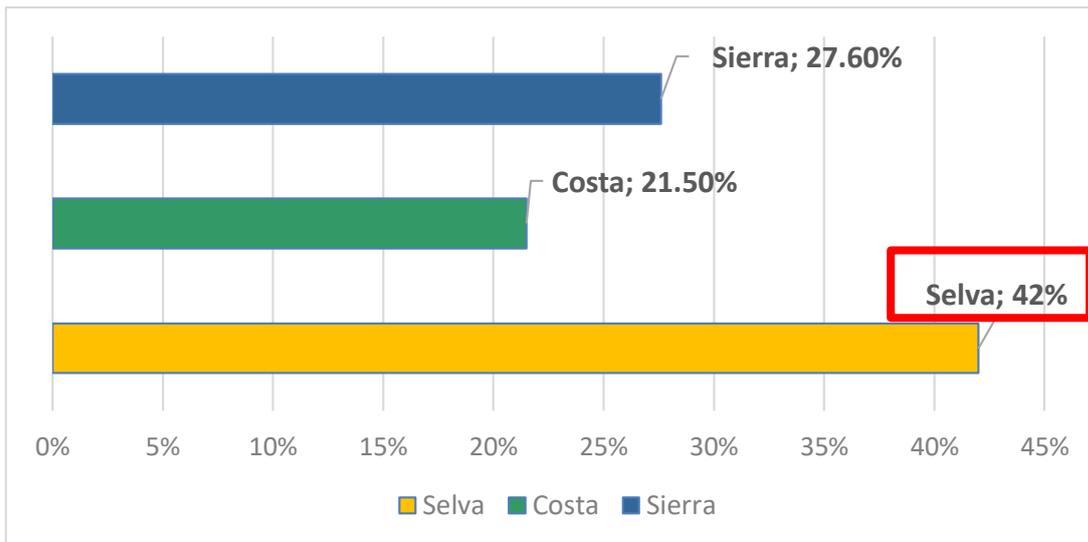


Figura 2.3. Producción de electricidad a nivel nacional.

(Fuente: Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía SNMPE (2016). Reporte Estadístico Minero Energético 2016. Lima, Perú)

Este 2.6% debería incrementar y estar más enfocado en su desarrollo en las zonas rurales del país con el objetivo de descentralizar el tema de la electricidad a nivel nacional. Para esto, la última encuesta nacional de hogares (2015) realizada por el Instituto Nacional de Estadística e Informática INEI establece que la zona más afectada sin electricidad es la selvática, ya que el 42% de la población no cuenta con este servicio básico [9].



*Figura 2.4. Zonas rurales sin electricidad a nivel nacional.*

(Fuente: Encuesta Nacional de Hogares 2015. Instituto Nacional de Estadística e Informática INEI).

Con esto, se define que este trabajo de tesis se enfoca en el desarrollo de una minicentral hidroeléctrica (turbina hidrocínética) para la generación de electricidad en alguna zona rural de la selva peruana. Además, se tiene que tener en cuenta que para una labor como esta se debe considerar las siguientes normas y características actuales con las que cuenta la legislación peruana:

- Las minicentrales hidroeléctricas deben estar enfocadas a la electrificación netamente rural.
- El trabajo en Energías Renovables son parte de los Recursos Energéticos Renovables (RER).
- Los trabajos en Energías Renovables están legislados como parte del Plan Energético Nacional en base a los siguientes decretos: Decreto Legal N° 1002 (Desarrollo de electricidad con recursos renovables), Decreto Supremo 012-

2011 y 020-2013 (Promoción de la inversión eléctrica para áreas no conectadas a la red) [10].

## **2.2 Estado de la industria y tecnología existente**

### **2.2.1 Energía Hidrocinética**

La energía hidrocinética se puede describir como la energía que se aprovecha del agua que fluye de los ríos o de corrientes oceánicas. Esto incluye a la energía de las ondas oceánicas, energía de las mareas y energía fluvial en corrientes de pongos u otros fenómenos hidrológicos que generen velocidad en el agua. Hasta ahora no hay muchos proyectos de energía hidrocinética de gran envergadura, pero ya existen fabricantes, proyectos en investigación y fabricación de prototipos que lo que buscan es que bajo pruebas se demuestre el mejor rendimiento posible para poder extraer la mayor energía posible.

Las centrales hidroeléctricas convencionales han sido el más grande *input* para generar tecnologías renovables. Como ejemplo, se sabe que hoy en día las instalaciones hidroeléctricas en los Estados Unidos pueden generar suficiente energía hidroeléctrica para suministrar electricidad a 28 millones de hogares, lo que es equivalente a 500 millones de barriles de petróleo [11]. Sin embargo, el crecimiento de estas centrales ya es restringido por el número limitado de sitios naturales disponibles (por su construcción), preocupaciones medioambientales (recursos) y ecológicas (flora y fauna).

Por otro lado, las turbinas hidrocinéticas ofrecen muchas ventajas en comparación a las centrales, ya que son sistemas portátiles con un costo inicial relativamente pequeño, una infraestructura menos complicada y son fáciles de implementar sin necesidad de dañar a la naturaleza. Además, a pesar de no contar con un estudio a nivel nacional del potencial hidrocinético, se puede tomar como ejemplo que para el caso de Estados Unidos se estima que hay 12.500MW de potencial en los ríos de esa zona [12].

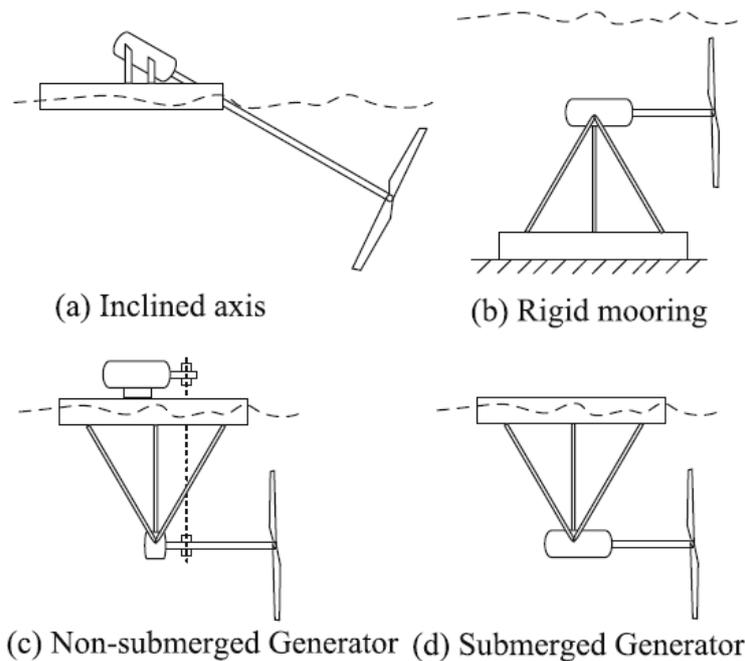
El procedimiento estándar para poder hacer la generación de energía en este caso es similar al de las turbinas eólicas donde el viento es el fluido principal. El rotor de la turbina es puesto aguas abajo y es así que la energía cinética del agua se utiliza para hacer girar a los álabes del rotor, y de esta forma, se acoplen a un sistema de transmisión que se una a un generador que produzca energía eléctrica. Después que pasa

por el generador, se utiliza un sistema de control para poder transmitir electricidad a la red eléctrica.

### 2.2.2 Turbinas Hidrocinéticas

Este tipo de turbinas se clasifican principalmente en base a la alineación del eje: horizontal, vertical y turbinas de flujo cruzado [13]. Las más usadas suelen ser las horizontales y verticales; y su elección depende mucho de los factores técnicos y aplicativos que vayan a tener, como por ejemplo, el lugar de la instalación, el ambiente, las condiciones climáticas, condición del fluido y los aspectos financieros.

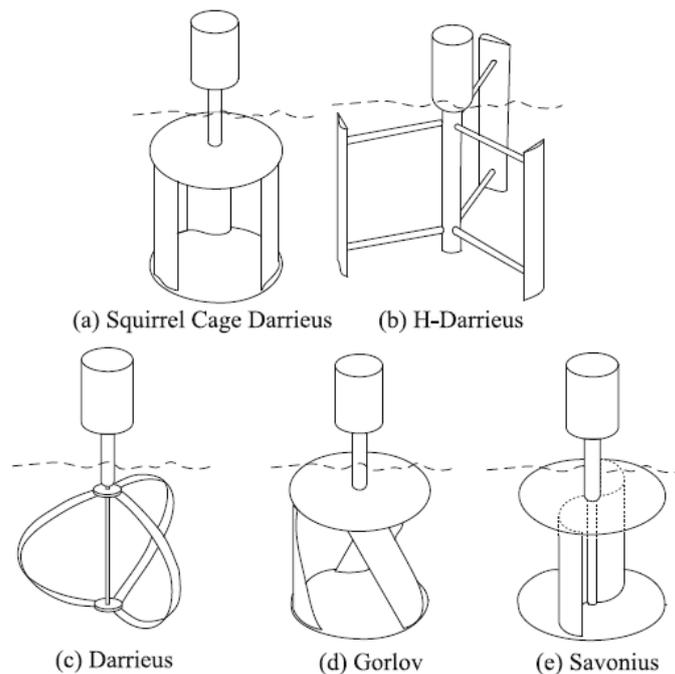
- a. Turbinas con eje axial. El eje está alineado en dirección paralela a la dirección del fluido. Estos también son llamados turbinas de flujo axial y tiene una distribución simple (álabes del rotor, sistema de transmisión y generador). El sistema de transmisión viene a ser un mecanismo como el de fajas, poleas y/o engranajes [14].



*Figura 2.5.* Clasificación de turbinas de flujo axial: (a) eje inclinado, (b) base rígida, (c) con generador no sumergido y (d) con generador sumergido.

(Fuente: Clasificación de turbinas hidrocinéticas. Maldonado, 2005).

- b. Turbina con eje vertical. Su eje está ubicado perpendicularmente a la dirección del flujo de agua y generalmente tienen álabes de sección transversal uniforme fijadas tanto por la parte superior como inferior (ver figura 2.6).



*Figura 2.6.* Clasificación de turbinas con flujo vertical. (a) Squirrel Darrieus, (b) H-Darrieus, (c) Darrieus, (d) Gorlov y (e) Savonius.

(Fuente: Clasificación de turbinas hidrocinéticas. Maldonado, 2005).

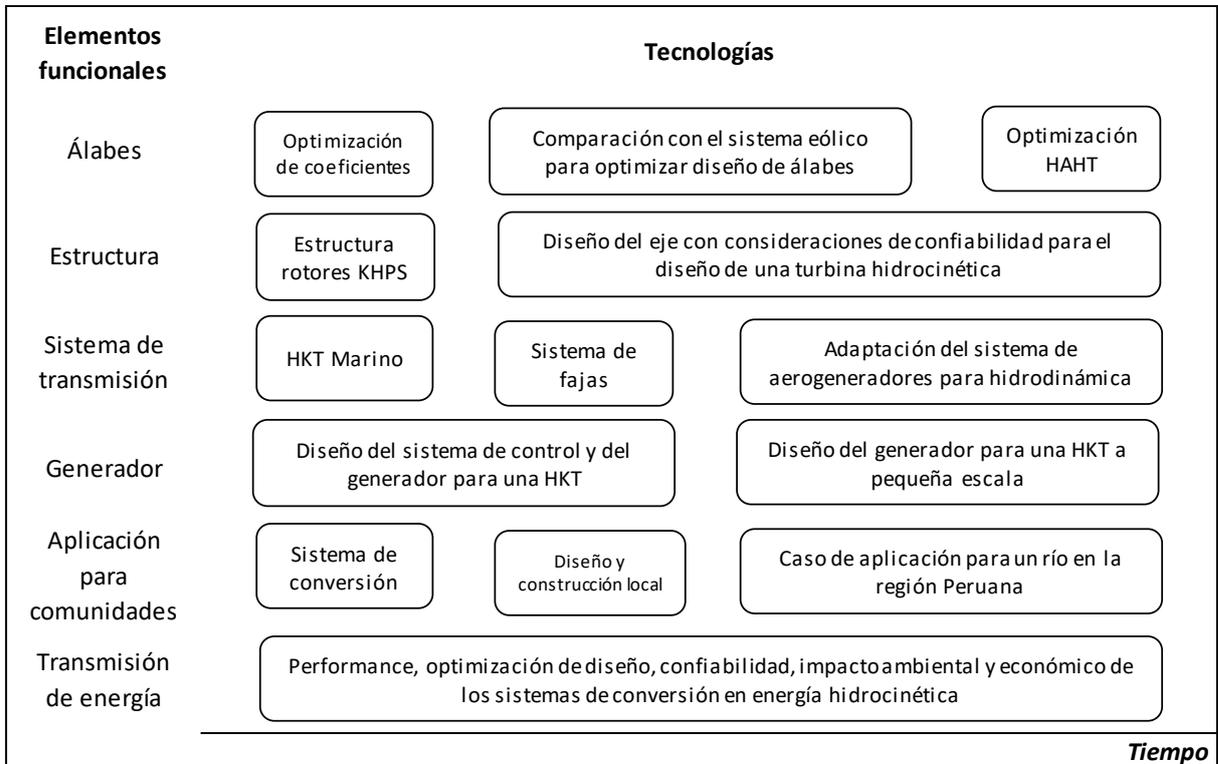
La turbina de flujo axial es la que se va a diseñar y trabajar en el presente trabajo de tesis de acuerdo a las oportunidades, especificaciones, exigencias y necesidades que se detallará en el capítulo 3.

### **2.2.3 Investigación, proyectos y fabricantes**

a. Investigación. El desarrollo de este tipo de turbinas es relativamente nuevo, es por eso que la investigación es el primer grupo que más ha estudiado los diferentes sistemas y modelos que rigen al funcionamiento de estos equipos. Además, su enfoque se hace siempre en los componentes principales ya que estos son los que tienen que mejorar su eficiencia cada vez que se sometan a trabajar y por lo tanto, se debe determinar su criticidad. Por otro lado, también se considera vital a la aplicación que tendrá y a la transmisión de energía (el mejor rendimiento posible del mecanismo de transmisión) con la cual trabajará.

A todos estos elementos, se les conoce como elementos funcionales y tienen que ser comparados de acuerdo a los diferentes estudios que se vienen dando en cada uno de

ellos a través del tiempo [15]. Es decir, la tecnología y/o investigación más avanzada hasta el momento.



*Mapa 2.1. Mapa de tecnología de Investigación de acuerdo a elementos funcionales de THC's 2010-2017*

(Fuente: Elaboración Propia).

b. Proyectos. Se considera a todos los trabajos de investigación que se han planteado y ya están en desarrollo en diferentes partes del mundo de alguna u otra forma: investigaciones terminadas, artículos científicos, reportes académicos, tesis de pregrado, tesis de maestría, tesis de doctorado y proyectos de factibilidad en esta área (Ver tabla 2.1).

N°	Empresa/Institución/Universidad	Nombre	Ubicación	Año de Fabricación	Tipo
1	Electric Power Research Institute	Assessment of the Environmental Effects of Hydrokinetic Turbines on Fish: Desktop and Laboratory Flume Studies	California	2012	Factibilidad
2	PCCI, Inc.	Marine and Hydrokinetic Renewable Energy Technologies: Potential Navigational Impacts and Mitigation Measures	Virginia	2009	Factibilidad
3	RCT Systems, Inc.(formerly awarded to Wavebob, LLC)	Advanced Machines for Marine Hydrokinetic Energy	Maryland	2014	Factibilidad
4	Snohomish County Public Utility District #1	Study of the Acoustic Effects of Hydrokinetic Tidal Turbines in Admiralty Inlet, Puget Sound	Washington	2012	Factibilidad
5	Turner Hunt Ocean Renewable, LLC	Turner Hunt Ocean Renewable's (THOR's) Power Method for Hydrokinetic Devices	Ohio	2011	Factibilidad
6	Verdant Power, Inc.	Improved Structure and Fabrication of Large, High-Power Kinetic Hydropower System (KHPS) Rotors	New York	2012	Factibilidad
7	Whitestone Power and Communications (operated by the Whitestone Community Association)	Whitestone Poncelet River In-Stream Energy Conversion (RISEC) Project	Alaska	2011	Factibilidad
8	Universidad Austral de Chile	Evaluación de una Turbina Hidrocinética de tipo Darrieus para la localidad de Melinka	Melinka, Guaitecas	2012	Tesis MSc.
9	RWTH Aachen University	Hydrokinetic Energy for enlightening the future of rural communities in Uttarakhand	Uttarakhand, India	2014	Artículo
10	Department of Mechanical and Chemical Engineering, Islamic University of Technology	Potentially of small scale hydro power plant using the kinetic energy of flowing water of Gumoti and Surna river	Bangladesh	2013	Artículo
11	Escuela Técnica Superior de Ingeniería Civil e Industrial, Universidad de La Laguna	Diseño y cálculo de una turbina hidrocinética para ríos	España	2015	Tesis Pre grado
12	Tennessee Research and Creative Exchange, University of Tennessee	Composite Rotor design for a hydrokinetic turbine	Tennessee	2009	Reporte
13	Universidad de Piura	Diseño de una turbina hidrocinética para aprovechamiento energético de ríos no caudalosos	Piura, Perú	2013	Tesis Pre grado
14	University of North Texas	A study of power generation from a low-cost hydrokinetic energy system	Texas	2013	Tesis MSc.
15	Pontifica Universidad Católica de Chile	Metodología costo efectiva para el diseño de una turbina hidrocinética de eje horizontal	Santiago de Chile	2014	Tesis Pre grado
16	Universidad Nacional Autónoma de México	Comportamiento hidráulico de turbinas cinéticas de flujo axial en canales a superficie libre, como una alternativa de generación de energía hidroeléctrica en obras y estructuras existentes	México	2011	Tesis MSc.
17	Missouri University of Science and Technology	Design and critical performance evaluation of horizontal axis hydrokinetic turbines	Missouri	2010	Tesis MSc.
18	Universidad Nacional Mayor de San Marcos	Diseño de una turbina de río para la generación de electricidad en el distrito de Mazán - Región Loreto	Lima, Perú	2005	Tesis Pre grado
19	Missouri University of Science and Technology	Transmission shaft design for hydrokinetic turbine with reliability consideration	Missouri	2013	Tesis MSc.
20	Universidad de Brasilia	Horizontal axis hydrokinetic turbine	Brasilia, Brasil	2016	Artículo

Tabla 2.1. Mercado actual de Proyectos en THC's.

(Fuente: Elaboración Propia).

c. Fabricantes. Este sector es el que actualmente hace un negocio más estable en base a la producción de estas turbinas. Si bien son un grupo reducido a nivel mundial, ya existe gran cantidad de empresarios dedicados a las energías renovables especializadas en la energía hidráulica no convencional [16]. Para este caso, existen 34 empresas representantes en todas las partes del mundo, dedicadas a la fabricación y puesta en marcha de diferentes tipos de tecnologías dedicadas a este tema (ver Anexo 2.1), pero solo siete se dedican exclusivamente al trabajo de las THC.

N°	Fabricante	Ubicación	Nombre del dispositivo	Página Web
1	Bourne Energy	Malibu, CA	Riverstar	www.bourneenergy.com
2	Hydro Green Energy	Houston, TX	HydroGreen Turbine	www.hgenergy.com
3	Scots Renewables	United Kingdom	S RTP	www.scotrenewables.com
4	Smart Hydro Power	Germany	Hydrokinetic Turbine	http://www.smart-hydro.de
5	Verdant Power	Arlington, VA	Kinetic Hydro Power System	www.verdantpower.com
6	Schootel Industries	Alemania/Colombia	Hydrokinetic Turbine	www.schottel.de
7	Atlantis Resources	Escocia	MeyGen Project HKT	http://www.meygen.com/

*Tabla 2.2. Producción masiva a nivel mundial.*

(Fuente: Elaboración Propia).

En resumen, se tiene que saber que para la elección y búsqueda de todas estas referencias se tiene que velar por la evaluación y priorización de los proyectos [17]. Es decir, no todos los fabricantes ni todas las instituciones que hacen investigaciones en este tema son o serán considerados para desarrollar el diseño ya que se encuentran en un nivel de investigación tan igual o menor que el propuesto en este trabajo de tesis.

Para la selección, se consideró a la estrategia competitiva (liderazgo tecnológico, liderazgo de costos, concentración en el cliente e imitativa), a la segmentación de mercados, a las trayectorias tecnológicas de cada empresa o institución, y finalmente a la plataforma de productos de innovación en las últimas investigaciones realizadas [18]<sup>2</sup>.

---

<sup>2</sup> Tener en cuenta que estos mismos criterios se tomarán en el Capítulo 3 para la Identificación de Oportunidades.

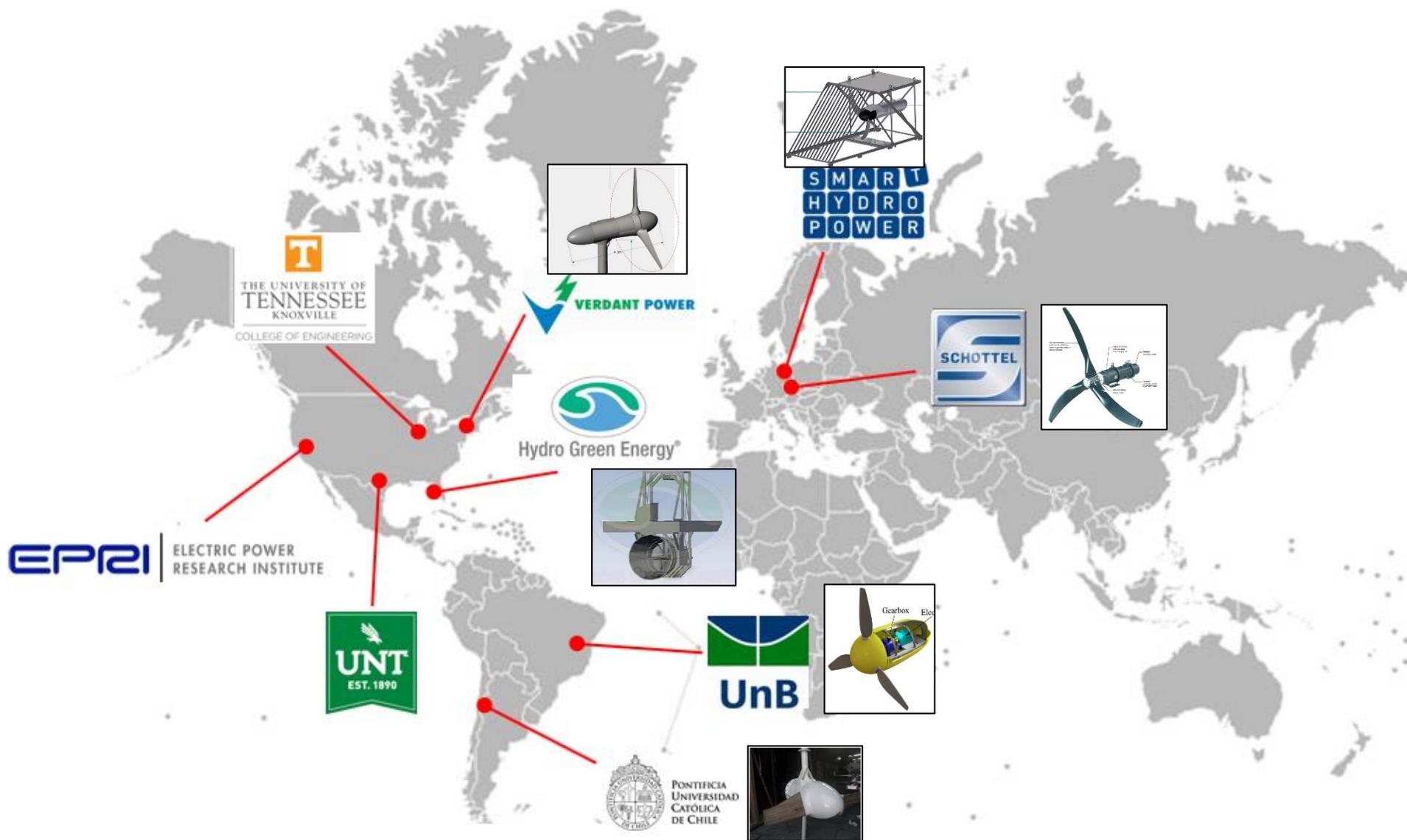


Figura 2.7. Investigación, proyectos y fabricantes a nivel mundial (Fuente: Elaboración Propia).

## **2.3 Minicentrales de Generación Eléctrica**

Las energías renovables como la solar, eólica y la hidráulica a pequeña escala han demostrado ser apropiadas para las condiciones de las poblaciones rurales, pues son un recurso local y no requieren de una inversión para combustible (T. Sánchez, R. Escobar; 2012). Por un lado, hay la necesidad de cubrir la demanda de electricidad en las zonas más alejadas del país y ese es un plan a corto plazo de parte del gobierno, hay planes de hacer el tendido eléctrico hasta esa zona y de cumplir con los decretos legislativos antes mencionados (Decreto Supremo 012-2011 y 020-2013).

Por otro lado, se sabe que el tendido de la red nacional se hace cada vez más costoso y difícil por la lejanía de los lugares de instalación, además de un costo adicional por atender el tendido a sitios con una baja densidad poblacional. Para esto, la solución presentada en este trabajo forma parte de las minicentrales hidroeléctricas que no es más que la captación de la energía del agua a pequeña escala.

### **2.3.1 Microcentrales hidroeléctricas (MCH) y sus componentes**

Normalmente, un hidrosistema requiere de un caudal de agua y una diferencia de altura para producir una potencia útil aprovechando la energía potencial que se genera en la altura (se toma la energía en forma de caudal y altura para convertirla en energía mecánica que se transmite al eje). Esto por años ha sido el concepto tradicional y el principio base para sacar energía del agua, se tenía un proceso de construcción explícito como las conexiones de tuberías, obras civiles, instalación de generadores, transformadores, estructuras, cimientos, presas, etc.

Hoy en día, cuando se habla de microcentrales hidráulicas también se considera desde la más pequeña tecnología que se usa para sacar energía del agua hasta las obras civiles más grandes del mundo como lo son las centrales de grandes picos de generación electricidad. Es por eso, que ahora se rigen bajo la siguiente clasificación [19]:

- i. Picocentrales hidroeléctricas: Hasta 5kW.
- ii. Microcentrales hidroeléctricas: De 5 a 100kW.
- iii. Minicentrales hidroeléctricas: De 100 a 1000kW.

Donde, la primera (i) es el único tipo que no requiere de un sistema completo con todos los componentes convencionales de una central tradicional [20]. Aun así, existen ciertas alineaciones que si competen al diseño de un sistema donde la turbina hidrocínética sería el principal equipo:

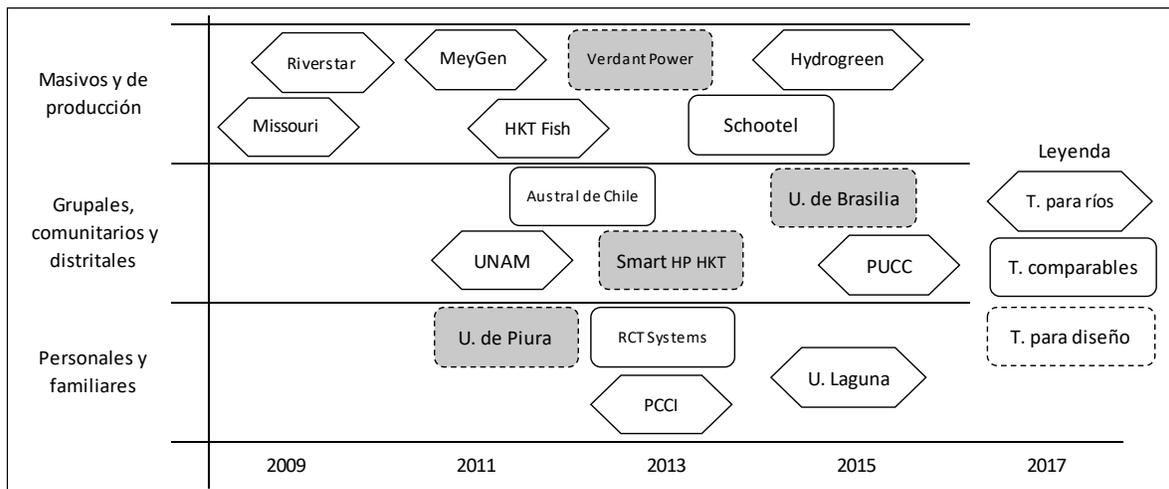
- Bocatoma: No se tiene que usar estructuras de cemento o madera (materiales tradicionales), si no que en caso extremo se use las rocas, barro y ramas del lugar para poder orientar el caudal hasta la ubicación de la turbina.
- Canal de conducción: No es necesario hacer una intervención de profesionales civiles para este tema, ya que al sólo tomar el caudal y más que nada la velocidad del agua en forma horizontal, la propia naturaleza guía el fluido hacia la turbina.
- Desarenador y/o cámara de carga: El desarenador es el único que se puede implementar en caso extremo que el flujo de sedimentos y sólidos sea mayor de lo normal.
- Tubería de Presión: No es necesario.
- Casa de máquinas: Solo estará la turbina y el sistema conectado al generador para la conversión de energía.
- Equipo electromecánico: Es el principal punto ya que en este se encuentra la turbina hidrocínética (THC). Para tenerlo en claro, este solo utiliza la fuerza que el agua genera para que mediante un rotor que gira, transmita energía que es llevada por el eje hasta el sistema de transmisión [21]. Es así, que para las THC necesitamos una turbina de flujo axial, como se detalló en la sección 2.2.2.

### **2.3.2 Gestión de un Proyecto con MCH**

Si una comunidad necesita energía que puede ser cubierta por una MCH, se debería buscar apoyo en instituciones especializadas como organismos de cooperación, gobiernos regionales, gobiernos locales, municipalidades, distritos aledaños y comunidades que están registrados en el SINA [22]. Para esto, es necesario que haya información detallada que cada comunidad debería recopilar para que tenga lo básico y pueda solicitar este tipo de proyecto:

- Localizar en un mapa de la región la comunidad y el acceso desde la ciudad más cercana.
- Identificar a todos los miembros de la comunidad (debería ya haber sido censada por una institución del estado como el IBC) [23].
- Identificar las necesidades de electricidad en la comunidad<sup>3</sup>, por ejemplo, los equipos necesarios que podrían operar en el lugar para así poder generar algún negocio y/o empresa.
- Verificar si existe la posibilidad de usar varios recursos naturales para poder generar energía (sol, viento, agua, etc.).
- Verificar si la red eléctrica nacional está cerca de la comunidad.
- Organizar un comité para dedicar tiempo a la investigación en electrificación de este tipo.

Una vez establecido esto, se puede evaluar el mercado actual como en la sección 2.2.3 para determinar con que proyecto se puede hacer las comparaciones respectivas. Además, de seleccionar cuáles son exclusivos para ríos, tanto para fabricantes, investigación y proyectos en desarrollo (Ver mapa 2.2).



Mapa 2.2. Segmentación de mercados. (Fuente: Elaboración Propia).

<sup>3</sup> Una de las razones por las cuales la identificación de necesidades del capítulo siguiente será relevante para el éxito del diseño de la THC.

## **CAPÍTULO III**

### **GENERACIÓN Y SELECCIÓN DE CONCEPTO**

Muchos de los productos que se usa tanto en la industria como en el hogar han llevado un proceso de desarrollo específico para llegar a ser producidos de forma masiva y finalmente llegar al cliente [24]. Estos procesos son diferentes por cada tipo de producto que se pueda tener ya que existen productos que son de plataforma (chips, sistemas operativos y hasta navajas de un afeitador), productos de proceso intensivo (alimentos, productos químicos y hasta papel), productos de alto riesgo (aquellos con grandes incertidumbres relacionadas a tecnología y al mercado), productos de rápida elaboración (consumo masivo, software, y productos electrónicos), y finalmente los productos que son especiales y son enfocados al presente trabajo de tesis: los productos personalizados [25].

Los productos personalizados se desarrollan en respuesta a un pedido específico de un cliente y consiste básicamente en establecer valores de variables de diseño tales como dimensiones físicas y materiales. Para el desarrollo del diseño de la turbina hidrocínética (en adelante THC), el cliente viene a ser la comunidad selvática que se estudiará y es donde el Proceso Genérico de Desarrollo se elaborará con un nivel de detalle mayor ya que se necesita especificar cada paso que se dará para la determinación de medidas y especificaciones técnicas de la turbina. Este capítulo presenta el desarrollo de esta metodología para el diseño mecánico de un proyecto, en cuanto a la generación de alternativas de solución dependiendo de las necesidades del cliente y especificaciones de nuestro nuevo producto y posteriormente, de la elección de la mejor alternativa de solución.

#### **3.1 Identificación de Oportunidades**

¿Qué son? La descripción general de un producto, una necesidad recién percibida, una tecnología descubierta hace poco tiempo y hasta la correspondencia entre necesidad y una posible solución. Las oportunidades vienen a ser todos estos conceptos enfocados en la búsqueda de una idea que sea más sólida para su desarrollo.

En ese contexto, la aplicación de una turbina viene a ser una búsqueda de oportunidades tanto de “Conocimiento de Tecnología” porque se conoce una probable solución y también de “Conocimiento del Mercado” porque se sabe hasta qué punto se percibe la necesidad que la solución aborde. Para esto, se puede simplificar su entendimiento con las llamadas “Oportunidades Horizonte” (Ver figura 3.1). Se abordará una necesidad existente y se llegará a tener una solución existente sin aplicar en nuestro país.

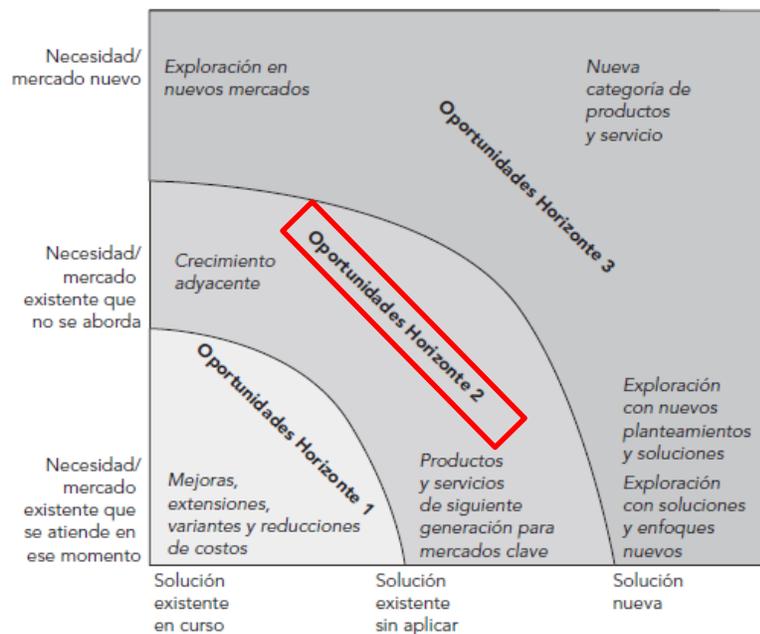
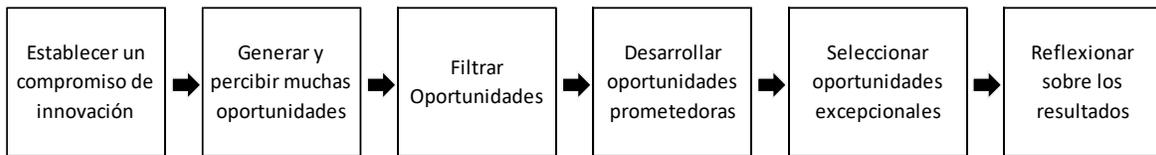


Figura 3.1. Identificación de oportunidades horizonte.

(Fuente: Ulrich, K., Eppinger, S. (2013). Product Design and Development 5<sup>th</sup> Edition. Mc Graw Hill Education)

### 3.1.1 Proceso de Identificación de Oportunidades

Se establece el siguiente proceso:



1. Establecer un compromiso de innovación. También llamado estatuto de innovación, hace referencia a la idea macro del proyecto: “Diseñar un equipo mecánico como el de las centrales hidroeléctricas, a través de un proceso de diseño exclusivo y que sea aplicable para diferentes condiciones”.

Por lo tanto, en los próximos pasos se establecerá de forma directa como se ha estructurado la información para obtener nuestras mejores oportunidades en base a esta innovación.

2. Generar y percibir muchas oportunidades. Será basado en las técnicas para generar oportunidades recomendada por la metodología, donde se especifica de mejor manera la forma de buscar tantas oportunidades como sea posible.
  - a. Considerar implicaciones de tendencias. Se enlistan las tendencias sociales, ambientales, tecnológicas o económicas y después se imaginan posibles oportunidades de innovación para cada una (T1).
  - b. Imitar. Dividida en cuatro secciones principales:
    - i. Medios y actividades de mercadotecnia de otras empresas y/o proyectos. Soluciones asociadas a toda innovación que se pueda identificar como lo hacen en otros proyectos de energía eléctrica (T2 – 2.1).
    - ii. Hacer que las materias primas ya no sean materias primas. Enlistar todos los proyectos energéticos de turbinas o servicios por energía en zonas rurales en una categoría, y considerar la posibilidad de formas lujosas de su implementación (T2 – 2.2).
    - iii. Versiones más pobres. Se enlistan los mejores proyectos en diseño de turbinas para considerar versiones en las que son baratas, pero con las mismas características de diseño y materiales (T2 – 2.3).

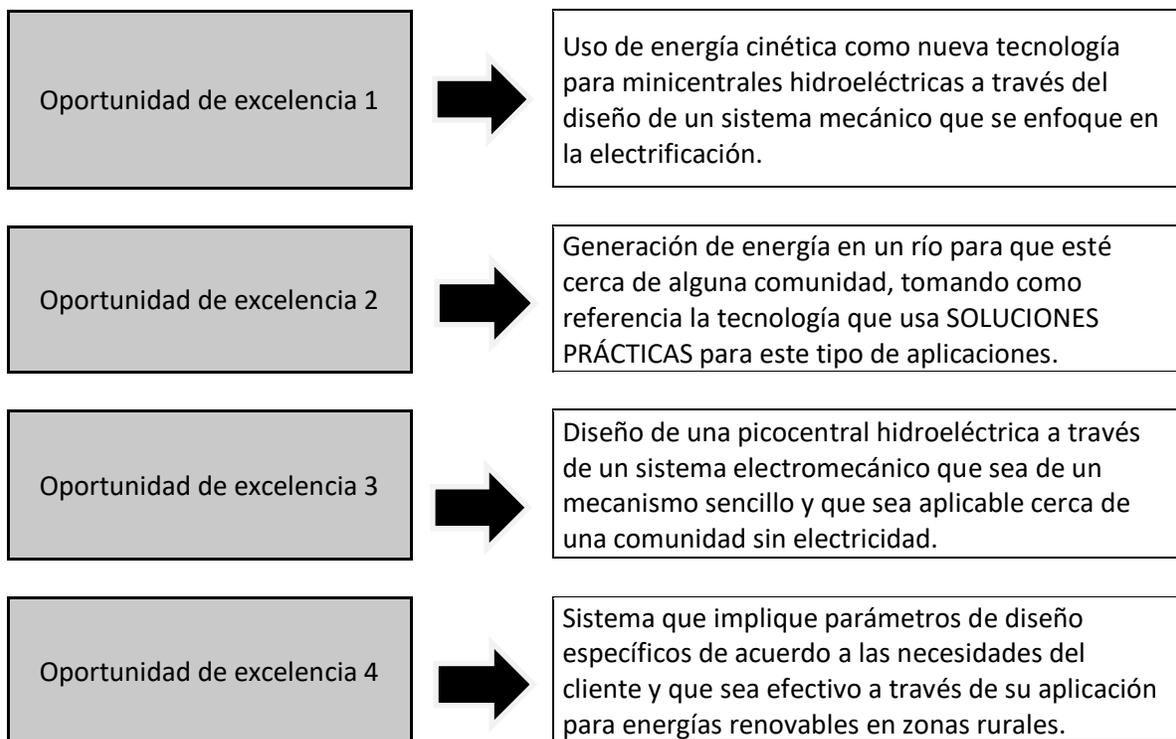
- iv. Importación. Se enlistan oportunidades en las que el diseño de una turbina pueda ser aplicable en otros campos como mares, lagunas o pongos (T2 – 2.4).
- c. Elaborar lista de fallas. Se enlista todo problema de tal forma que se haga una oportunidad, es decir, algo positivo para el diseño como por ejemplo la eficiencia, la geometría, mecanismo, demanda, ambiente, etc. (T3).
- d. Capacidades. Dividida en cuatro partes principales:
  - i. Valioso. ¿Qué es lo que hace diferente a esta turbina de otras turbinas antes diseñadas? Se enlista las oportunidades que daría el proyecto (T4 – 4.1).
  - ii. Raro. Se enlista alguna característica que otras turbinas no podrían realizar (T4 – 4.2).
  - iii. Inimitable. Se pone en lista oportunidades donde las versiones sean únicas e inigualables (T4 – 4.3).
  - iv. Insustituible. Se pone en lista las características que aparte de ser únicas, no deben ser fáciles de sustituir (T4 – 4.4).
- e. Pasión y actividades personales. Se enlista oportunidades en las que las cosas que las apasionan se relacionen con el proyecto. Ejemplo: Dar electricidad a todo el país promovido por el estado y por empresas privadas transnacionales (T5).
- f. Estudio de clientes. Promover que el diseño de esta turbina sea de fácil entendimiento para las personas que van a utilizarlos, por lo que, se pone en lista la aplicación de la turbina y su uso por parte de personas de la selva amazónica (T6).
- g. Fuentes. Se enlista a los usuarios líderes, representantes de empresas, universidades y laboratorios gubernamentales que de alguna forma puedan apoyar al diseño e implementación de la turbina (T7).

Después de hacer el listado general de todas las oportunidades que se puedan encontrar con todas las técnicas de generación (Ver anexo 3.1), se llega a enlistar un total de 5 compromisos de innovación y 42 oportunidades. Por lo tanto, los procesos siguientes

constan en reducir estas oportunidades y llegar a tener un número específico de estas como patrón de lo que realmente queremos para este trabajo de tesis.

3. Filtrar oportunidades. Se reducen 24 oportunidades a través de la eliminación con las siguientes características:
  - a. Eliminar las que tengan poca probabilidad de resultar en la creación de la propuesta de valor y de las que no requieran tanta investigación.
4. Desarrollo de oportunidades prometedoras. Análisis e investigación de las 18 oportunidades restantes buscando posibles soluciones de distinto tipo. Se descartan en base a los costos, accesibilidad, alcance, propuesta de aplicación, entidades comprometidas, etc. Al final, quedan 11 oportunidades.
5. Seleccionar oportunidades de excelencia. Aplicando el método RGV “Real – Ganar – Vale la pena” que se resume en las tres preguntas: ¿es real?, ¿Se gana algo con esta oportunidad? y ¿La oportunidad vale la pena financieramente?, se establece la reducción de oportunidades a unos cuatro en total:
  - Uso de energía cinética como nueva tecnología para minicentrales hidroeléctricas.
  - Generación de energía en un río para que esté cerca de alguna comunidad [26]. (Organismo de Cooperación Soluciones Prácticas).
  - Diseño de una picocentral hidroeléctrica a través de un sistema electromecánico.
  - Sistema que implique parámetros de diseño específicos de acuerdo a las necesidades de una comunidad amazónica localizada.

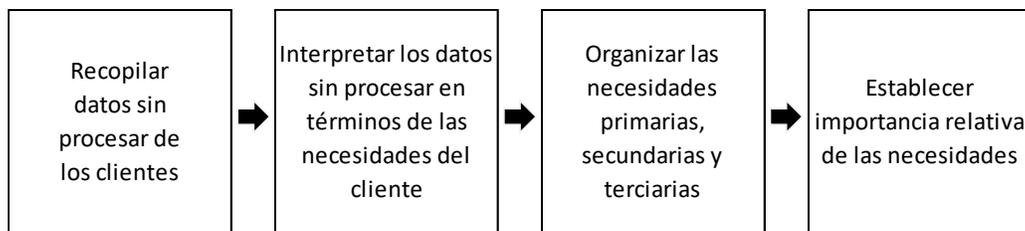
Cada una de estas requiere de una descripción detallada llamada “extensión de oportunidades de excelencia” (Ver mapa 3.1).



*Mapa 3.1. Extensión de oportunidades de excelencia.*  
(Fuente: Elaboración Propia).

### 3.2 Identificación de Necesidades

Se establece el siguiente proceso:



1. Recopilar datos sin procesar. Dividido en la selección de clientes y la documentación de la interacción con clientes.

1.1 Selección de clientes. Se toma las siguientes consideraciones: (a) usuarios líderes son los que presentan necesidades hace meses o años, por ejemplo, las tantas personas indígenas que esperan por años un servicio básico de luz o agua potable, (b) usuarios son los grupos indígenas que presentan necesidades básicas como la llegada de autoridades a sus terrenos, (c) minoristas son los clientes que podrían adquirir el proyecto

como prueba inicial de un proyecto de mayor envergadura y (d) centros de venta en general se refiere al proyecto de forma masiva. Con estas consideraciones, se da un puntaje específico de acuerdo al nivel de relevancia para los tres segmentos de mercado que se mencionaron en el capítulo anterior y se concluye que los “usuarios” son los que deben tener más enfoque al momento de determinar sus necesidades.

Dónde: 5: Muy relevante, 3: Relevante, 1: Sin relevancia

	<b>Usuarios Líderes</b>	<b>Usuarios</b>	<b>Minoristas</b>	<b>Centros de venta en general</b>
<b>Masivos y de producción</b>	<b>3</b>	<b>5</b>	<b>1</b>	<b>5</b>
<b>Grupales, comunitarios y distritales</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>1</b>	<b>1</b>
<b>Personales y familiares</b>	<b>3</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>1</b>

*Tabla 3.1.* Selección de clientes de acuerdo a niveles.

(Fuente: Elaboración Propia).

1.2 Documentos de la interacción con clientes. Normalmente se hacen a través de entrevistas personales o “focus groups”. Sin embargo, en este caso se toma como referencia a las diferentes investigaciones hechas acerca del tema (brochures, tesis, artículos, proyectos, producciones). Se considera siete preguntas y/o sugerencias<sup>4</sup> de las cuales se presentan dos de las más importantes (Tabla 3.2) debido al tema que se aborda: usos habituales del agua de los ríos y cómo enfrentar el problema de la falta de electricidad en la zona estudiada.

---

<sup>4</sup> Ver tabla completa de la Documentación de la interacción con clientes en el Anexo 3.2.

<p><b>Referencia:</b> Brochures, reportes académicos, tesis de pregrado, maestría y doctorados; y artículos científicos referidos al tema.</p> <p><b>Consideración:</b> Estado de arte e investigaciones de la situación de las oportunidades, motivaciones, necesidades por las cuáles se utiliza la tecnología de aprovechar la energía hidrocínética en proyección de un bien común.</p> <p><b>Fecha:</b> 2012 - 2016</p>		
<b>Pregunta/ Sugerencia</b>	<b>Enunciados clave</b>	<b>Necesidad interpretada</b>
<b>Usos habituales del agua de los ríos</b>	“Trato de captar el agua más limpia para poder asearme o para la comida”	La THC aprovecha la mayor agua posible para poder transformar la energía, es decir, trabajo con una buena eficiencia.
	“A veces nos organizamos para poner en orden las piedras y así el agua sea más limpia”	La THC y su estructura establecen un orden para tener un caudal continuo de trabajo.
	“La utilizamos para poder lavar la ropa o para cocinar con el agua que está allí”	La THC generará que la comunidad ordene los canales que se utilizan para su instalación.
	“Nos bañamos cuando el caudal está bajo”	La THC toma la velocidad del río para poder generar la mayor energía posible y considera un sistema de alarma para velocidades mayores.
<b>Como enfrentar el problema de la falta de electricidad</b>	“No hay cableado y nunca ha llegado por acá algún proyecto para ayudarnos a tener luz”	La THC tiene proyección a tener una instalación Smart Grid para poder electrificar las comunidades.
	“Tenemos problemas por la noche o si queremos ir a otro lugar por alguna emergencia”	La THC cumple con la demanda de electricidad de acuerdo a un estudio previo sobre los kW que estas comunidades necesitan.
	“No podemos hacer estudiar a nuestros hijos, ni ellos pueden ver las demás cosas que hay en el exterior”	La THC cumple con generar energía y así ampliar el desarrollo de las personas de las comunidades. Capacitarlas.

*Tabla 3.2. Documentación de necesidades de clientes.*

(Fuente: Elaboración Propia).

2. Interpretar los datos sin procesar. Ayuda a determinar la expresión de necesidades en base a lo que el diseño necesita, no en términos de cómo puede hacerlo. Además, se presenta la necesidad tan específica como cuando fue recopilada. Al final, se establece cinco directrices y dieciocho necesidades específicas (Ver anexo 3.2). Sin embargo, con el propósito de identificar cuáles son los más críticos presentamos dos directrices fundamentales que nos ayudarán para los siguientes procesos: el “qué” y el “atributo”.

Directriz	Frase / Enunciado	Necesidad interpretada
<b>"QUÉ"</b>	"¿Por qué no lo hacen más fácil de usar y poder mantenerlo?"	Las condiciones del río determinan las medidas de los álabes y de la estructura.
	"No entendemos cuando vienen a aplicar su tecnología, ni siquiera sabemos cómo es por dentro"	La THC tiene planos de ingeniería fáciles de entender y que están de acuerdo a la norma.
<b>"ATRIBUTO"</b>	"Me gustaría poderle hacer su mantenimiento con mis hijos y que ellos entendieran más eso"	La THC cuenta con un manual de partes y medidas, como también de las recomendaciones para su mantenimiento.
	"No sé qué es lo que les diferencia a ustedes de esas empresas que hacen grandes turbinas"	La THC es considerada una RER y cumple las normas peruanas que legislan este tipo de tecnologías.
	"¿Qué pasa si es muy grande o muy pequeño?"	La THC es un equipo ergonómico y que se acopla de acuerdo a las condiciones de uso.
	"Va a costar mucho para todos tenerlo acá"	La THC no es de un costo inicial alto y cuenta con componentes que no generan mayor gasto tanto de inversión como de mantenimiento.
	"Si no funciona en este río, como sé que funcionará en otros"	La THC es aplicable para diferentes ríos de acuerdo a las condiciones de cada una de estas.
	"Se supone que deberá quedarse solo por esta zona y no moverse hacia otros lados"	La THC tiene una ubicación específica y con una estructura que no permite que la turbina se desplace.
	"La idea es que tengamos electricidad todo el día y podamos controlar el consumo"	La THC tiene un sistema de reserva de energía.

*Tabla 3.3. Integración de datos de clientes con directrices.*

(Fuente: Elaboración Propia).

3. Organización de las necesidades primarias, secundarias y terciarias. De acuerdo a los dos primeros puntos, se hace una jerarquización para determinar prioridades de necesidades (Ver tabla 3.4). Estas están registradas de acuerdo a un color y serán determinantes para relacionarlas en el siguiente paso con alguno de los componentes principales de la THC.

<p><b>La THC cumple con la demanda de electricidad de acuerdo a un estudio previo sobre los kW que estas comunidades necesitan.</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• La THC dará electricidad a un número de familias para satisfacer la demanda de electricidad.</li> <li>• La THC es una tecnología nueva para las zonas rurales y que es aplicable en los ríos amazónicos.</li> </ul>	<p><b>La THC cumple normas y estándares peruanos para su diseño y considera las exigencias de las comunidades.</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• La THC es considerada una RER y cumple las normas peruanas que legislan este tipo de tecnologías.</li> <li>• La THC tiene planos de ingeniería fáciles de entender y que están de acuerdo a la norma.</li> </ul>
<p><b>La THC aprovecha la mayor agua posible para poder transformar la energía, es decir, trabajo con una buena eficiencia.</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• La energía cinética como aprovechamiento para generar energía es un diferenciador importante en el diseño de la THC.</li> </ul>	<p><b>La THC cuenta con un manual de partes y medidas, como también de las recomendaciones para su mantenimiento.</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• La THC es un diseño con un mecanismo sencillo y que tiene un sistema de mantenimiento fácil de realizar.</li> </ul>
<p><b>La THC toma la velocidad del río para poder generar la mayor energía posible y considera un sistema de alarma para velocidades mayores.</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• La THC contará con dimensiones específicas que se adecuen a los ríos escogidos. Contará con planos.</li> <li>• Las condiciones del río determinan las medidas de los álabes y de la estructura.</li> <li>• La THC no interviene en cambiar la dirección de los canales ni de contaminar el agua.</li> </ul>	<p><b>La THC cuenta con condiciones de trabajo mínimas y máximas para poder cumplir la demanda de electricidad y por seguridad.</b></p> <p>La THC cuenta con un sistema de emergencia y apagado automático para evitar problemas.</p> <p>La THC cuenta con un sistema que no permite la entrada de los animales a los álabes.</p> <p>La THC cuenta con un sistema de anclaje fácil de operar en caso se requiera hacerle alguna reparación internamente.</p>
<p><b>La THC tiene un desarrollo de producto conocido por instituciones del gobierno. Aprobación previa de los planos de fabricación.</b></p>	<p>La THC es considerada como una RER, por lo que se considerará una seguridad para la tala.</p>
<p>El estudio y el diseño de la THC es la primera etapa de investigación para su implementación en el país.</p>	<p><b>La THC tiene una selección de materiales óptima para que el equipo trabaje normalmente por años.</b></p>
<p><b>La THC generará que la comunidad ordene los canales que se utilizan para su instalación.</b></p>	<p><b>La THC tiene una ubicación específica y con una estructura que no permite que la turbina se desplace.</b></p>

*Tabla 3.4. Jerarquización de necesidades primarias y secundarias.*

(Fuente: Elaboración Propia).

4. Establecer importancia relativa de las necesidades. La lista jerárquica por sí sola no da ninguna información sobre la importancia relativa que los clientes ponen en diferentes necesidades, por lo que, este paso establece estas importancias y su resultado es la valoración numérica para un subconjunto de necesidades. Además, se relaciona las necesidades de acuerdo a los componentes que estructuran toda la turbina.

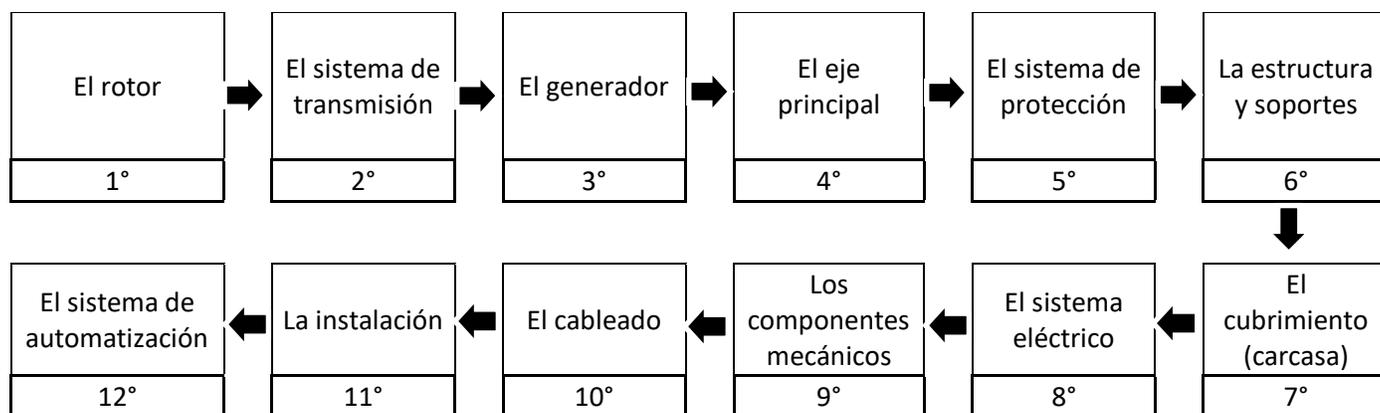


Figura 3.2. Importancia relativa de necesidades de acuerdo a estructura de la THC.  
(Fuente: Elaboración Propia).

El rotor, sistema de transmisión, generador y el sistema en general vienen a ser los cuatro puntos principales de la THC:

Donde: 1: Muy importante, 3: Importante, 5: Poco importante

Número	Distribución	Necesidad	Importancia
1	El rotor	Tiene una geometría acorde al río escogido	3
2	El rotor	Permite verlo con facilidad por el color	5
3	El rotor	Hace posibles cambios de velocidad debido a la velocidad del río	1
4	El rotor	Tiene un sensor de torque por seguridad	1
5	El rotor	Los álabes y el buje deben tener un material acorde al trabajo en ríos	5
6	El rotor	Es ligero en peso	3
7	El rotor	Debe haber un torque máximo de trabajo	3
8	El rotor	Es de fácil desmontaje	3
9	El rotor	No debe trabajar con fluido turbulento	5
10	El rotor	Tiene una larga vida útil por los materiales con los que se fabricó	1

Tabla 3.5. Importancia de necesidades para el rotor. (Fuente: Elaboración Propia).

Número	Distribución	Necesidad	Importancia
11	El sistema de transmisión	Contiene puntos rígidos de montaje para que no se desprendan las piezas	5
12	El sistema de transmisión	Las fuerzas que se generan al eje no deben ser mayores	3
13	El sistema de transmisión	Es fácil de instalar	1
14	El sistema de transmisión	Trabaja con soportes internos fijos	3
15	El sistema de transmisión	Su mantenimiento no es prolongado	3
16	El sistema de transmisión	Es seguro por un posible choque	5
17	El sistema de transmisión	No tiene un peso exagerado	3
18	El sistema de transmisión	Se tiene pérdidas mínimas por rozamiento y fricción	1
19	El sistema de transmisión	No tiene grandes pérdidas de energía por las piezas	3
20	El sistema de transmisión	Cuenta con un espacio acorde al tamaño del rotor	3

Tabla 3.6. Importancia de necesidades para el sistema de transmisión.  
(Fuente: Elaboración Propia).

Número	Distribución	Necesidad	Importancia
21	El generador	Tiene una conexión trifásica de fácil instalación	5
22	El generador	Tiene un sistema para evitar cortocircuitos y sobrecargas	3
23	El generador	Contiene un fácil mecanismo para el alineamiento	5
24	El generador	Permite hacer la conexión al sistema eléctrico de fácil forma	1
25	El generador	No es muy pesado	3
26	El generador	Tiene una conexión de corriente alterna para su trabajo (CA)	1
27	El generador	Soporta las cargas nominales propias del diseño de la turbina	3
28	El generador	Cuenta con un soporte interno que está conectado al cubrimiento externo	5
29	El generador	La relación voltaje vs frecuencia debe ser de forma lineal	1
30	El generador	No tiene pérdidas mayores por conversión de energía	5

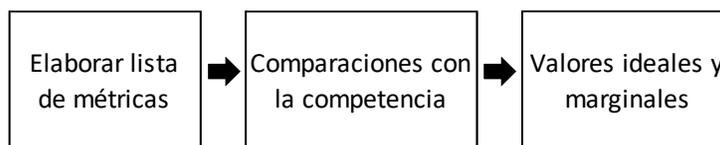
Tabla 3.7. Importancia de necesidades para el generador.  
(Fuente: Elaboración Propia).

Número	Distribución	Necesidad	Importancia
101	Sistema general	Se tiene las dimensiones generales de la turbina	1
102	Sistema general	Se sabe el número de álabes de instalación	1
103	Sistema general	Tiene un coeficiente de potencia alto para mejor eficiencia	1
104	Sistema general	Genera una cierta cantidad de kW para cubrir demanda de electricidad	1
105	Sistema general	Cumple con una cantidad de energía generada por día	1
106	Sistema general	Tiene un torque generado por las álabes	1
107	Sistema general	Contiene coeficientes hidrodinámicos óptimos para el trabajo de los álabes	1
108	Sistema general	Existe una relación de velocidad en la punta de los álabes	1
109	Sistema general	Cuenta con un ángulo de ataque que diferencia la velocidad del agua	1
110	Sistema general	Tiene una fuerza de arrastre que se opone a la generación del torque	1

Tabla 3.8. Importancia de necesidades para el sistema en general.  
(Fuente: Elaboración Propia).

### 3.3 Especificaciones Objetivo

Se establece el siguiente proceso:



1. Elaborar lista de métricas. Es el traspaso de las necesidades hacia parámetros específicos con el objetivo de que el producto satisfaga todas las necesidades del cliente en base a unidades de medida (Ver tabla completa en Anexo 3.3). Se establecen 77 métricas, donde el proyecto se enfoca en 25 principales.

Además, considerar que hay parámetros que existen, pero como especificaciones técnicas del producto, es decir, donde no se puede modificar su valor. Ejemplo de esto es la velocidad del agua, las condiciones climáticas de la comunidad y hasta la hidrología del río a tratar. Estos serán mencionados más adelante para determinar un mejor diseño a detalle de la THC.

Número de métrica	Necesidades	Métrica	Importancia	Unidades
1	6,17,25,50	Masa total	3	kg
2	1	Diámetro máximo del rotor	3	m
7	7	Área de captación del agua (barrido)	1	m <sup>2</sup>
9	5	Materiales de uso de los álabes y el buje.	5	Lista
10	7	Fuerzas axiales y tangenciales de los álabes	1	N
11	4	Velocidad de giro del rotor	1	min <sup>-1</sup>
26	33	Diámetro máximo del eje principal	1	pulgadas
32	47	Bio - criterios para dimensionar el sistema de protección	5	Lista
33	48,49,53,55,60	Material de la estructura, soportes y cubrimiento (carcasa)	3	Lista
49	74	Componentes de diseño y selección (primarios y secundarios)	5	Lista
52	77	Esfuerzos de contacto, por tensión, flexión, etc.	3	psi
53	78	Factor de seguridad y de confiabilidad del diseño	1	ad
54	79	Costos de materia prima	3	USD
60	87	Profundidad mínima útil	1	m
62	89	Geolocalización del río escogido	5	GPS
68	101	Tamaño de la turbina	1	mm
69	102	Número de álabes de instalación	1	ad
70	103	Coeficiente de potencia	1	ad
71	104	Potencia generada por la turbina	1	kW
72	105	Energía generada por día	1	kWh/d
73	106	Torque generado por los álabes	1	Nm
74	107	Coeficiente de sustentación y arrastre de los álabes	1	ad
75	108	Celeridad de diseño	1	ad
76	109	Ángulo de ataque de los álabes	1	grado sexagesimal
77	110	Fuerza de arrastre	1	N

Tabla 3.9. Lista de métricas. (Fuente: Elaboración Propia).

Para una mejor información y para tener más claro la relación entre necesidad y métrica, se hace la matriz de relación para solventar esta situación. Esta matriz es un elemento de la técnica gráfica establecida por “House of Quality” como parte de las mejores prácticas para el desarrollo de productos (Ver matriz general en el Anexo 3.4).

## 2. Comparaciones con la competencia.

Las comparaciones ayudan a reunir información sobre productos de la competencia para apoyar las decisiones respecto a cómo el nuevo diseño va a cumplir con las exigencias del mercado. Se establece diez fuentes de comparación: siete universidades, un instituto y dos empresas de producción masiva de THC's (Ver tabla 3.10).

## 3. Valores ideales y marginales

Una vez establecido las métricas, se tiene que especificar cuáles son los valores objetivos para estas métricas, para esto, se tiene dos tipos de valor objetivo: un valor ideal y un valor marginal. El primero es el mejor resultado que se puede esperar en el diseño, mientras que el valor marginal es el valor que apenas haría viable el diseño.

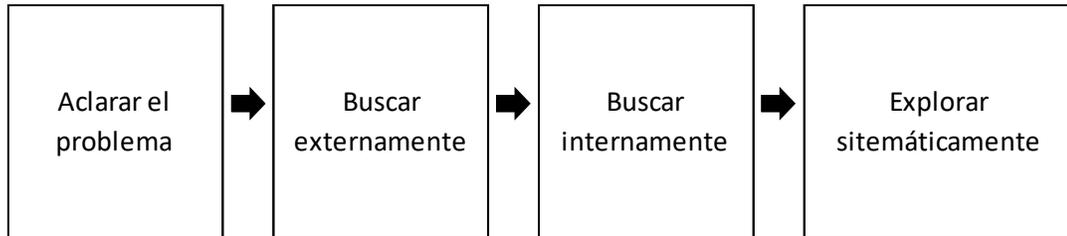
Sin embargo, para poder establecer valores que vayan acorde a lo que se quiere diseñar, se establece siete factores<sup>5</sup> que ayudan a su determinación: (A) hidráulica, hidrología y navegación fluvial de los ríos amazónicos, (B) evaluación de la demanda, recursos hídricos, diseño e instalación de microcentrales hidroeléctricas, (C) legislación peruana acerca de la generación eléctrica con energías renovables como el agua, (D) estudio del sistema de flotación y anclaje en equipos que incluyen sistemas de protección y recubrimiento, (E) estudio de perfiles hidrodinámicos para el diseño de álabes en THC's, (F) administración de costos en la implementación de microcentrales hidroeléctricas en zonas rurales y (G) sistemas de transmisión y transformación de energía para generación de electricidad en THC's. Estos factores se irán explicando más a detalle en las siguientes secciones y capítulos para su mejor entendimiento, por lo que, ahora se presentan cuáles han sido los valores definidos de las 25 métricas principales (Tabla 3.11).

---

<sup>5</sup> La definición de factores para hallar los valores ideales y marginales no son parte de la metodología utilizada, han sido creadas como parte de una mejor definición de valores.

### 3.4 Generación de conceptos

La norma de diseño Alemana VDI 2225 será referencia adicional para hacer la generación de posibles soluciones en proyección de un diseño óptimo. Para esta etapa se establece el siguiente proceso:



1. Aclarar el problema. Como ya se tiene una lista de exigencias inicial (especificaciones objetivo), se procede a representar la función de la THC en forma de una “caja negra” como una descomposición funcional del problema que tiene tres entradas y tres salidas que operan en flujos de material, energía y señales.

Donde:

- Material: Álabes en movimiento por efecto natural del agua que se transformará en electricidad distribuida para la comunidad.
- Energía: Energía del agua que se captará para obtener finalmente energía eléctrica almacenada.
- Señal: Señales de control y seguimiento a los procesos de transformación de energía para determinar avance o retrocesos en estos.

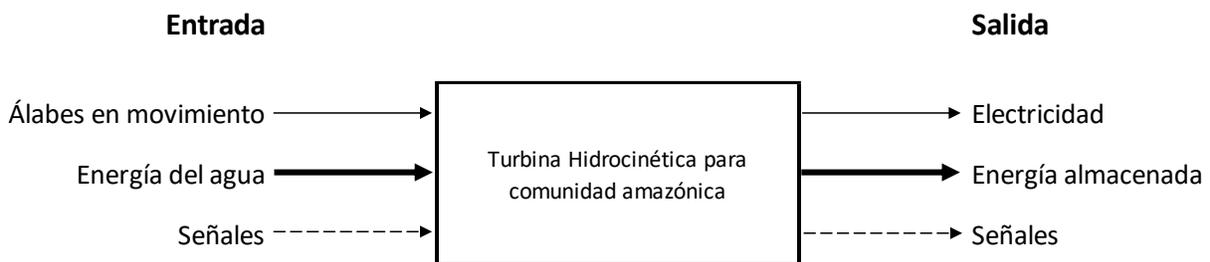


Figura 3.3. Caja negra. (Fuente: Elaboración Propia).

Mét num.	Necesidades	Métrica	Imp.	Unidades	UNMSM	U. DE PIURA	SMART HYDRO POWER	RWTH AACHEN	INST. DE INV DE ENERGÍA ELÉCTRICA	UNIV. DE BRASILIA	UNIV. DE TENNESSE	UNIV. DE MISSOURI	UNIV. DEL NORTE DE TEXAS	UNIV. LA LAGUNA
1	6,17,25,50	Masa total	3	kg	240		300	380		8398.9				980
2	1	Diámetro máximo del rotor	3	m	2	3.1693	1	1	1.7	8	5	1	0.5	1.4
7	7	Área de captación del agua (barrido)	1	m <sup>2</sup>	2.72	1.32729	0.785	0.785	2.2697	50.264	19.6344	0.785	0.2027	1.5393
9	5	Materiales de uso de los álabes y el buje	5	Lista	acero inox aleac de Al	fibra de vidrio				fibra de vidrio		acero inoxidable		acero inoxidable
10	7	Perfil hidrodinámico usado	1	Lista	NACA 4412	SG6043					NACA,FFA			NACA 4410
11	4	Velocidad de giro del rotor	1	min <sup>-1</sup>	42.74	31.34	90-230	90 - 230	15 - 35	15	27	400	175	80
26	33	Diámetro máximo del eje principal	1	pulgadas		2.25						1.299		1.6535
32	47	Bio - criterios para dimensionar el sistema de protección	5	Lista										
33	48,49,53,55,60	Material de la estructura, soportes y cubrimiento (carcasa)	3	Lista										
49	74	Componentes de diseño y selección (primarios y secundarios)	5	Lista										
52	77	Esfuerzos de contacto, por tensión, flexión, etc	3	psi										
53	78	Factor de seguridad y de confiabilidad del diseño	1	ad		8.766				1.5		2.5		
54	79	Costos de materia prima	3	USD										
60	87	Profundidad mínima útil	1	m	1.75		1.1	2	2.4					
62	89	Geolocalización del río escogido	5	GPS	3 ríos			1 río	1 río					
68	101	Tamaño de la turbina	1	mm			2640x1120 x1120	3130x1600x2010		5200x2900x2190				2500x2500x5000
69	102	Número de álabes de instalación	1	ad	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
70	103	Coefficiente de potencia	1	ad	0.35	0.45883							0.225	
71	104	Potencia generada por la turbina	1	kW	0.25	1	5	5	5	500	35		1	3.5
72	105	Energía generada por día	1	kWh/d				47.5						
73	106	Torque generado por los álabes	1	Nm						9.54				
74	107	Coefficiente de sustentación y arrastre de los álabes	1	ad		1.101 (S) 0.0088 (A)								
75	108	Celeridad de diseño	1	ad	5	4						5	7	
76	109	Ángulo de ataque de los álabes	1	grado sexagesimal		3.15								10
77	110	Fuerza de arrastre	1	N		6.02355								

Tabla 3.10. Comparación de parámetros con la competencia. (Fuente: Elaboración Propia).

Núm.	Necesidades	Métrica	Imp.	Unidades	Valor marginal	Valor ideal	Factores para determinación de valores ideales y marginales						
							A	B	C	D	E	F	G
1	6,17,25,50	Masa total	3	kg	320-400	>300	A			D			G
2	1	Diámetro máximo del rotor	3	m	2, 2.8, 4	2. 2.8, 4	A						
7	7	Área de captación del agua (barrido)	1	m2	12.57,24.63,50.27	12.57,24.63,50.27	A	B					
9	5	Materiales de uso de los álabes y el buje.	5	Lista	fibra de vidrio, acero inoxidable	fibra de vidrio, acero inoxidable	A	B					
10	7	Fuerzas axiales y tangenciales de los álabes	1	N	Axial:35kN, Tang: 8kN	Axial:40kN, Tang: 5kN					E		
11	4	Velocidad de giro del rotor	1	min^-1	20-40	30	A				E		G
26	33	Diámetro máximo del eje principal	1	pulgadas	2-3	2.5					E		G
32	47	Bio - criterios para dimensionar el sistema de protección	5	Lista	Bloqueo antipartículas	Sistema de protección	A	B	C			F	
33	48,49,53,55,60	Material de la estructura, soportes y cubrimiento (carcasa)	3	Lista	Acero	Fibra de Vidrio				D			
49	74	Componentes de diseño y selección (primarios y secundarios)	5	Lista	Anexo 3.6	Anexo 3.6		B					G
52	77	Esfuerzos de contacto, por tensión, flexión, etc.	3	MPa	20,40,60,80	40	A				E		
53	78	Factor de seguridad y de confiabilidad del diseño	1	ad	2.5-3.5	3	A	B	C	D	E		G
54	79	Costos de materia prima	3	USD	20 000 – 50 000	25 000	A	B				F	
60	87	Profundidad mínima útil	1	m	4,5,6	4	A	B	C				
62	89	Geolocalización del río escogido	5	GPS	Río Marañón	Río Santiago	A	B	C			F	
68	101	Tamaño de la turbina	1	mm	2-4	2.5	A	B	C	D	E	F	G
69	102	Número de álabes de instalación	1	ad	3	3	A				E		
70	103	Coeficiente de potencia	1	ad	0.4-0.55	0.5	A				E		
71	104	Potencia generada por la turbina	1	kW	5-10	10	A	B	C	D	E		G
72	105	Energía generada por día	1	kWh/d	300,400,500	400	A	B	C		E	F	G
73	106	Torque generado por los álabes	1	Nm	500-1100	800	A				E		
74	107	Coeficiente de sustentación y arrastre de los álabes	1	ad	0.5-2	1.2					E		
75	108	Celeridad de diseño	1	ad	3 - 10	5 - 7	A	B			E		
76	109	Ángulo de ataque de los álabes	1	grado sexagesimal	1.5° - 10°	> 3°	A				E		
77	110	Fuerza de arrastre	1	N	2000-5000	2000	A				E		

Tabla 3.11. Valores ideales y marginales. (Fuente: Elaboración Propia).

Después de esto, se hace la descomposición de estas funciones como sub funciones en una “estructura de funciones” donde el objetivo es crear una descripción más específica de lo que los elementos del producto podrían hacer para implementar la función general del producto [26], y de esta forma, centrarse de forma más concreta en un proceso (ver figura 3.4).

2. Buscar externamente. Tiene como objetivo hallar soluciones existentes al problema general y a los subproblemas identificados en la etapa anterior. Como principal fuente de información ya no se tendrán a los usuarios (vistos al inicio de este capítulo) ni a la consulta de expertos (porque se ha tenido las comparaciones con la competencia), sino que se centrará en la búsqueda de patentes representativas que apoyarán el diseño de aquí en adelante<sup>6</sup>.

<b>Patente 1</b>	
	<p>Nombre: Horizontal -Axis Hydrokinetic Water Turbine System</p>
	<p>Número de patente: US 2013/0026762 A1 , Fecha de publicación: 31 de enero del 2013</p>
	<p>Características principales (valor agregado para generar conceptos):</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Sistema de transmisión por cadenas (del buje al tren de engranajes directamente).</li> <li>2. Sistema de anclaje y flotación por encima del nivel agua (anclaje detallado).</li> <li>3. Los álabes pueden trabajar de acuerdo a las condiciones del río, es decir, pueden meterse al agua cuando así lo requiera el sistema como también se pueden retraer al nivel por encima del agua y no trabajar (sistema sube-baja).</li> </ol>

Tabla 3.12. Patente 1. Horizontal – Axis Hydrokinetic Water Turbine System.

(Fuente: Elaboración Propia).

<sup>6</sup> Se tomarán tres patentes representativas ya que se tiene que tener en cuenta cuáles son las más atractivas para el diseño y sus exigencias, mas no por la actualidad de esta.

Patente2	
	Nombre: Hydrokinetic turbine structure and system
	Número de patente: US 2011/0058929 A1 , Fecha de publicación: 10 de marzo del 2011
	Características principales (valor agregado para generar conceptos): 1. Sistema para que haya una puesta a tierra (al nivel del suelo del río). 2. Dos etapas para el paso del fluido (una con álabes con menores dimensiones y con diferente perfil que el de la siguiente etapa). 3. Elementos de sujeción para puesta a tierra y su conexión con otras turbinas en paralelo (rodamientos, bocinas, etc.).

Tabla 3.13. Patente 2. Hydrokinetic turbine structure and system.  
(Fuente: Elaboración Propia).

Patente 3	
	Nombre: Marine Hydrokinetic Turbine
	Número de patente: US 9,476,401 B2 Fecha de publicación: 25 de octubre del 2016
	Características principales (valor agregado para generar conceptos): 1. El sistema de protección propone cerrar por completo la turbina y que el agua solo pase por el lado donde tiene que girar los álabes. 2. El sistema de anclaje no existe. La turbina tiene que estar sujeta a pegarse a la superficie del fondo profundo. 3. El sistema de transmisión y el generador están fuera del sistema de generación de energía cinética.

Tabla 3.14. Patente 3. Marine Hydrokinetic Turbine  
(Fuente: Elaboración Propia).

3. Buscar internamente. Se omitirá el paso ya que está basado en el uso de técnicas como “lluvia de ideas”, analogías, preguntas, estímulos relacionados, galerías, etc., las cuales han sido ya utilizadas como parte de la

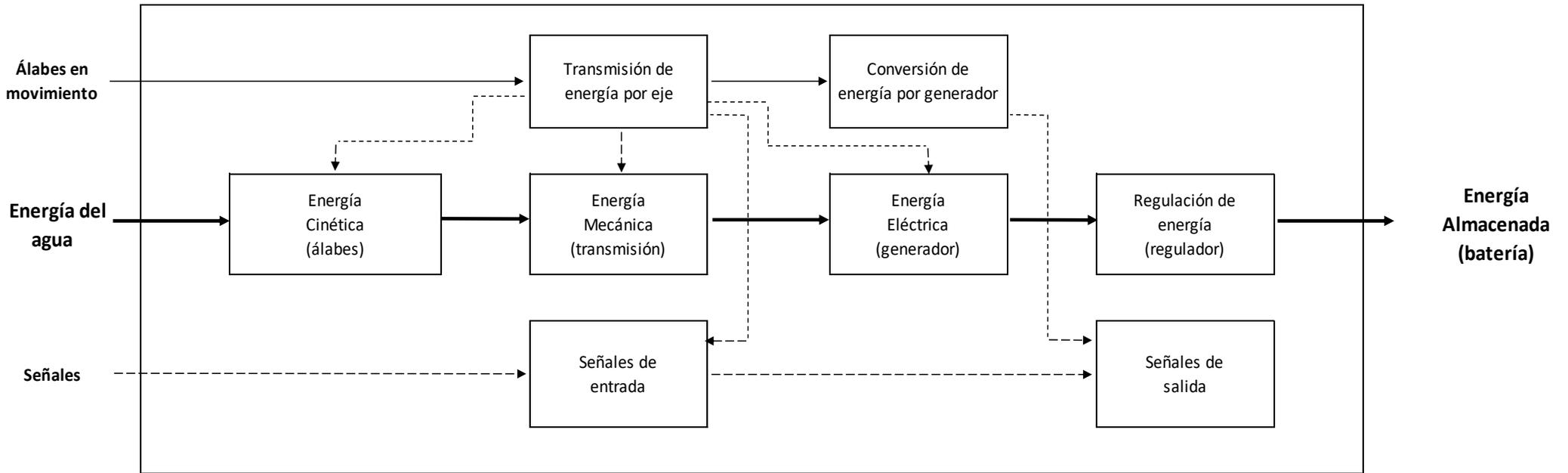
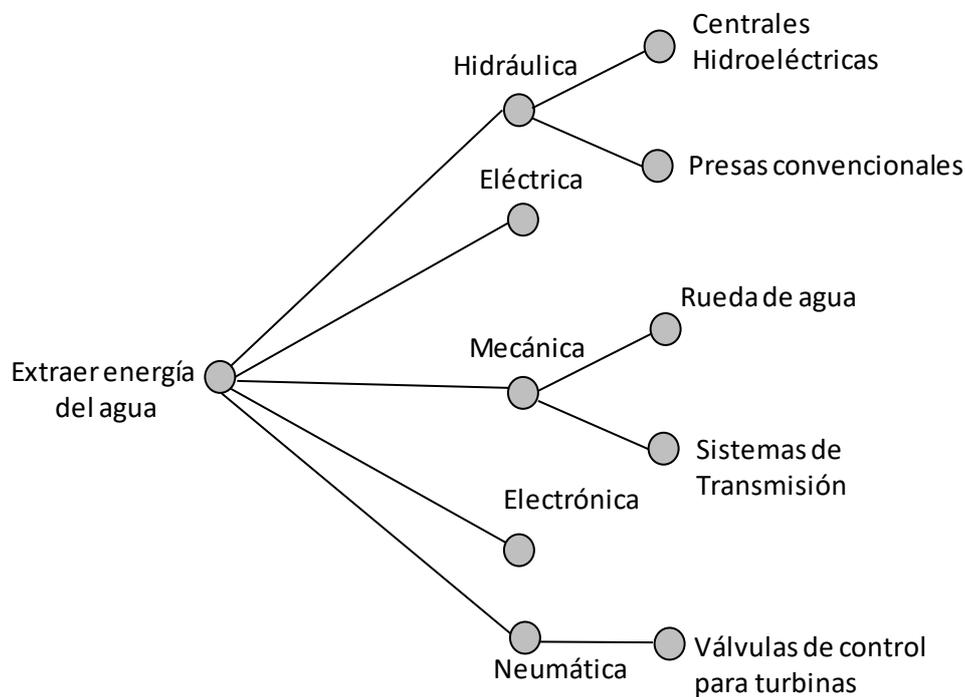


Figura 3.4. Estructura de funciones. (Fuente: Elaboración Propia).

identificación de oportunidades y necesidades en las primeras etapas de este capítulo.

4. Explorar sistemáticamente. Destinada a navegar el espacio de posibilidades que se exploró en la búsqueda externa e interna para organizar y sintetizar las soluciones planteadas a los subproblemas.

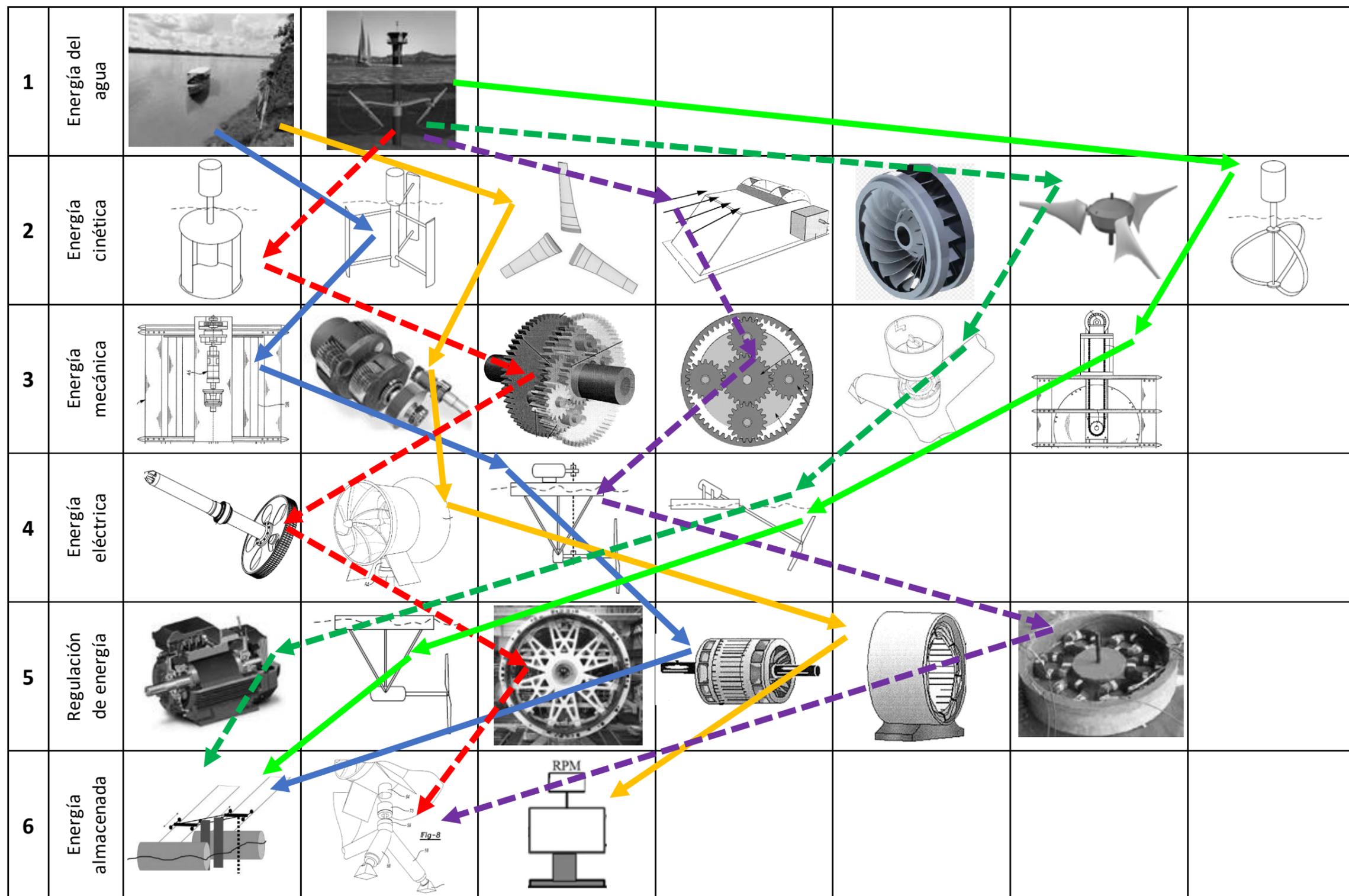
- **Árbol de clasificación de conceptos.** A diferencia del VDI 2225, este gráfico de organización no es planteado pero Ulrich lo plantea ya que facilita la comparación y eliminación de sistemas y procesos.



*Figura 3.5.* Árbol de clasificación de conceptos.

(Fuente: Elaboración Propia).

- **Tabla de combinación de conceptos.** Conocida como la matriz morfológica en la norma alemana, se busca hacer combinaciones de solución posibles de acuerdo a los fragmentos de solución planteados en las secciones anteriores. Estos conceptos de solución son los que se evaluarán después para hacer la selección de la solución más óptima.



Solución	Color
1	Red dashed arrow
2	Blue solid arrow
3	Purple dashed arrow
4	Yellow solid arrow
5	Green dashed arrow
6	Light green solid arrow

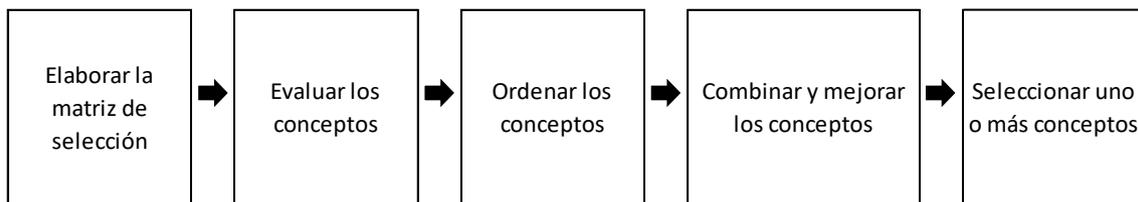
Tabla 3.15. Combinación de conceptos – Matriz morfológica  
(Fuente: Elaboración Propia).

### 3.5 Selección del concepto

Para resumir las necesidades del cliente y de los usuarios finales del proyecto, se establece siete criterios sobre los que se va a basar la selección del concepto<sup>7</sup> [27]:

- Facilidad de instalación
- Facilidad de mantenimiento
- Facilidad de transmisión de energía
- Eficiencia energética
- Facilidad de montaje y desmontaje
- Facilidad de manufactura
- Portabilidad

Se tiene cinco conceptos de solución posibles, los cuáles van a ser evaluados de acuerdo a dos etapas macro de selección: el filtrado de conceptos y la evaluación de estos. Ambas etapas cuentan con los mismos pasos para su selección y serán detallados en cada una de sus secciones:



1. Filtrado de conceptos. Tiene como fin reducir de forma rápida los conceptos de solución desarrollados en la sección anterior. Para esto, los cinco pasos citados líneas arriba se plasman a través de la matriz de filtrado de conceptos (ver tabla 3.16).
  - a. Elaborar la matriz de selección. Se tiene 6 conceptos de solución y se selecciona dos: La THC 2 Y 5.
  - b. Elaborar la evaluación de conceptos. De los dos conceptos, se escoge al final la THC 2.

---

<sup>7</sup> Estos siete criterios difieren a los recomendados por la metodología debido a que se tienen que acondicionar al diseño de la THC en una comunidad amazónica.

Criterios de Selección	Conceptos de solución					
	A THC 1	B THC 2	C THC 3	D THC 4	E THC 5	F THC 6
<b>Facilidad de instalación</b>						
Peso ligero	0	+	-	0	+	0
Estructura ergonómicamente viable	0	+	+	0	+	-
<b>Facilidad de mantenimiento</b>						
Disponibilidad de repuestos	+	+	0	0	+	0
Vida útil del equipo	-	-	0	+	+	0
<b>Facilidad de transmisión de energía</b>						
Facilidad de captación de energía con los álabes	0	0	0	+	-	0
Correcto diseño de eje, rodamientos, sellos y acoples	+	0	0	-	+	0
<b>Eficiencia energética</b>						
Eficiencia de los álabes	0	+	0	0	0	0
Cantidad de repuestos utilizados	0	+	0	0	+	0
<b>Facilidad de montaje y desmontaje</b>						
Sistema de anclaje y flotación sencillo	0	0	0	0	+	-
Se ajusta a diferentes zonas	0	-	0	+	-	+
<b>Facilidad de manufactura</b>						
Costo de materia prima	0	0	0	0	+	+
Materiales usados	0	+	0	+	+	+
<b>Portabilidad</b>						
Fácil de usar y transportar	+	+	+	0	+	+
Sistema eléctrico sencillo	+	+	0	+	0	-
<b>Otros</b>						
Resistencia de los álabes	+	0	-	-	+	0
Fácil entendimiento de uso	-	+	0	0	0	0
Suma +	5	9	2	5	11	4
Suma 0	9	5	12	9	3	9
Suma -	2	2	2	2	2	3
Evaluación neta	3	7	0	3	9	1
Calificación	3	2	6	4	1	5
¿Continúa?	<b>NO</b>	<b>SI</b>	<b>NO</b>	<b>NO</b>	<b>SI</b>	<b>NO</b>

Tabla 3.16. Matriz de filtro de conceptos. (Fuente: Elaboración Propia).

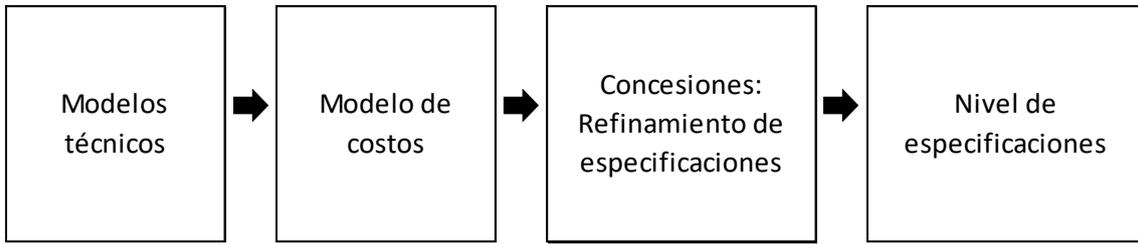
Criterios de Selección	Peso	Conceptos seleccionados			
		A THC 2		E THC 5	
		Calificación	Evaluación Ponderada	Calificación	Evaluación Ponderada
<b>Facilidad de instalación</b>	<b>10</b>				
Peso ligero	6	7	42	8	48
Estructura ergonómicamente viable	4	6	24	6	24
<b>Facilidad de mantenimiento</b>	<b>10</b>				
Disponibilidad de repuestos	5	6	30	6	30
Vida útil del equipo	5	4	20	5	25
<b>Facilidad de transmisión de energía</b>	<b>30</b>				
Facilidad de captación de energía con los álabes	18	7	126	7	126
Correcto diseño de eje, rodamientos, sellos y acoples	12	8	96	7	84
<b>Eficiencia energética</b>	<b>20</b>				
Eficiencia de los álabes	16	8	128	7	112
Cantidad de repuestos utilizados	4	5	20	6	24
<b>Facilidad de montaje y desmontaje</b>	<b>5</b>				
Sistema de anclaje y flotación sencillo	3	5	15	5	15
Se ajusta a diferentes zonas	2	7	14	8	16
<b>Facilidad de manufactura</b>	<b>10</b>				
Costo de materia prima	7	5	35	7	49
Materiales usados	3	8	24	5	15
<b>Portabilidad</b>	<b>5</b>				
Fácil de usar y transportar	3	8	24	5	15
Sistema eléctrico sencillo	2	6	12	6	12
<b>Otros</b>	<b>10</b>				
Resistencia de los álabes	3	6	18	8	24
Fácil entendimiento de uso	2	5	10	7	14
<b>Total de puntos</b>			<b>638</b>		<b>633</b>
<b>Lugar</b>			<b>1</b>		<b>2</b>
<b>¿Continuar?</b>			<b>SI</b>		<b>NO</b>

Tabla 3.17. Matriz de evaluación de conceptos.

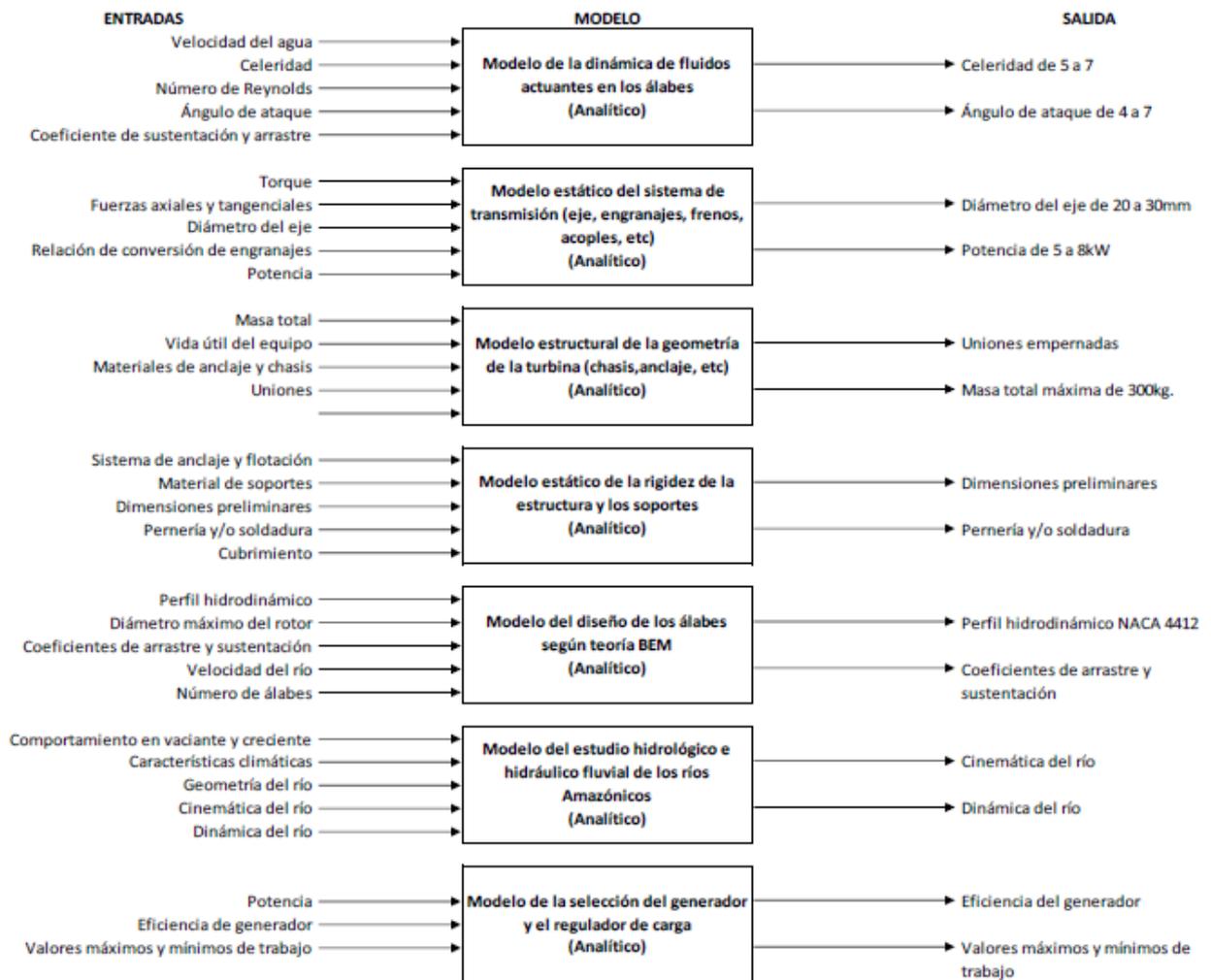
(Fuente: Elaboración Propia).

### 3.6 Especificaciones finales

Se establece el siguiente proceso:



1. Modelos técnicos. Se prioriza doce modelos de los veinte planteados inicialmente (Ver anexo 3.5) donde las entradas son en su mayoría las métricas planteadas en el punto 3.3 y sus salidas los valores cualitativos y cuantitativos de estas métricas.



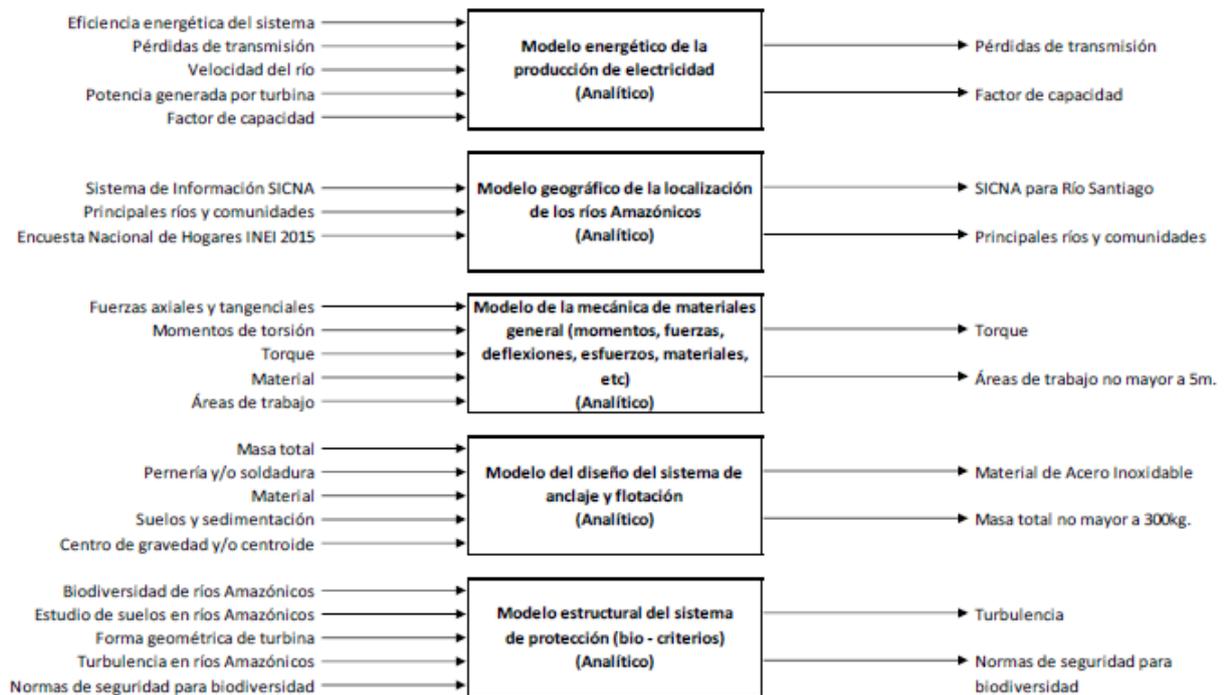


Figura 3.6. Modelos técnicos de la THC.

(Fuente: Elaboración Propia).

2. Modelo de costos. Dado que no se intervendrá en los costos de ensamble ni manufactura, se tiene como objetivo hacer una lista de materiales de los componentes principales que se espera necesitar en el diseño del álabe. Cada componente tiene una cantidad y costo unitario, por lo que, en suma se tendrá un costo aproximado primario y es tomado como primer modelo (Ver tabla 3.18).
3. Refinamiento de especificaciones. Una vez construido el modelo preliminar de costo, esto ayuda a filtrar las especificaciones que realmente serán necesarias para el diseño. Es por eso, que una forma de hacer un refinamiento es comparar el modelo preliminar del punto 2 para someterlo a la competencia y desarrollar un “trade off” de los costos estimados iniciales con respecto a los valores ideales y marginales planteados en la sección 3.3.

Como lo menciona la metodología, el uso de los modelos técnicos y de costos, junto con el “trade off” ayudan a refinar las especificaciones para satisfacer las restricciones inherentes del concepto del producto y hacer

concesiones de forma que dará una ventaja de rendimiento con respecto a los productos de la competencia.

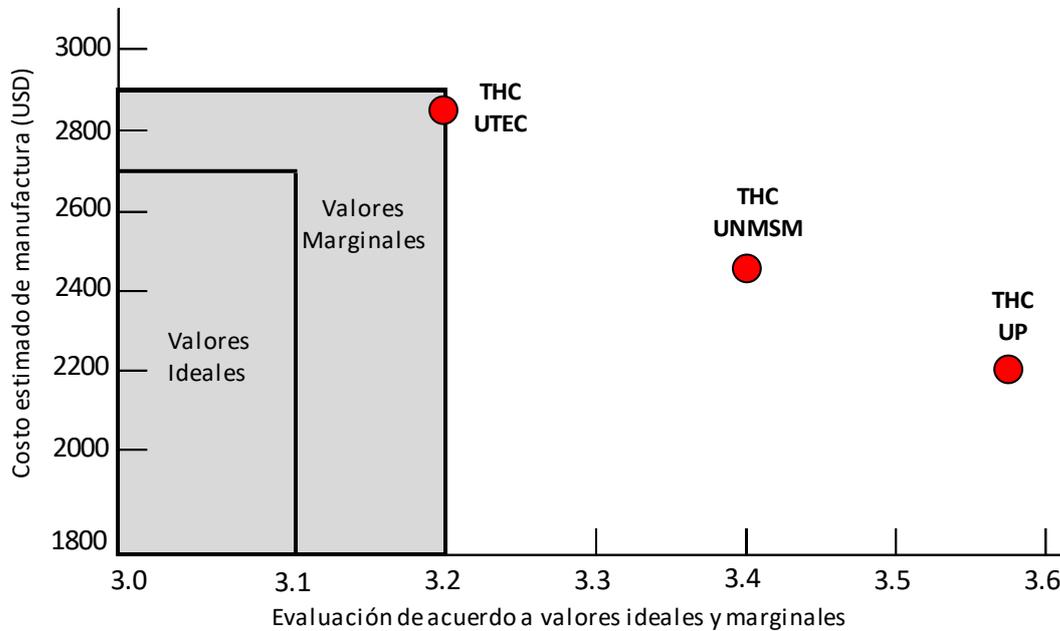


Figura 3.7. Comparación de propuesta mediante el “trade off”.

(Fuente: Elaboración Propia)

4. Nivel de especificaciones. Dado que el diseño de la THC es el desarrollo de un producto formado por subsistemas como los álabes, sistema de transmisión, generador, etc., las especificaciones para cierto subsistema es diferente para otro, por lo que, se establece que de las 25 especificaciones principales trabajadas, se englobará un total de 37 para así poder tener un conjunto de métricas y valores más exactos para cada componente.

Las especificaciones finales para el diseño de la turbina hidrocínética se ven en la tabla 3.19.

Componente	Cantidad	Unidad	Alto \$ c/u	Bajo \$ c/u	Total Alto \$ c/u	Total Bajo \$ c/u
<b>Rotor axial</b>						
Álabes de fibra de vidrio y resina	3	Pza	100	70	300	210
Platos de sujeción en acero inoxidable	3	Pza	20	10	60	30
Pernos para sujeción de 1/2"	12	pulgadas	3	1.7	36	20.4
<b>Sistema de transmisión</b>						
Eje de transmisión	1	Pza	35	20	35	20
Tubos de acero galvanizado de 1"	2	m	8	5	16	10
Tubos de acero galvanizado de 2"	2	m	10	7	20	14
Acoples	2	Pza	35	20	70	40
Rodamientos	4	Pza	23	15	92	60
Engranajes	4	Pza	75	50	300	200
Sellos, retenes, válvulas	8	Pza	30	20	240	160
<b>Generador</b>						
Generador de imanes permanentes	1	Pza	450	300	450	300
Tablero electrónico de control	1	Pza	300	200	300	200
Regulador de carga	1	Pza	140	100	140	100
<b>Anclaje y estructura</b>						
Balsa flotante de madera y metal	1	Pza	900	800	900	800
Postes de acero para fijación del equipo	4	Pza	120	80	480	320
Codos, estuben, pegas, ángulos	10	m	60	40	600	400
<b>Total (USD)</b>					<b>4039.00</b>	<b>2884.40</b>

*Tabla 3.18. Modelo de costos para el producto.*

(Fuente: Elaboración Propia).

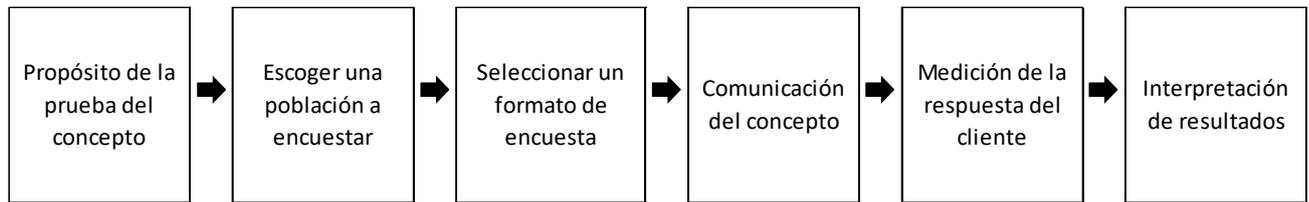
Núm.	Métrica	Unidades	Valor
1	<i>Masa total</i>	<b>kg</b>	3000
2	<i>Diámetro máximo del rotor</i>	<b>m</b>	3
3	<i>Área de captación del agua (barrido) máximo</i>	<b>m2</b>	7.5
4	<i>Materiales de uso de los álabes y el buje.</i>	<b>Lista</b>	Acero inoxidable
5	<i>Fuerzas axiales y tangenciales de los álabes</i>	<b>kN</b>	Axial: 40, Tangencial: 5
6	<i>Velocidad de giro del rotor</i>	<b>min<sup>-1</sup></b>	25
7	<i>Diámetro máximo del eje principal</i>	<b>cm</b>	7.5
8	<i>Bio - criterios para dimensionar el sistema de protección</i>	<b>Lista</b>	Anti residuos
9	<i>Material de la estructura, soportes y cubrimiento (carcasa)</i>	<b>Lista</b>	Acero inoxidable
10	<i>Componentes de diseño y selección (primarios y secundarios)</i>	<b>Lista</b>	Anexo 3.6
1	<i>Esfuerzos de contacto, por tensión y/o flexión máximos</i>	<b>Mpa</b>	40
12	<i>Factor de seguridad y de confiabilidad del diseño</i>	<b>ad</b>	2.5
13	<i>Costos de materia prima</i>	<b>USD</b>	2885
14	<i>Profundidad mínima útil</i>	<b>m</b>	4
15	<i>Geolocalización del río escogido</i>	<b>GPS</b>	Río Santiago
16	<i>Tamaño de la turbina</i>	<b>mm</b>	3000
17	<i>Número de álabes de instalación</i>	<b>ad</b>	3
18	<i>Coeficiente de potencia</i>	<b>ad</b>	0.50
19	<i>Potencia generada por la turbina</i>	<b>kW</b>	5
20	<i>Energía generada por día</i>	<b>kWh/d</b>	8.5
21	<i>Torque generado por los álabes</i>	<b>Nm</b>	100
22	<i>Coeficiente de sustentación y arrastre de los álabes</i>	<b>ad</b>	1.101
23	<i>Celeridad de diseño</i>	<b>ad</b>	4
24	<i>Ángulo de ataque de los álabes</i>	<b>grado sexagesimal</b>	4
25	<i>Fuerza de arrastre</i>	<b>kN</b>	2

*Tabla 3.19.* Especificaciones finales del producto.

(Fuente: Elaboración Propia).

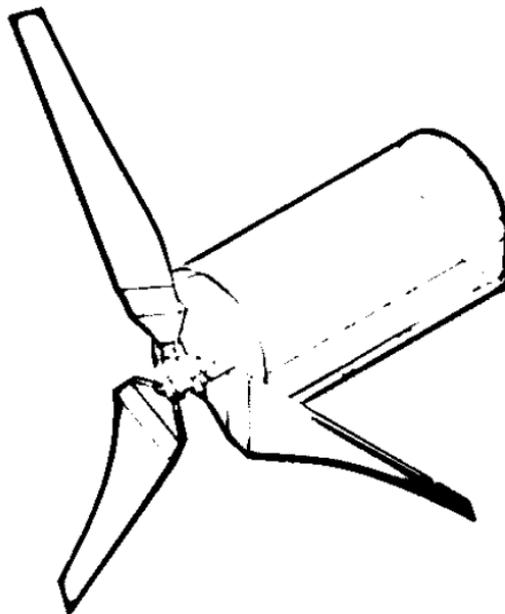
### 3.7 Prueba del concepto

Se establece el siguiente proceso:



Debido a que esta sección engloba actividades netamente experimentales, es decir, que se hacen en campo y que necesitan del apoyo de muchas personas para que puedan dar resultado, el presente trabajo se enfocará sólo en el cuarto punto: comunicación del concepto.

1. Comunicación del concepto. La selección del concepto final realizada en la sección anterior debe ser comunicada a los usuarios que van a beneficiarse del producto a través de descripciones verbales, bosquejos, fotos e ilustraciones, imágenes en secuencia, videos y simulaciones. Por lo tanto, se presentará el bosquejo del concepto de solución escogido en la figura 3.8<sup>8</sup> ya que los videos y simulaciones finales serán presentados una vez terminado el diseño a detalle.



*Figura 3.8.* Bosquejo final de la THC.

(Fuente: Elaboración Propia)

---

<sup>8</sup> Los bosquejos de todos los conceptos de solución planteados se pueden ver en el Anexo 3.6.

# CAPÍTULO IV

## TEORÍA BEM

La idea de producir energía aprovechando solo la velocidad del agua es lo que distingue a la energía hidrocínética respecto a la energía hidráulica convencional ya que esta última usa a la presión del agua y a la energía potencial como principales parámetros. Para saber cómo es que solo la velocidad viene a ser el parámetro principal en el diseño de una turbina, se necesita saber cuál es la base matemática que explica los fenómenos físicos de este aprovechamiento del agua.

Este capítulo describe la teoría principal de la turbina hidrocínética a diseñar, basados en diferentes teorías como la del disco actuador, momento angular y la del elemento del álabe sin necesidad de tener el diseño concebido. Al contrario, este es el primer paso para poder desarrollar el concepto escogido en el capítulo anterior, por lo que, se tiene como objetivo saber cómo es que los álabes del rotor de la turbina extraen la energía del agua.

### 4.1 Modelo del Disco Actuador

Es también llamado la “teoría del momento unidimensional” porque está basada en la teoría del momento lineal que es desarrollada desde hace cien años para predecir el rendimiento de las hélices de los buques y para otras aplicaciones tanto aerodinámicas como aeronáuticas. Esta teoría describe a una turbina que se sustituye por un disco circular a través de un control de volumen con las siguientes limitaciones:

- Un número infinito de álabes
- Ningún arrastre de fricción
- Fluido homogéneo, incompresible y en estado estacionario.
- Empuje uniforme sobre el disco o el área del rotor.
- Efecto de rotación nula

- La presión estática tanto arriba como abajo del rotor es igual a la presión estática del ambiente inalterada.

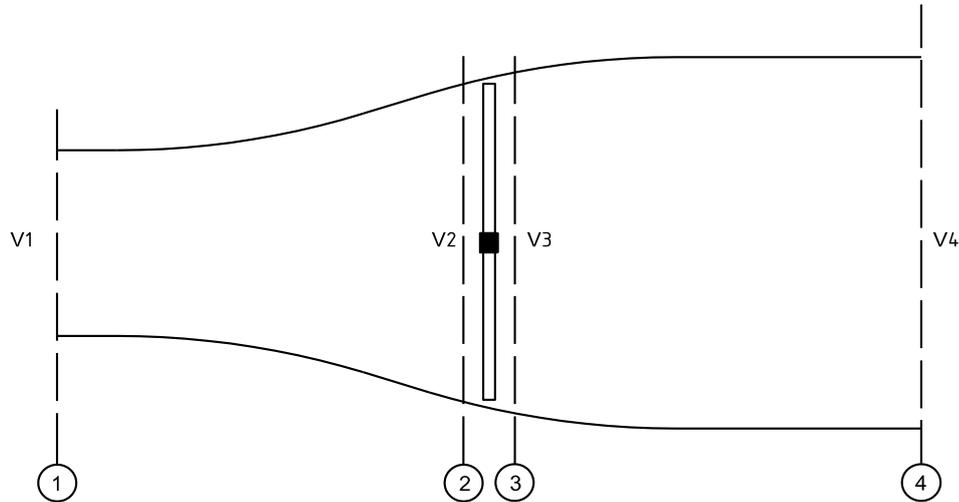


Figura 4.1. Control de volumen para el modelo de disco actuador.

(Fuente: Elaboración Propia)

Los límites en el control de volumen son las paredes superficiales de un tubo de corriente y dos secciones transversales. Esta tiene cuatro etapas principales: región de la corriente libre (1), región justo antes del rotor (2), región justo después del rotor (3) y la región de la estela (4). Para esto, se tiene en cuenta las siguientes consideraciones:

Continuidad a lo largo del tubo de corriente:

$$\rho A_1 V_1 = \rho A_R V_R = \rho A_4 V_4 \quad (4.1)$$

Donde:

*A*: Área en cada etapa

*V*: Velocidad en cada etapa

Asumiendo que hay continuidad a través del disco:

$$V_2 = V_3 = V_R \quad (4.2)$$

Esto es porque no hay fricción, ni trabajo o transferencia de energía. Entonces, el planteamiento de Bernoulli puede ser tomado en cuenta para que se aplique la conservación de la energía [28]:

Etapas 1 y 2:

$$p_d + \frac{1}{2}\rho V_1^2 = p_u + \frac{1}{2}\rho V_R^2 \quad (4.3)$$

Etapas 3 y 4:

$$p_d + \frac{1}{2}\rho V_R^2 = p_u + \frac{1}{2}\rho V_4^2 \quad (4.4)$$

Combinando ecuaciones 4.3 y 4.4:

$$\begin{aligned} p_u - p_d &= p_o + \frac{1}{2}\rho V_1^2 - \frac{1}{2}\rho V_R^2 - (p_o + \frac{1}{2}\rho V_4^2 - \frac{1}{2}\rho V_R^2) \\ p_u - p_d &= p_o + \frac{1}{2}\rho V_1^2 - \frac{1}{2}\rho V_R^2 - p_o - \frac{1}{2}\rho V_4^2 + \frac{1}{2}\rho V_R^2 \\ p_u - p_d &= \frac{1}{2}\rho(V_1^2 - V_4^2) \end{aligned}$$

Se define un nuevo símbolo para la diferencia de presiones:

$$p' = p_u - p_d \quad (4.5)$$

Entonces se tiene:

$$p' = \frac{1}{2}\rho(V_1^2 - V_4^2) \quad (4.6)$$

También, la fuerza de empuje en el disco actuador puede ser expresado como la suma de las fuerzas en cada lado de las cuatro etapas:

$$T = A_R p' \quad (4.7)$$

Reemplazando ecuación 4.6 en la 4.7, se tiene:

$$T = \frac{1}{2}A_R\rho(V_1^2 - V_4^2) \quad (4.8)$$

De acuerdo a la teoría del momento lineal:

$$\sum F = \frac{dP}{dt} \quad (4.9)$$

$$\sum F = \frac{\Delta m V}{dt} \quad (4.10)$$

F representa la fuerza de empuje resuelta en la ecuación 4.8, entonces:

$$T = -\dot{m}(V_4 - V_1)$$

$$T = \dot{m}(V_1 - V_4) \quad (4.11)$$

El valor del flujo de masa para fluidos en estado estacionario es obtenido por la teoría de la mecánica de fluidos:

$$\dot{m} = \rho A_R V_R \quad (4.12)$$

Entonces, el comportamiento para la velocidad del rotor  $V_R$  es la combinación de las ecuaciones 4.8, 4.11 y 4.12:

$$\dot{m}(V_1 - V_4) = \frac{1}{2} A_R \rho (V_1^2 - V_4^2)$$

$$\rho A_R V_R (V_1 - V_4) = \frac{1}{2} A_R \rho (V_1^2 - V_4^2)$$

$$V_R = \frac{1}{2} \frac{V_1^2 - V_4^2}{V_1 - V_4}$$

$$V_R = \frac{V_1 + V_4}{2} \quad (4.13)$$

Por lo tanto, la velocidad del rotor es la velocidad principal entre la velocidad del río  $V_1$  y la velocidad final (la que viene después de la estela  $V_4$ ).

#### 4.1.1 Factor de inducción axial

Se define al factor de inducción axial como la disminución o la pérdida en la velocidad del agua a medida que se acerca a los álabes del rotor:

$$a = \frac{V_1 - V_R}{V_1} \quad (4.14)$$

$$a = 1 - \frac{V_R}{V_1}$$

Para esta relación,  $V_R$  y  $V_4$  pueden ser obtenidas en función de este factor como:

$$\begin{aligned}
-V_R &= aV_1 - V_1 \\
V_R &= V_1 - aV_1 \\
V_R &= V_1(1 - a)
\end{aligned} \tag{4.15}$$

Sustituyendo la ecuación 4.13 en la 4.15:

$$\begin{aligned}
V_1(1 - a) &= \frac{V_1 + V_4}{2} \\
2V_1(1 - a) &= V_1 + V_4 \\
V_4 &= 2V_1(1 - a) - V_1 \\
V_4 &= V_1(1 - 2a)
\end{aligned} \tag{4.16}$$

Además, se sabe que la potencia de salida es la fuerza de empuje multiplicada por la velocidad del rotor:

$$P = TV_R \tag{4.17}$$

Reemplazándolo de acuerdo a la ecuación 4.8, tenemos:

$$P = \frac{1}{2} A_R \rho (V_1^2 - V_4^2) V_R$$

Sustituyendo las velocidades de las ecuaciones 4.15 y 4.16:

$$\begin{aligned}
P &= \frac{1}{2} A_R \rho (V_1^2 - (V_1(1 - 2a))^2) V_1(1 - a) \\
P &= \frac{1}{2} A_R \rho (V_1^2 - 4V_1^2 a + 4V_1^2 a^2) V_1(1 - a) \\
P &= 2A_R \rho V_1^2 (aV_1 - a^2V_1 - a^2V_1 + a^3V_1) \\
P &= 2A_R \rho V_1^3 a(1 - a - a + a^2) \\
P &= 2A_R \rho V_1^3 a(1 - a)^2
\end{aligned} \tag{4.18}$$

De igual forma que las velocidades fueron expresados en función del factor “a”, se puede expresar a la fuerza de empuje como:

$$T = \frac{1}{2} A_R \rho (V_1^2 - (V_1(1 - 2a))^2)$$

$$\begin{aligned}
T &= \frac{1}{2} A_R \rho (V_1^2 - (V_1^2 - 4aV_1^2 + 4a^2V_1^2)) \\
T &= \frac{1}{2} A_R \rho (4aV_1^2 - 4a^2V_1^2) \\
T &= \frac{1}{2} A_R \rho 4aV_1^2 (1 - a) \\
T &= 2A_R \rho V_1^2 a(1 - a) \tag{4.19}
\end{aligned}$$

#### 4.1.2 Coeficiente de Potencia $C_p$

El rendimiento del rotor de la turbina hidrocínética es usualmente caracterizada por el coeficiente de potencia  $C_p$ , que es representada por la fracción de la potencia del agua extraída por el rotor:

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho A_R V_1^3} = \frac{2P}{\rho A_R V_1^3}$$

Reemplazando esto de acuerdo a la ecuación 4.18:

$$\begin{aligned}
C_p &= \frac{2A_R \rho V_1^3 a(1 - a)^2}{\frac{1}{2} \rho A_R V_1^3} \\
C_p &= 4a(1 - a)^2 \tag{4.20}
\end{aligned}$$

El máximo valor del coeficiente  $C_p$  es determinado resolviendo la derivada de este coeficiente respecto al factor “a”, por lo que, ajustándolo a cero tenemos:

$$\frac{dC_p}{da} = 4(1 - a)(1 - 3a)$$

Para un coeficiente de potencia máximo ( $C_{p,max}$ ), “a” resulta igual a 1/3 lo cual representa que el flujo a través del disco corresponde a un volumen de corriente con una área seccionada (transversalmente) en la parte superior igual a 2/3 el área del disco total, lo que resulta que el área en la parte baja se duplique. Es por esto, que se estaría operando en el punto de mayor producción de potencia [29].

$$C_{p,max} = \frac{16}{27} = 0.5926 \tag{4.21}$$

### 4.1.3 Coeficiente de empuje

Este coeficiente se tiene en cuenta debido al empuje que se genera del movimiento. Así, al igual que el coeficiente de potencia, la ecuación 4.19 da:

$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2}\rho A_R V_1^2} = \frac{2T}{\rho A_R V_1^2}$$

Resulta:

$$C_T = \frac{2A_R\rho V_1^2 a(1-a)}{\frac{1}{2}\rho A_R V_1^3}$$

$$C_T = 4a(1-a) \quad (4.22)$$

Para un coeficiente de empuje máximo, se tendría que “a” es igual a uno y esto es demostrado de acuerdo a la variación de este parámetro de acuerdo a los anteriores mencionados. Además, una forma de poder expresar cuál sería el funcionamiento ideal de una turbina como estas es expresándola en base a los coeficientes de potencia y empuje. A estos límites se les llama “Límite de Betz” [29] y son representados en la figura 4.2:

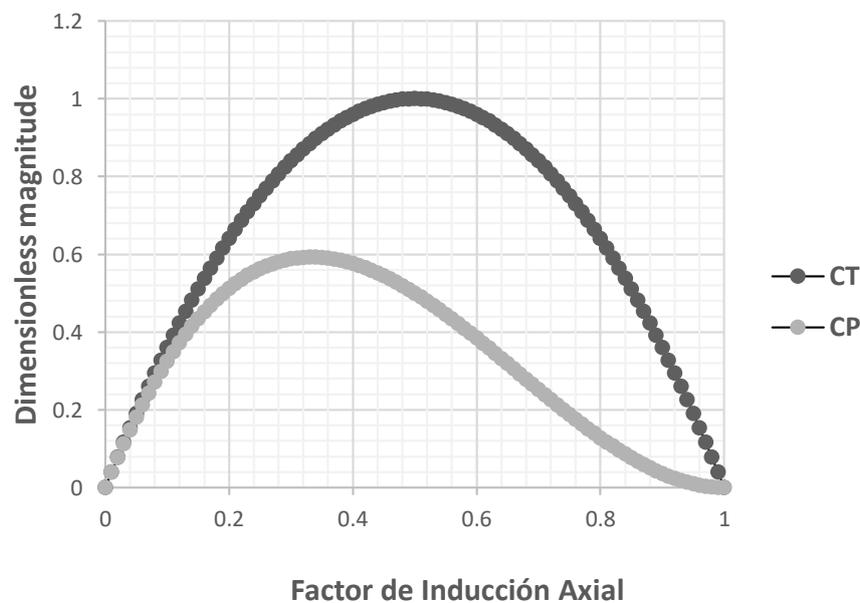


Figura 4.2. Coeficientes de potencia y empuje para turbina ideal (Límite de Betz)

(Fuente: Elaboración Propia)

## 4.2 Teoría del Momento Angular considerando el efecto de rotación.

Al igual que el control de volumen estudiado para determinar las velocidades, fuerzas y principalmente los factores y coeficientes; en esta ocasión se hará el mismo estudio considerando al factor de inducción axial y el efecto de rotación. Para esto, inicialmente tenemos:

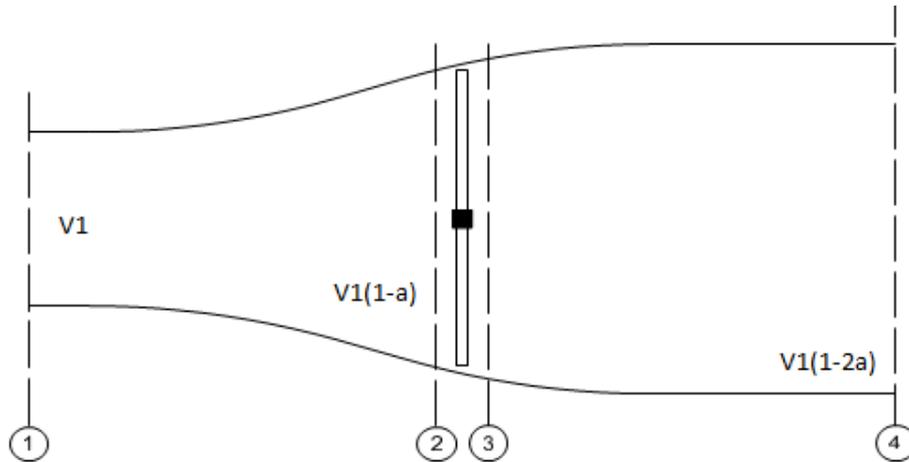


Figura 4.3. Control de volumen considerando el factor de inducción axial.

(Fuente: Elaboración Propia)

De acuerdo a la teoría del momento angular, hay determinadas ecuaciones a tener en cuenta relacionadas a la figura X. Uno de estos es que el momento angular instantáneo de una partícula es relacionada al punto de origen O como el producto vectorial de su posición instantánea por el momento lineal instantáneo [30].

$$L = mrV_{tang} \quad (4.23)$$

$$L = mr^2 \frac{V_{tang}}{r}$$

Considerando:  $\omega$ : Velocidad rotacional de la estela

$$\omega = \frac{V_{tang}}{r}$$

Entonces, continuando con el desarrollo de la ecuación 4.23:

$$L = mr^2 \omega = I\omega$$

Donde "I" representa el momento de inercia.

Después de esto, se puede interpretar la expresión del torque en el rotor con esta teoría. El torque debe ser igual al cambio en el momento angular de la rotación:

$$Q = \frac{dL}{dt} = I \frac{d\omega}{dt} = mr^2 \frac{\omega}{t}$$

Al ser un disco, su área viene a ser:

$$A = 2\pi r dr \quad (4.24)$$

Por lo tanto, reemplazando la ecuación 4.24 en la variación de “Q”:

$$dQ = \frac{dm}{dt} \omega r^2$$

$$dQ = q_m(\omega r^2)$$

$$dQ = q_v \rho(\omega r^2)$$

$$dQ = AV_R \rho(\omega r^2)$$

$$dQ = (2\pi r dr) V_R \rho(\omega r^2)$$

$$dQ = V_R \rho(2\pi r dr)(\omega r^2) \quad (4.25)$$

#### 4.2.1 Factor de inducción tangencial:

Para representar el aumento de la velocidad tangencial que el álabe experimenta debido a la rotación, existe el factor de inducción tangencial. Este es representado de la siguiente manera:

$$a' = \frac{\omega}{2\Omega} \quad (4.26)$$

Donde “Ω” es la velocidad angular del rotor.

De acuerdo a esto, el torque puede ser tomado en función de a'. Entonces, combinando las ecuaciones 4.15 y 4.25:

$$dQ = 4a'(1-a) \frac{1}{2} \rho V_1 \Omega r^2 (2\pi r dr)$$

$$dQ = 4a'(1-a) \rho V_1 \Omega r^3 \pi dr \quad (4.27)$$

Al igual que el torque, hay un diferencial para la fuerza de empuje en la turbina hidrocínética:

$$dT = \dot{m}\Delta V$$

Con variación en el tiempo:

$$dT = q_m \Delta V \quad (4.28)$$

$$dT = AV_R \rho \Delta V$$

Donde:

$$\Delta V = V_1 - V_4 \quad (4.29)$$

Combinando las ecuaciones 4.15, 4.16, 4.24 y 4.29, tenemos:

$$dT = (2\pi r dr)(V_1(1 - a))\rho(V_1 - V_1(1 - 2a)) \quad (4.30)$$

$$dT = 4a'(1 + a')\rho\Omega^2\pi r^3 dr \quad (4.31)$$

La relación entre la velocidad tangencial y la velocidad del río es identificada a través del TSR (del inglés Tip Speed Ratio):

$$\lambda = \frac{\textit{Tangential velocity}}{\textit{River velocity}} = \frac{\Omega r}{V_1} \quad (4.32)$$

Además, se tendrá un TSR local:

$$\lambda_r = \frac{\textit{Tangential velocity}}{\textit{River velocity}} = \frac{\Omega r_b}{V_1}$$

$$\lambda_r = \frac{\Omega r}{V_1} = \frac{\lambda r_b}{R} \quad (4.33)$$

Combinando las ecuaciones 4.30 y 4.31 para tener una relación entre los factores de inducción y el TSR, tenemos:

$$\frac{a(1 - a)}{a'(1 + a')} = \frac{\Omega^2 r^2}{V_1^2} \quad (4.34)$$

$$\frac{a(1 - a)}{a'(1 + a')} = \lambda_r^2 \quad (4.35)$$

Hasta este punto, tenemos tres importantes consideraciones respecto a las teorías presentadas:

- La geometría del álabe aún no está siendo considerada en ninguno de los parámetros presentados hasta ahora.
- Para obtener una potencia máxima es necesario hallar  $a$  y  $a'$  en cada sección del álabe.
- Una vez que  $a$  y  $a'$  son encontrados, la fuerza de empuje y el torque del rotor pueden ser hallados integrando todos estos resultados en cada sección a lo largo de la longitud del álabe.

La potencia generada en cada elemento del álabe (cada sección) es dada por el torque multiplicado por la velocidad angular del rotor como lo presenta la ecuación 4.36:

$$dP = \Omega dQ \quad (4.36)$$

$$dP = \frac{1}{2} \rho AV_1^3 \left[ \frac{8}{\lambda^2} a' (1 - a) \lambda_r^3 d\lambda_r \right] \quad (4.37)$$

En la ecuación 32.15 se puede notar que la potencia en cualquiera de las secciones del álabe está en función de los factores de inducción axial y tangencial junto con el TSR (Tip Speed Ratio). Los primeros dos determinan la magnitud y dirección del perfil hidrodinámico en el plano del rotor.

De igual modo, el coeficiente de potencia cambia de acuerdo a cada sección del álabe:

$$dC_p = \frac{dP}{\frac{1}{2} \rho AV_1^3}$$

$$dC_p = \frac{\frac{1}{2} \rho AV_1^3 \left[ \frac{8}{\lambda^2} a' (1 - a) \lambda_r^3 d\lambda_r \right]}{\frac{1}{2} \rho AV_1^3}$$

$$dC_p = \frac{8}{\lambda^2} \int_0^\lambda a' (1 - a) \lambda_r^3 d\lambda_r \quad (4.38)$$

Para hacer la resolución de la ecuación anterior, es necesario relacionar  $a$  y  $a'$  con el TSR local, por lo que resolviendo la ecuación 4.35 para expresar  $a'$  en términos de  $a$ , tenemos:

$$a' = -\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{1 + \frac{4}{\lambda_r^2} a(1 - a)} \quad (4.39)$$

En suma, poniendo esto en la ecuación 4.38 para determinar la producción de potencia máxima posible y ajustando esta derivada respecto a “a” e igualándola a cero se obtiene:

$$a' = -\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{1 + \frac{4}{\lambda_r^2} a(1-a)} \quad (4.40)$$

$$\lambda_r^2 = \frac{(1-a)(4a-1)^2}{(1-3a)} \quad (4.41)$$

Sustituyendo esto en la ecuación 4.35, a' está en función de a:

$$a' = \frac{(1-3a)}{(4a-1)} \quad (4.42)$$

$C_{P,max}$  puede ser obtenido cuando a' (1-a) de la ecuación 4.38 es máximo:

$$C_{P,max} = \frac{24}{\lambda^2} \int_{a_1}^{a_2} \left[ \frac{(1-a)(1-2a)(1-4a)}{(1-3a)} \right]^2 da \quad (4.43)$$

Donde:

- $a_1$  es el factor de inducción axial cuando el TSR local es 0.
- $a_2$  es el factor de inducción axial cuando el TSR local es igual al TSR general.

### 4.3 Análisis geométrico del álabe

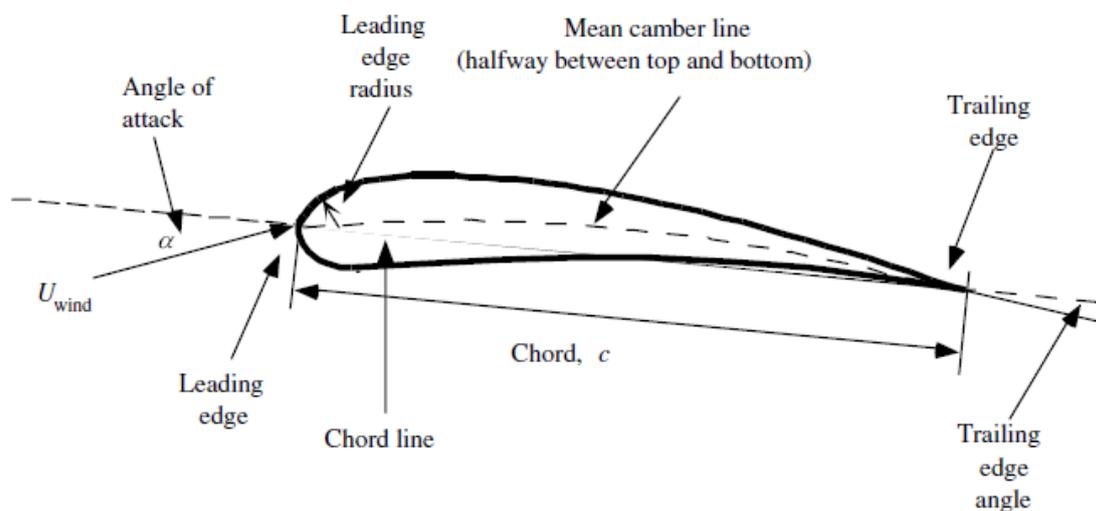
Los álabes de las turbinas hidrocínicas usan los perfiles hidrodinámicos para desarrollar la potencia mecánica que es obtenida de la energía cinética de los ríos. Por lo tanto, existen ciertos parámetros para tener en cuenta como el largo y ancho del álabe, ya que estos están en función de los perfiles hidrodinámicos usados. Estos perfiles son similares a los perfiles aerodinámicos utilizados para las turbinas eólicas, por lo que, NACA (National Advisory Committee for Aeronautics) es la institución más importante en determinar perfiles estándar que son usados en tecnologías eólicas y aeronáuticas.

#### 4.3.1 Terminología de perfiles

- Línea media (Mean camber line): La posición de puntos medios entre las superficie inferior y superior del perfil.

- Línea de cuerda (Chord line): Línea recta que une los bordes principales y finales del perfil.
- Cuerda (Chord): La distancia del borde inicial al final medido a lo largo de la línea de cuerda (figura 4.4).
- Ángulo de ataque: Definido como el ángulo entra la dirección de la velocidad relativa del agua y la línea de cuerda.

Los demás parámetros como el grosor y la distribución de bordes a lo largo del perfil son dados por los perfiles estandarizados.



*Figura 4.4.* Terminología de la geometría de un perfil hidrodinámico.

(Fuente: Diseño y construcción de una mini turbina eólica. Universidad Politécnica de Madrid, 2014)

Antes de desarrollar el comportamiento de las fuerzas y diferentes coeficientes presentes en los perfiles hidrodinámicos, es mejor entender los fenómenos físicos a los que estos están sometidos en un trabajo como el de las THC.

- Fluidos externos

De acuerdo a la teoría de la resistencia hidrodinámica, es preferible trabajar con el que tiene menor resistencia [31]:

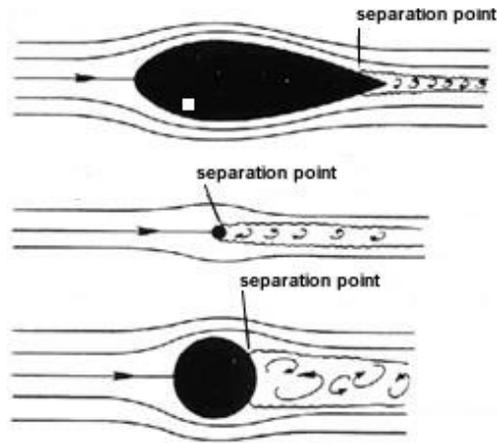


Figura 4.5. Comportamiento del fluido de acuerdo al perfil de uso.

(Fuente: Diseño y construcción de una mini turbina eólica. Universidad Politécnica de Madrid, 2014)

- Tipos de fluidos:

La figura x refleja el comportamiento del fluido cuando este pasa a través del perfil:

- Laminar: Predecible, en capas y este trabaja con modelos exclusivamente lineales.
- Turbulento: Comportamiento aleatorio, impredecible y trabaja con todo tipo de modelos, especialmente con los no lineales.

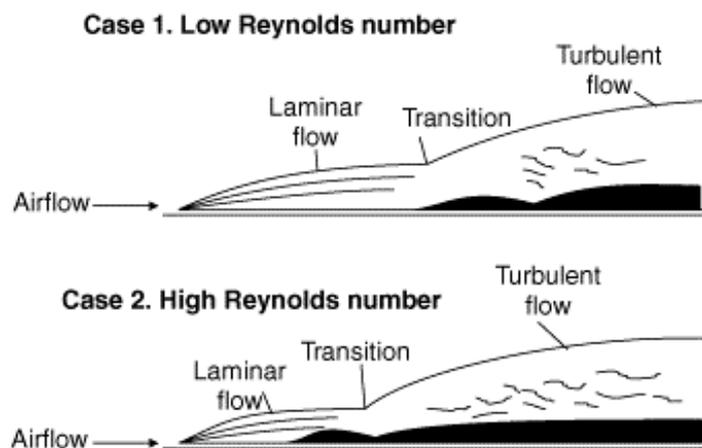


Figura 4.6. Tipos de fluidos y su comportamiento con el número de Reynolds.

(Fuente: Diseño y construcción de una mini turbina eólica. Universidad Politécnica de Madrid, 2014)

- Capa límite:

Son las fuerzas de fricción generadas por los fluidos viscosos que se adhieren a la superficie de los álabes.

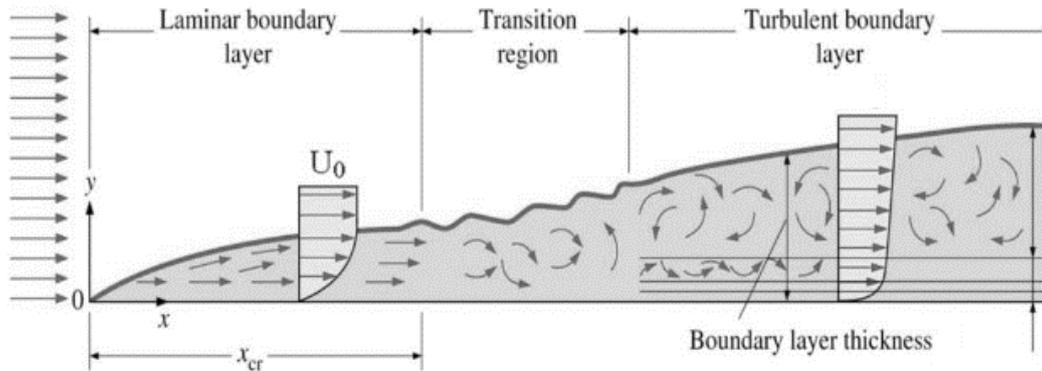


Figura 4.7. Capa límite de acuerdo al tipo de fluido.

(Fuente: Aerodinámica de perfiles, Instituto Universitario Aeronáutico de Argentina).

- Gradiente de presión:

Es el cambio de presión en la dirección del fluido. Puede ser favorable cuando la presión baja está en la dirección del fluido y es adversa cuando una alta presión está en la dirección del fluido. Además, se debe considerar que el objetivo principal de los perfiles hidrodinámicos es reducir el gradiente de presión que es adverso ya que retrasa la generación de capas límite y reduce la fricción de la presión.

- Número de Reynolds

La teoría de la Mecánica de Fluidos demostró que hay parámetros no dimensionales que definen algunas características del comportamiento del fluido y uno de los más importantes es el número de Reynolds. Se define por:

$$Re = \frac{\rho V L_b}{\mu} = \frac{V L_b}{\nu} = \frac{V c}{\nu} \quad (4.44)$$

Donde:

$\rho$  es la densidad del agua,  $\mu$  es la viscosidad del fluido,  $L_b$  es la longitud del álabes y  $V$  representa la velocidad del álabes. De igual modo, para cierta sección



Velocidades:

$$V_{relat} = \frac{V_1(1 - a)}{\text{sen}\phi} \quad (4.47)$$

Para obtener la velocidad tangencial, el comportamiento del álabe combinando las ecuaciones 4.26 en la de la velocidad angular, sería:

$$V_{tang} = \Omega r + \left(\frac{\omega}{2}\right)r = \Omega r + \left(\frac{2a'\Omega}{2}\right)r$$

$$V_{tang} = \Omega r(1 + a') \quad (4.48)$$

$$V_{relat}^2 = V_R^2 + V_{tang}^2 \quad (4.49)$$

Fuerzas y coeficientes:

$$F_L = \frac{1}{2}\rho AV_{relat}^2 C_L \quad (4.50)$$

$$F_D = \frac{1}{2}\rho AV_{relat}^2 C_D \quad (4.51)$$

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2}\rho AV_{relat}^2} \quad (4.52)$$

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho AV_{relat}^2} \quad (4.53)$$

Considerando:

Fuerza de sustentación (Lift force) ( $F_L$ ): Definido como la fuerza que ayuda al álabe a girar con la velocidad tangencial. Es perpendicular al fluido que ingresa al sistema (velocidad relativa del agua).

Fuerza de arrastre (Drag force) ( $F_D$ ): Definido como la fuerza que ayuda a las fuerzas viscosas de fricción en la superficie del perfil. Es paralelo a la dirección del fluido entrante (velocidad relativa del agua).

#### 4.4 Teoría del elemento del álabe

Las fuerzas en los álabes de una THC pueden ser expresados como una función de los coeficientes de sustentación y arrastre como también del ángulo de ataque. Para esto, existen ciertos supuestos que se tiene que tener en cuenta:

- El álabe es dividido en N planos superficiales y tiene N-1 secciones.
- No hay interacción hidrodinámica entre los elementos (secciones).
- Las fuerzas y coeficientes son determinados por las características de la forma del perfil hidrodinámico escogido.

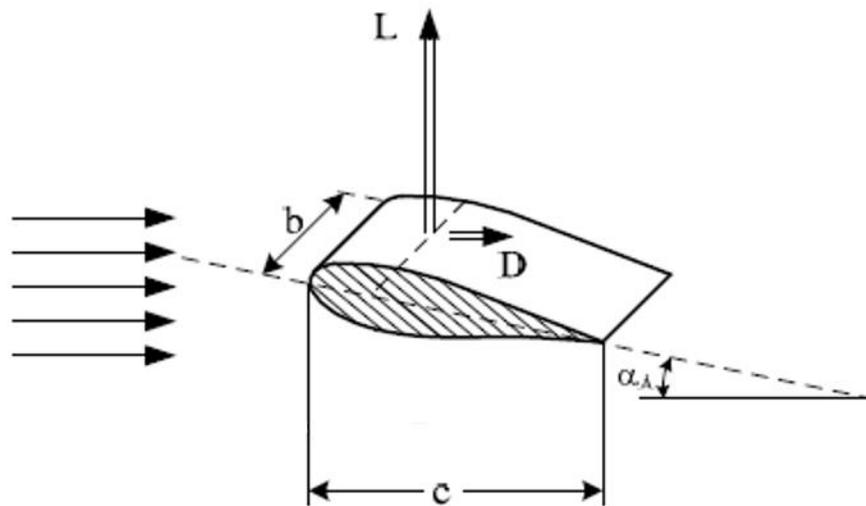


Figura 4.9. Fuerzas actuantes en una sección del álabe.

(Fuente: Wind Turbines, Soren Gundtoft. University College of Aarhus, 2009)

El área en uno de los elementos es determinado por el producto entre la cuerda y una longitud “dr” específica.

$$A = cdr \quad (4.54)$$

Fuerzas en un elemento:

$$dF_L = C_L \frac{1}{2} \rho V_{relat}^2 cdr \quad (4.55)$$

$$dF_D = C_D \frac{1}{2} \rho V_{relat}^2 cdr \quad (4.56)$$

De acuerdo a la descomposición de las fuerzas en la figura 4.9, la fuerza de empuje y el torque pueden ser determinados por:

$$dL = dF_L \sin\varphi - dF_D \cos\varphi \quad (4.57)$$

$$dL = (C_L \frac{1}{2} \rho V_{relat}^2 cdr) \sin\varphi - (C_D \frac{1}{2} \rho V_{relat}^2 cdr) \cos\varphi$$

$$dL = \frac{1}{2} \rho V_{relat}^2 (C_L \sin\varphi - C_D \cos\varphi) cdr \quad (4.58)$$

$$dN = dF_L \cos\varphi + dF_D \sin\varphi \quad (4.59)$$

$$dN = (C_L \frac{1}{2} \rho V_{relat}^2 cdr) \cos\varphi + (C_D \frac{1}{2} \rho V_{relat}^2 cdr) \sin\varphi$$

$$dN = \frac{1}{2} \rho V_{relat}^2 (C_L \cos\varphi + C_D \sin\varphi) cdr \quad (4.60)$$

Todo lo desarrollado hasta el momento es el trabajo con un solo álabe, por lo tanto, se tiene que multiplicar por el número de álabes que el diseño va a requerir:

Torque: 
$$dQ = r dL \quad (4.61)$$

$$dQ = B \frac{1}{2} \rho V_{relat}^2 (C_L \sin\varphi - C_D \cos\varphi) cr dr \quad (4.62)$$

Empuje:

$$dN = B \frac{1}{2} \rho V_{relat}^2 (C_L \cos\varphi + C_D \sin\varphi) cdr \quad (4.63)$$

#### 4.5 Teoría del momento del elemento del álabe (BEM)

Se refiere a la determinación del rendimiento del álabe de la turbina hidrocínética combinando las ecuaciones del momento lineal, momento angular y la teoría del elemento del álabe con el fin de obtener el mejor diseño del rotor de la THC. Esto significa la ayuda para relacionar la geometría del álabe con la capacidad del rotor para extraer energía del agua. Para esto, hay ecuaciones importantes que combinan todas las teorías presentadas:

Solidez: Relación entre el área de los álabes y el área de barrido del rotor.

$$\sigma = \frac{Bc}{2\pi r} \quad (4.64)$$

La ecuación 4.35 como función de  $a'$  ( $1+a'$ ):

$$a'(1 + a') = a(1 - a) \frac{V_1^2}{\Omega^2 r^2}$$

Combinando las ecuaciones 4.31 y 4.35, la fuerza de empuje puede ser obtenido como función de  $a$ :

$$dT = 4 \left( \frac{a(1 - a)V_1^2}{\Omega^2 r^2} \right) \rho \Omega^2 \pi r^3 dr$$

$$dT = 4a(1 - a)\rho V_1^2 \pi r dr \quad (4.65)$$

Con la solidez,  $dN$  y  $dQ$  pueden ser obtenidos:

$$dQ = B \frac{1}{2} \rho \left( \frac{V_1^2(1 - a)}{\text{sen}\varphi} \right)^2 (C_L \text{sen}\varphi - C_D \text{cos}\varphi) cr dr$$

$$dQ = \sigma \pi \rho \left( \frac{V_1^2(1 - a)}{\text{sen}\varphi} \right)^2 (C_L \text{sen}\varphi - C_D \text{cos}\varphi) r^2 dr \quad (4.66)$$

Así como el torque,  $dN$  es dado por:

$$dN = \sigma \pi \rho \left( \frac{V_1^2(1 - a)^2}{\text{sen}^2\varphi} \right) (C_L \text{cos}\varphi + C_D \text{sen}\varphi) r dr \quad (4.67)$$

Combinando la ecuación para  $dN$  (teoría del elemento del álabe) y  $dT$  (teoría BEM):

$$4a(1 - a)\rho V_1^2 \pi r dr = \sigma \pi \rho \left( \frac{V_1^2(1 - a)^2}{\text{sen}^2\varphi} \right) (C_L \text{cos}\varphi + C_D \text{sen}\varphi) r dr$$

$$\frac{a}{(1 - a)} = \sigma C_L \left( \frac{\text{cos}\varphi}{4\text{sen}^2\varphi} \right) \left( 1 + \frac{C_D}{C_L} \tan\varphi \right) \quad (4.68)$$

Combinando las ecuaciones de  $dQ$  (teoría del elemento del álabe) y  $dQ$  (teoría BEM):

$$4a'(1 - a)\rho V_1 \Omega r^3 \pi dr = \sigma \pi \rho \left( \frac{V_1(1 - a)}{\text{sen}\varphi} \right)^2 (C_L \text{sen}\varphi - C_D \text{cos}\varphi) r^2 dr$$

$$\frac{a'}{(1 - a)} = \frac{\sigma C_L}{4\lambda_r \text{sen}\varphi} \left( 1 - \frac{C_D}{C_L} \cot\varphi \right) \quad (4.69)$$

De la geometría del álabe:

$$\tan\varphi = \frac{V_R}{V_{tang}} = \frac{V_1(1-a)}{\Omega r(1+a')}$$

$$\tan\varphi = \frac{(1-a)}{\lambda_r(1+a')} \quad (4.70)$$

Ecuación 4.69 y 4.70:

$$\frac{a'}{(1+a)} = \frac{\sigma C_L}{4\cos\varphi} \left(1 - \frac{C_D}{C_L} \cot\varphi\right) \quad (4.71)$$

Con el fin de encontrar a and a', CD tiene que ser cero y estos coeficientes van a ser obtenidos de las características hidrodinámicas propias. Por lo tanto, las nuevas ecuaciones para las ecuaciones 4.68, 4.69 y 4.71 son:

$$\frac{a}{(1-a)} = \sigma C_L \left(\frac{\cos\varphi}{4\sin^2\varphi}\right) \quad (4.72)$$

$$\frac{a'}{(1-a)} = \frac{\sigma C_L}{4\lambda_r \sin\varphi} \quad (4.73)$$

$$\frac{a'}{(1+a)} = \frac{\sigma C_L}{4\cos\varphi} \quad (4.74)$$

Con estas ecuaciones, a and a' ahora son dados por:

$$a = \frac{1}{1 + \left(\frac{4\sin^2\varphi}{\sigma C_L \cos\varphi}\right)} \quad (4.75)$$

$$a' = \frac{1}{\left(\frac{4\cos\varphi}{\sigma C_L}\right) - 1} \quad (4.76)$$

Entonces, una nueva relación entre a and a' es dada por:

$$\frac{a}{a'} = \frac{\lambda_r}{\tan\varphi} \quad (4.77)$$

Y esto da una nueva ecuación para C<sub>L</sub>:

$$C_L = \frac{4\sin\varphi}{\sigma} \frac{(\cos\varphi - \lambda_r \sin\varphi)}{(\sin\varphi + \lambda_r \cos\varphi)} \quad (4.78)$$

Todas las ecuaciones presentadas hasta ahora son consideradas en un caso ideal, donde la ley de Betz y toda la geometría del álabe no tienen algún error y cuando el

comportamiento del agua es sin ningún fenómeno anormal. Sin embargo, hay una fuerza que tiene que ser considerada cuando el fluido (agua del río) tiende a ir “río arriba” ayudando a la fuerza de sustentación a elevarse y por lo tanto a disminuir la fuerza de arrastre [32]. Para esto, Prandtl considera este fenómeno y lo inserta en todos los parámetros estudiados hasta el momento:

$$F = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left( \frac{\exp\left(-\frac{B}{2}\left(1 - \frac{r}{R}\right)\right)}{\frac{r}{R} \operatorname{sen}\varphi} \right) \quad (4.79)$$

Esto afecta directamente a la fuerza de empuje y al torque:

$$dT = 4Fa(1 - a)\rho V_1^2 \pi r dr \quad (4.80)$$

$$dQ = 4Fa'(1 - a)\rho V_1 \Omega r^3 \pi dr \quad (4.81)$$

De la misma forma, para el cálculo de  $a$ ,  $a'$  y  $C_L$ :

$$a = \frac{1}{1 + \left(\frac{4F \operatorname{sen}^2 \varphi}{\sigma C_L \cos \varphi}\right)} \quad (4.82)$$

$$a' = \frac{1}{\left(\frac{4F \cos \varphi}{\sigma C_L}\right) - 1} \quad (4.83)$$

$$C_L = \frac{4F \operatorname{sen} \varphi (\cos \varphi - \lambda_r \operatorname{sen} \varphi)}{\sigma (\operatorname{sen} \varphi + \lambda_r \cos \varphi)} \quad (4.84)$$

Además, hay una consideración hecha por Gluert en la que este estudia que es lo que pasa cuando el factor de inducción axial es mayor a 0.5 [33]. Esto significa que cuando el agua viene con gran fuerza se genera un estado llamado “turbulencia”, por lo que, se tiene que tener ciertas consideraciones para este fenómeno:

- Cuando  $a > 0.5$ ,  $C_T$  va hasta 2 con un  $a=1$  (una gran turbulencia y circulación del agua detrás del rotor)
- Existe una ecuación para el factor de inducción axial:

$$a = \frac{1}{2} (2 + k(1 - 2a_c) - \sqrt{(k(1 - 2a_c) + 2)^2 + 4(ka_c^2 - 1)}) \quad (4.85)$$

Donde:

$$a_c = 0.2$$

$$K = \frac{(2\text{sen}\varphi)^2 F}{\sigma C_L}$$

$$K = \frac{4F\text{sen}^2\varphi}{\sigma C_L} \quad (4.86)$$

Finalmente, se tiene que saber cuál es la potencia generada por cada sección del álabe con cada uno de los parámetros vistos líneas arriba:

$$P_{rotor} = \int_{r_h}^R dP \quad (4.87)$$

dP es determinado de la ecuación 4.36 y nos da:

$$P_{rotor} = \int_{r_h}^R \Omega dQ$$

Donde  $r_h$  es el radio del buje.

Para el coeficiente de potencia:

$$C_P = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho V_1^3 A} = \frac{\int_{r_h}^R \Omega dQ}{\frac{1}{2}\rho V_1^3 A}$$

Y tomando las ecuaciones 4.66, 4.72 y 4.77, tenemos:

$$C_P = \frac{8}{\lambda^2} \int_{\lambda_h}^{\lambda} F \lambda_r^3 a' (1-a) \left(1 - \frac{C_D}{C_L} \cot\varphi\right) d\lambda_r \quad (4.88)$$

$$C_P = \frac{8}{\lambda^2} \int_{\lambda_h}^{\lambda} F (\text{sen}\varphi)^2 (\cos\varphi - \lambda_r \text{sen}\varphi) (\text{sen}\varphi + \lambda_r \cos\varphi) \left(1 - \frac{C_D}{C_L} \cot\varphi\right) \lambda_r^2 d\lambda_r \quad (4.89)$$

# CAPÍTULO V

## DISEÑO DE LA TURBINA

Habiendo conocido el concepto final seleccionado (Cap. III) y la teoría en la que se basa el diseño de las turbinas de este tipo (Cap. IV) se procede a hacer la parametrización mediante valores reales y específicos del rotor, el buje y el sistema de protección que es la punta de la turbina. Además, se presenta el modelado a través de software como AutoCAD y Autodesk Inventor del álabe, el buje y la punta de la THC, y finalmente de todo el rotor en conjunto para verificación de las dimensiones. Este capítulo presenta de forma concisa cómo es que obtienen todos los valores de diseño y corresponden a la etapa del “Diseño en el nivel sistema” y al “Diseño a detalle” de la metodología planteada.

### 5.1 Cálculo del rotor

Empieza por la comparación de los coeficientes de potencia con el estudio de perfiles hidrodinámicos que fueron usadas en otras tesis y estudios en este tipo de turbinas. Este estudio presentará la geometría final del álabe así como el proceso de iteración para tener los valores exactos para  $a$  y  $a'$  con el fin de tener un mejor rotor diseñado basados en todas las ecuaciones presentadas en el cuarto capítulo. Finalmente, se tendrá un análisis completo de los resultados y su comparación con otros trabajos para hacer la determinación de cuál es el mejor perfil para diseñar.

Se selecciona diez fuentes de información como la sección 3.3 del tercer capítulo que han sido desarrolladas con el mismo propósito: el diseño de una THC. La tabla X presenta cuáles son estos trabajos y especialmente cuál es la potencia que estas han generado con sus resultados. La mayoría de estas tesis y reportes usan tres importantes perfiles hidrodinámicos: NACA 64206, NACA 63012 y NACA 4412, por lo que, estos tres son descritos en la tabla 5.1.

N°	Tipo de información	Tipo de turbina	Investigador / Asociado	Potencia generada (W)
1	Tesis	THC	Universidad Nacional Mayor de San Marcos (UNMSM)	2000
2	Tesis	THC	Universidad de Piura	1000
3	Fabricación	THC	Smart Hydro Power	5000
4	Investigación	THC	Instituto RWTH Aachen	10000
5	Investigación	THC	Instituto de inversión de Energía Eléctrica	8000
6	Tesis	THC	Universidad de Brasilia	5000
7	Reporte	THC	Universidad de Tennessee	35000
8	Tesis	THC	Universidad de Missouri	2500
9	Tesis	THC	Universidad del Norte de Texas	6000
10	Tesis	THC	Universidad La Laguna	2000

Tabla 5.1. Potencias generadas de la competencia.

(Fuente: Elaboración Propia)

Perfil	Grosor (%)	Puntos	Ángulo de ataque máximo
NACA 4412	12	99	8.8°
NACA 23012	12	199	10.6°
NACA 64206	7.21	69	5.1°

Tabla 5.2. Características principales de los perfiles a analizar.

(Fuente: Elaboración Propia)

Perfiles hidrodinámicos a analizar:

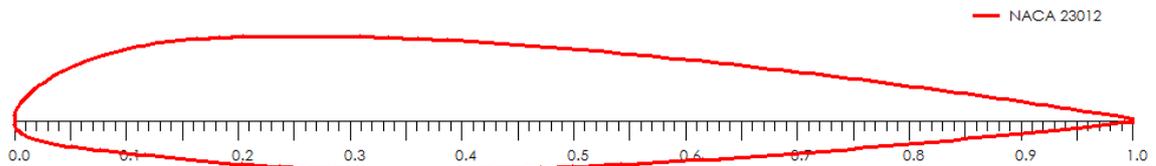


Figura 5.1. Perfil NACA 23012.

(Fuente: Software Qblade).

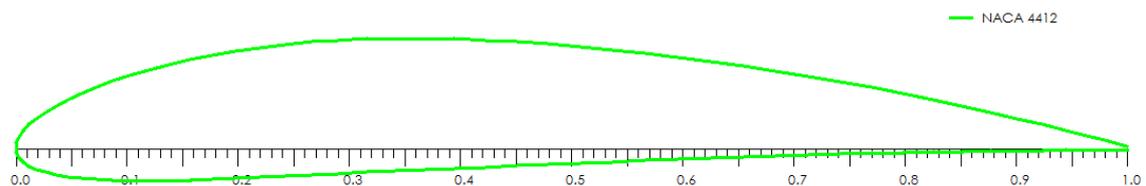


Figura 5.2. Perfil NACA 4412.

(Fuente: Software Qblade).

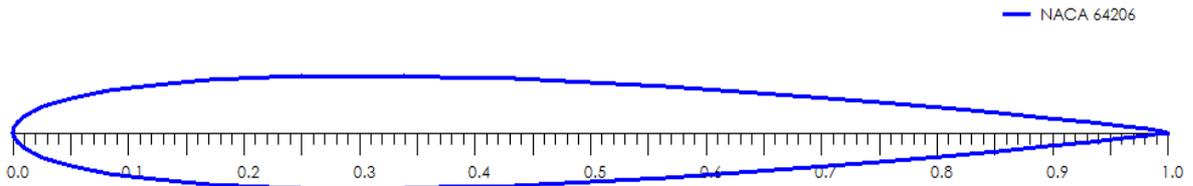


Figura 5.3. Perfil NACA 64206. (Fuente: Software Qblade).

### 5.1.1 Geometría del álabe

Se considera los siguientes puntos:

- En todos los cálculos y simulaciones siguientes el número de elementos será de 8 ( $N=8$ ), por lo que, el número de secciones será igual a 7 ( $N-1=7$ ).
- Los parámetros como el TSR (tip speed ratio), ángulo de ataque, número de álabes y los coeficientes de sustentación y arrastre son determinados por una comparación entre los resultados a obtener y las otras diez fuentes de información.
- La variación de la densidad del agua es debido a la temperatura que considera cada autor. Para la presente tesis, se considera  $1000\text{kg/m}^3$ .

Proceso de diseño para obtener la geometría:

Considerar  $C_D=0$  y  $F=1$  para obtener un valor correcto para la longitud de la cuerda y el ángulo de velocidad relativa. Además, la derivada parcial en función del ángulo de la velocidad relativa hecha en la ecuación 2.5.6 está dada por:

$$\frac{\partial}{\partial \varphi} [(\text{sen}\varphi)^2(\text{cos}\varphi - \lambda_r \text{sen}\varphi)(\text{sen}\varphi + \lambda_r \text{cos}\varphi)] = 0$$

$$\lambda_r = \frac{\text{sen}\varphi(2\text{cos}\varphi - 1)}{[(1 - \text{cos}\varphi)(2\text{cos}\varphi + 1)]} \quad (5.1)$$

Con esto, la longitud de la cuerda y el ángulo de velocidad relativa pueden ser tomados como:

$$\varphi = \frac{2}{3} \tan^{-1} \left( \frac{1}{\lambda_r} \right) \quad (5.2)$$

$$c = \frac{8\pi r}{BC_L(1 - \text{cos}\varphi)} \quad (5.3)$$

Y dividiendo esto en un número de elementos  $N$ , el TSR local para cada sección estará dado por:

$$\lambda_{r,i} = \lambda \left( \frac{r_i}{R} \right) \quad (5.4)$$

Con esto, el ángulo óptimo de la velocidad relativa para cada sección es obtenido a través de la ecuación 3.2.5:

$$\varphi_{opt,i} = \frac{2}{3} \tan^{-1} \left( \frac{1}{\lambda_{r,i}} \right) \quad (5.5)$$

Para el perfil NACA 4412 y de acuerdo a las especificaciones finales planteadas, se tiene los siguientes datos de entrada:

- TSR = 4
- Número de álabes = 3
- Coeficiente de sustentación = 1.101

Para hacer el cálculo de cada sección, tenemos lo siguiente:

1. Número de elementos:  $N = 8$
2. Número de secciones:  $N - 1 = 7$
3. Radios a lo largo del rotor para los 8 elementos: 0.264375m, 0.440625m, 0.616875m, 0.793125m, 0.969375m, 1.145625m, 1.321875m y 1.41m.
4. Radio relacionado (para el primer elemento):

$$\frac{r_1}{R} = \frac{0.264375}{1.41} = 0.1875$$

5. Ángulo de velocidad relativa:

$$\varphi_{opt,i} = \frac{2}{3} \tan^{-1} \left( \frac{5.7}{0.188} \right) \left( \frac{180}{\pi} \right) = 35.4^\circ$$

6. Ángulo de paso:

$$\beta = \varphi_{opt,i} - \alpha_{design} = 35.4^\circ - 4^\circ = 31.4^\circ$$

7. Longitud de cuerda relacionada:

$$c = \frac{8\pi \times 0.188}{3 \times 1.101 (1 - \cos 35.4^\circ)} = 0.264$$

8. El radio relacionado de acuerdo a la longitud del álabe ( $r=1.41m$ ) es el mismo que el cuarto paso.
9. División del radio a lo largo del álabe:

$$r_1 = 0.188 \times 1.41 = 0.264375m$$

10. Longitud de la cuerda:

$$c = 0.264375 \times 1.41 = 0.317m$$

Estos son los pasos fundamentales para encontrar las medidas de una de las secciones del álabe y poder hacer el mismo procedimiento para los restantes. Todos estos cálculos nos dan como resultado la distribución de medidas a lo largo del álabe y sus ocho elementos:

Parámetro	Unid	1	2	3	4	5	6	7	8
Radio	m	0.225	0.375	0.525	0.675	0.825	0.975	1.125	1.200
Paso	°	31.420	21.773	15.830	11.975	9.322	7.402	5.954	5.357
Cuerda	m	0.396	0.355	0.296	0.248	0.211	0.183	0.161	0.152

Tabla 5.3. Geometría básica para perfil NACA 23012.

Para los otros dos perfiles se trabaja de la misma manera:

Parámetro	Unid	1	2	3	4	5	6	7	8
Radio	m	0.225	0.375	0.525	0.675	0.825	0.975	1.125	1.200
Paso	°	31.420	21.773	15.830	11.975	9.322	7.402	5.954	5.357
Cuerda	m	0.317	0.284	0.237	0.198	0.169	0.146	0.129	0.122

Tabla 5.4. Geometría básica para perfil NACA 4412.

Parámetro	Unid	1	2	3	4	5	6	7	8
Radio	m	0.225	0.375	0.525	0.675	0.825	0.975	1.125	1.200
Paso	°	31.420	21.773	15.830	11.975	9.322	7.402	5.954	5.357
Cuerda	m	0.396	0.355	0.296	0.248	0.211	0.183	0.161	0.152

Tabla 5.5. Geometría básica para perfil NACA 64206.

### 5.1.2 Proceso de iteración

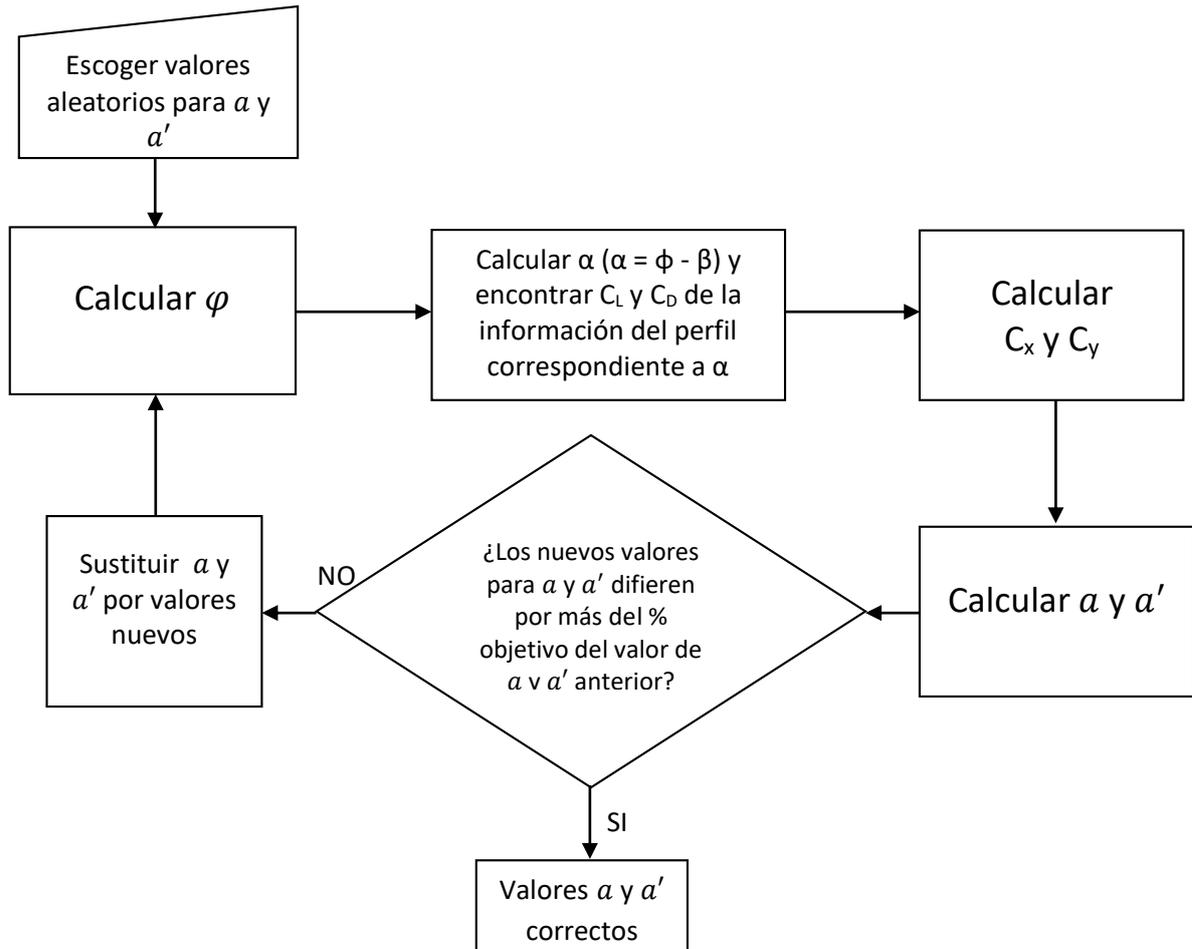
La figura X muestra cuál es el proceso del cálculo para hallar  $a$  y  $a'$ . La idea de calcular estos dos factores es comparar en cada sección los nuevos ángulos, coeficientes y fuerzas dados por estos valores y cómo es que ayudan a la geometría para tener una convergencia correcta.

Al igual que la geometría del álabe, hay un proceso de iteración para el perfil seleccionado:

1. Elegir aleatoriamente valores para  $a$  y  $a'$  (de acuerdo al cálculo presentado en el capítulo cuatro, se tiene una hoja de cálculo hecha con macros para realizar el proceso de iteración).

Esto entrega un primer orden aleatorio:  $a=0.272$  y  $a'=0.259$

2. Ángulo de velocidad relativa de la ecuación 4.70:



Mapa 5.1. Diagrama de flujo para el proceso de iteración. (Fuente: The Blade Element Momentum Theory, Technische Universitat Munchen Lehrstuhli fur Statik).

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{(1 - a)}{(1 + a')} \frac{V_1}{r_1 \omega} = \tan^{-1} \frac{(1 - 0.272)}{(1 + 0.259)} \frac{1.9}{0.264375 \times 1.41} \frac{\pi}{180^\circ} = 36.499^\circ$$

3. Ángulo de ataque:

$$\alpha = \varphi - \beta = 36.499^\circ - 28.4^\circ = 8.079^\circ$$

4. Coeficientes de sustentación y arrastre: Son determinados por el número de Reynolds y la curva de sustentación correcta que se basa en una ecuación polinomial (Ver anexo 5.1):

$$C_L = 0.997 \quad C_D = 0.0089$$

5. Descomposición de coeficientes basados en la ecuación X:

$$C_x = 0.586 \quad C_y = 0.807$$

6. El factor de Prandtl considera la fuerza como 1.

7. El valor de K para el factor Prandtl:

$$K = \frac{4 \times 1 \times \sin^2 36.499^\circ}{0.67 \times 0.807} \frac{\pi}{180^\circ} = 2.609$$

8. Cálculo de a y a':

$$a = 0.277 \text{ y } a' = 0.272$$

9. Porcentaje de error: Comparación con los primeros valores aleatorios escogidos, por lo que, hay un aproximado de 0% en diferencia.

10. Velocidad relativa:

$$V_{relat} = \frac{1.9 \times (1 - 0.272)}{\sin 36.499^\circ} = 2.326 \text{ m/s}$$

Nuevamente, estos son los pasos básicos para el proceso de iteración y encontrar los valores correctos para a y a' con el fin de tener un rotor diseñado correctamente. Como se ve, el ejemplo da sólo una iteración pero las otras secciones pueden tener mayor número de iteraciones con el fin de tener un menor porcentaje de error. Sin embargo, estos valores son correctos con el macro desarrollado, por lo que, la tabla 7 muestra los valores calculados en base a todas las ecuaciones anteriormente presentadas:

Parámetro	Símbolo	1	2	3	4	5	6	7
Fact de inducción axial	a	0.298	0.307	0.313	0.317	0.324	0.342	0.414
Fact de inducción tang	a'	0.276	0.116	0.063	0.039	0.027	0.020	0.017
Ángulo de veloc relativa	PHI	35.177	25.485	19.533	15.665	12.947	10.790	8.384
Ángulo de ataque	alfa	6.757	6.711	6.703	6.690	6.625	6.388	5.430
Coef de sustentación	C <sub>L</sub>	0.850	0.845	0.844	0.843	0.835	0.809	0.701
Coeficiente de arrastre	C <sub>D</sub>	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.006
Coeficiente y	C <sub>y</sub>	0.699	0.766	0.798	0.813	0.816	0.796	0.694
Coeficiente x	C <sub>x</sub>	0.484	0.357	0.275	0.220	0.180	0.144	0.096
Factor	F	1.000	1.000	0.998	0.992	0.970	0.899	0.664
Factor	K	2.257	2.137	2.075	2.025	1.951	1.766	1.189
Fact de induc axial (1)	a_1	0.307	0.319	0.325	0.331	0.339	0.361	0.457
Fact de induc axial (2)	a_2	0.298	0.307	0.313	0.317	0.324	0.342	0.414
Fact de inducción axial	a	0.298	0.307	0.313	0.317	0.324	0.342	0.414
Fact de inducción tang	a'	0.276	0.116	0.063	0.039	0.027	0.020	0.017
Porcentaje de error	error_a	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Porcentaje de error	error_a'	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Velocidad relativa	w	2.316	3.058	3.905	4.805	5.734	6.679	7.633

Tabla 5.6. Parámetros hallados para el perfil NACA 23012 en el proceso de iteración.

(Fuente: Elaboración Propia)

Parámetro	Símbolo	1	2	3	4	5	6	7
Fact de inducción axial	a	0.272	0.276	0.277	0.277	0.281	0.298	0.369
Fact de inducción tang	a'	0.259	0.107	0.057	0.035	0.024	0.018	0.016
Ángulo de veloc relativa	PHI	36.499	26.651	20.567	16.586	13.769	11.521	9.029
Ángulo de ataque	alfa	8.079	7.878	7.737	7.611	7.447	7.119	6.074
Coef de sustentación	C <sub>L</sub>	0.997	0.975	0.959	0.945	0.927	0.891	0.773
Coeficiente de arrastre	C <sub>D</sub>	0.009	0.009	0.009	0.008	0.008	0.008	0.007
Coeficiente y	C <sub>y</sub>	0.807	0.875	0.901	0.909	0.903	0.874	0.765
Coeficiente x	C <sub>x</sub>	0.586	0.430	0.329	0.262	0.213	0.170	0.115
Factor	F	1.000	1.000	0.997	0.989	0.964	0.887	0.645
Factor	K	2.609	2.543	2.536	2.530	2.475	2.257	1.520
Fact de induc axial (1)	a_1	0.277	0.282	0.283	0.283	0.288	0.307	0.397
Fact de induc axial (2)	a_2	0.272	0.276	0.277	0.277	0.281	0.298	0.369
Fact de inducción axial	a	0.272	0.276	0.277	0.277	0.281	0.298	0.369
Fact de inducción tang	a'	0.259	0.107	0.057	0.035	0.024	0.018	0.016
Porcentaje de error	error_a	<b>0.000</b>						
Porcentaje de error	error_a'	<b>0.000</b>						
Velocidad relativa	w	2.326	3.065	3.911	4.810	5.738	6.682	7.635

Tabla 5.7. Parámetros hallados para el perfil NACA 4412 en el proceso de iteración.

(Fuente: Elaboración Propia)

Parámetro	Símbolo	1	2	3	4	5	6	7
Fact de inducción axial	a	0.308	0.317	0.318	0.317	0.320	0.337	0.409
Fact de inducción tang	a'	0.325	0.139	0.075	0.046	0.031	0.023	0.021
Ángulo de veloc relativa	PHI	36.103	26.692	20.804	16.898	14.089	11.799	9.179
Ángulo de ataque	alfa	7.683	7.918	7.975	7.923	7.767	7.397	6.225
Coef de sustentación	C <sub>L</sub>	0.953	0.979	0.986	0.980	0.963	0.922	0.790
Coeficiente de arrastre	C <sub>D</sub>	0.008	0.009	0.009	0.009	0.009	0.008	0.007
Coeficiente y	C <sub>y</sub>	0.775	0.879	0.924	0.940	0.936	0.904	0.781
Coeficiente x	C <sub>x</sub>	0.555	0.432	0.342	0.276	0.226	0.181	0.119
Factor	F	1.000	1.000	0.997	0.988	0.961	0.882	0.641
Factor	K	2.129	2.030	2.020	2.024	1.991	1.820	1.221
Fact de induc axial (1)	a_1	0.320	0.330	0.331	0.331	0.334	0.355	0.450
Fact de induc axial (2)	a_2	0.308	0.317	0.318	0.317	0.320	0.337	0.409
Fact de inducción axial	a	0.308	0.317	0.318	0.317	0.320	0.337	0.409
Fact de inducción tang	a'	0.325	0.139	0.075	0.046	0.031	0.023	0.021
Porcentaje de error	error_a	<b>0.000</b>						
Porcentaje de error	error_a'	<b>0.000</b>						
Velocidad relativa	w	2.231	2.890	3.650	4.463	5.306	6.165	7.034

Tabla 5.8. Parámetros hallados para el perfil NACA 64206 en el proceso de iteración.

(Fuente: Elaboración Propia)

### 5.1.3 Fuerzas y potencia generada

Con la geometría del álabe y el proceso de iteración, la potencia generada y las fuerzas que gobiernan a este son determinadas por:

1. Fuerza axial y tangencial:

$$F_x = \frac{1}{2} \rho V_{relat}^2 c C_x = \frac{1}{2} \times 1000 \times 2.326^2 \times 0.317 \times 0.586 = 502N$$

$$F_y = \frac{1}{2} \rho V_{relat}^2 c C_y = \frac{1}{2} \times 1000 \times 2.326^2 \times 0.317 \times 0.807 = 691N$$

2. Fuerza axial total:

$$F_{y.1} = B \int_0^R F_y dr = 3 \int_0^{0.264375} 701 \times 0.1375 = 311.1N$$

3. Potencia generada:

$$P_{rotor} = \int_{r_h}^R dP = 3 \times 1.41 \int_0^{0.264375} 502 \times 0.1375 = 335W$$

Lo mismo sucede a lo largo del álabe en todas las secciones y teniendo la potencia generada de salida viene a ser la suma de todos los resultados para cada sección.

Para el perfil estudiado, tenemos:

Parámetro	Símbolo	1	2	3	4	5	6	7
Fuerza Tang (N)	F <sub>x</sub>	514	593	622	631	625	590	450
Fuerza Axial (N)	F <sub>y</sub>	744	1272	1804	2330	2834	3251	3259
Potencia (W)	P	344	660	969	1265	1532	1707	1502
Fuerza Axial (N)	F <sub>yi</sub>	334.7	572.5	811.6	1048.7	1275.4	1462.9	1466.7

Tabla 5.9. Fuerzas y potencia de salida para el NACA 23012.

(Fuente: Elaboración Propia)

Parámetro	Símbolo	1	2	3	4	5	6	7
Fuerza Tang (N)	F <sub>x</sub>	502	573	596	601	592	556	430
Fuerza Axial (N)	F <sub>y</sub>	691	1167	1632	2084	2510	2858	2872
Potencia (W)	P	335	638	929	1204	1449	1610	1437
Fuerza Axial (N)	F <sub>yi</sub>	311.1	525.1	734.6	938.0	1129.3	1286.0	1292.6

Tabla 5.10. Fuerzas y potencia de salida para el NACA 4412.

(Fuente: Elaboración Propia)

Parámetro	Símbolo	1	2	3	4	5	6	7
Fuerza Tang (N)	$F_x$	502	588	619	626	616	576	435
Fuerza Axial (N)	$F_y$	701	1195	1673	2130	2552	2884	2856
Potencia (W)	P	282	550	810	1055	1269	1401	1222
Fuerza Axial (N)	$F_{yi}$	289.3	493.0	690.2	878.7	1052.6	1189.8	1178.2

Tabla 5.11. Fuerzas y potencia de salida para el NACA 64206.

(Fuente: Elaboración Propia)

## 5.2 Modelado del rotor

### 5.2.1 Selección del perfil

Para hacer la selección del perfil final de nuestro diseño tenemos que comparar estos tres de acuerdo a su variación con su coeficiente de potencia, ángulo de ataque y TSR para poder saber cuál tiene un mejor comportamiento de acuerdo a estos tres parámetros.

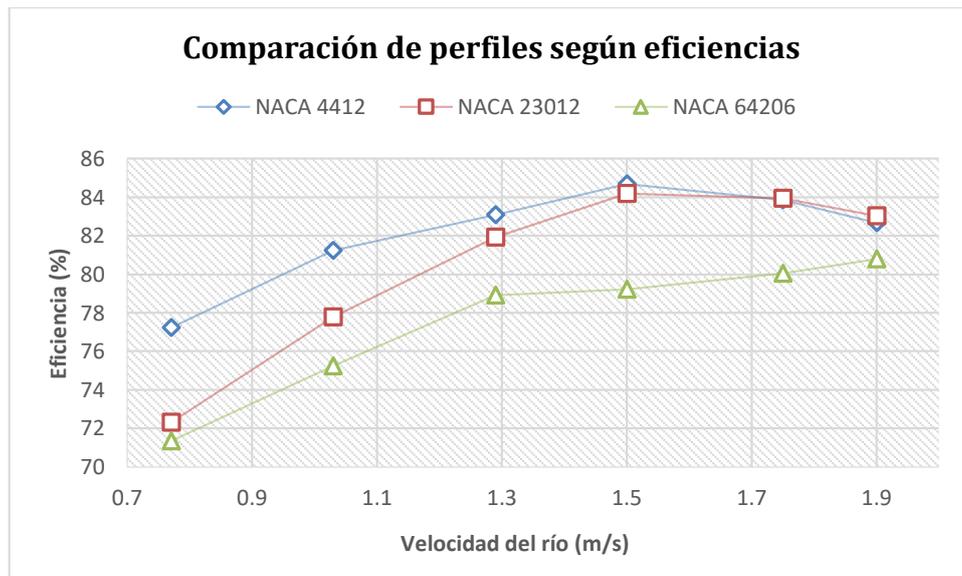


Figura 5.4. Comparación de perfiles según eficiencias.

(Fuente: Elaboración Propia).

Como se ve en la figura, se tiene que tener la mejor eficiencia posible y que esta sea equilibrada de acuerdo a las condiciones, es decir, que a pesar de los cambios de velocidad del río tanto en época de estiaje como de avenidas en todo el año, el rendimiento de la turbina no varíe demasiado.

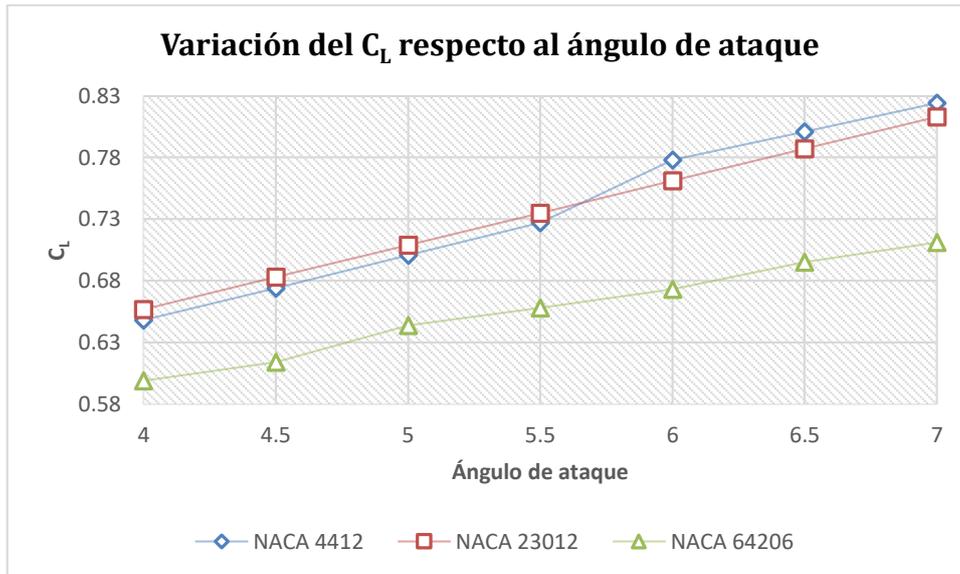


Figura 5.5. Coeficientes de sustentación respecto al ángulo de ataque.

(Fuente: Elaboración Propia).

Con esto se determina que el perfil a diseñar es el NACA 4412. Seguido a esto, se comienza por hacer el modelado y análisis a través del software de diseño AutoCAD y Autodesk Inventor.

### 5.2.2 Modelado del álabe

Para el NACA 4412, con 1200mm de longitud de álabe y en 8 elementos ( $N = 8$ ), tenemos la distribución descrita en la sección 5.1.1:

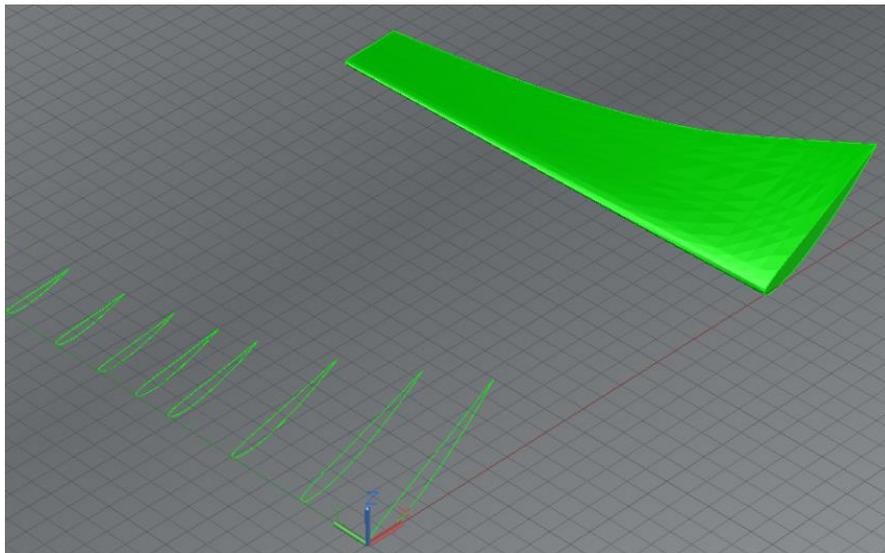


Figura 5.6. Vista frontal del álabe en toda su longitud.

(Fuente: Elaboración Propia)

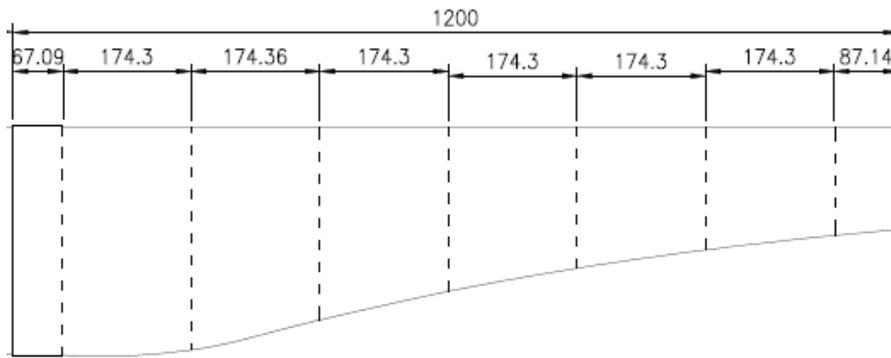


Figura 5.7. Geometría del álabe modelada.

(Fuente: Elaboración Propia).

Adicional a esto, se tiene que diseñar el detalle de la punta del álabe ya que esta va a estar unida al buje del rotor. Esta va a ser empernada (cuatro agujeros con pernos de 1/2") y soldada a la punta para mayor sujeción. Los cálculos para la selección de pernos se encuentran en el anexo 5.1.

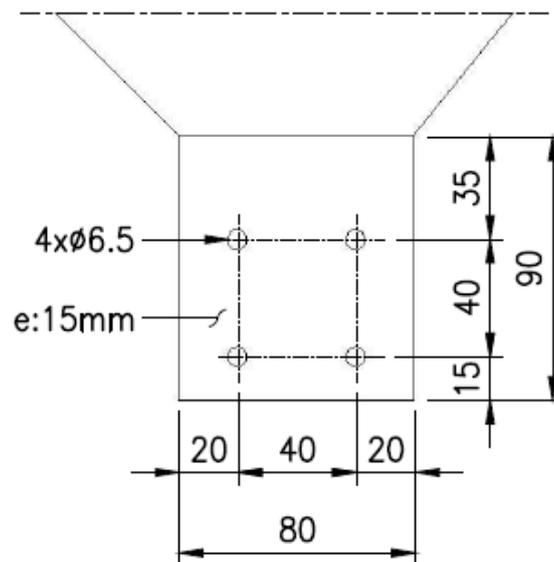


Figura 5.8. Dimensiones de la punta del álabe.

(Fuente: Elaboración Propia).

Con esto, tenemos el modelo final del álabe diseñado:



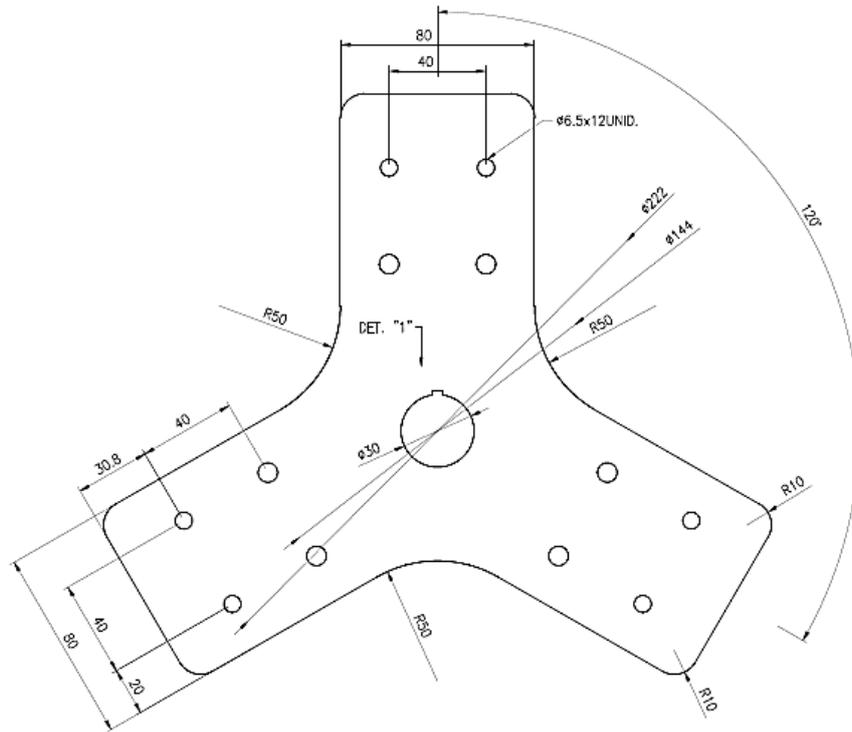
*Figura 5.9.* Modelo final del álabe.

(Fuente: Elaboración Propia)

### **5.2.3 Diseño del buje**

El buje es la parte mecánica que une a los álabes en un punto medio, para su rotación producida por el movimiento del agua. Esta tiene que tener un mecanismo tal que la unión sea empernada, soldada o de otro tipo que evite su desajuste. Los álabes estarán unidos mediante tornillería uniéndose mediante rosca y una chaveta. Esto hará que se transmita la energía captada al tren de potencia (sistema de transmisión) mediante el eje. Adicional a esto, tendrá una punta de protección para evitar daños en las uniones del álabe con el buje (punto clave en las especificaciones finales).

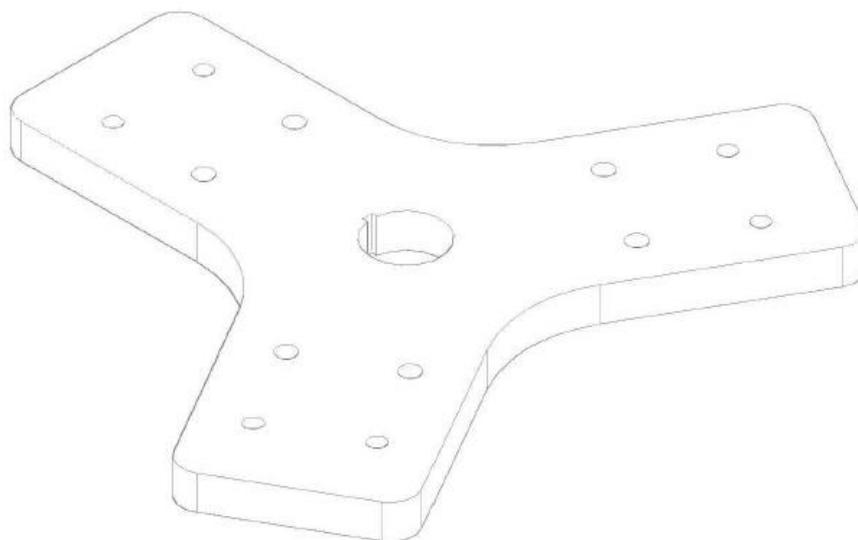
- a. Buje de empernado: Distanciados a  $120^\circ$ , con 12 agujeros para pernos de  $1/2''$  y un agujero central para conexión con eje de transmisión (incluye la consideración del tamaño de la chaveta para su sujeción de  $2 \times 4 \text{mm}$ ).



*Figura 5.10.* Dimensiones del buje central.

(Fuente: Elaboración Propia).

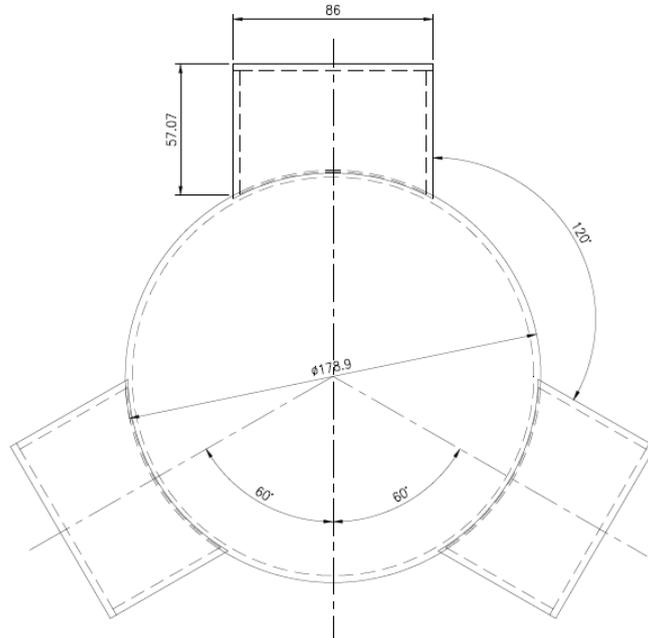
Con esto, tenemos el modelo final del buje diseñado:



*Figura 5.11.* Modelo final del buje.

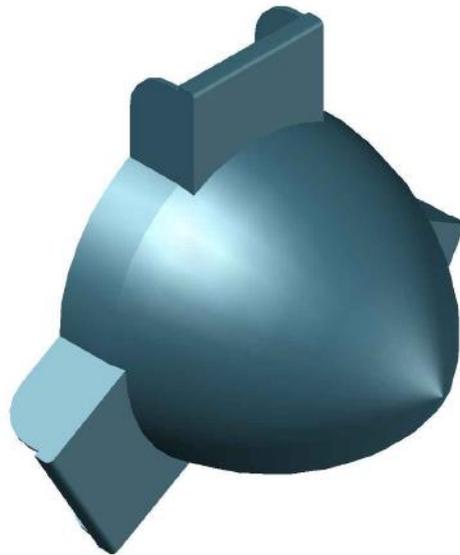
(Fuente: Elaboración Propia).

- b. Punta de la turbina. Sistema de protección de la sujeción de los álabes con el buje. Diámetro de 178.9mm y tres puntas de protección rectangular de 57.07x86mm.



*Figura 5.12.* Dimensiones de la punta de la THC.  
(Fuente: Elaboración Propia).

Con esto, tenemos el modelo final de la punta de la THC diseñada:



*Figura 5.13.* Modelo final de la punta de la turbina.  
(Fuente: Elaboración Propia).

### 5.3 Modelado de la estructura

Una vez que se diseña el rotor, el buje y la punta del álabe, se tiene el input que es el diámetro del eje con la chaveta de ingreso. Esta va a ayudar a determinar cuál va a ser la configuración inicial para su transmisión de potencia al engrane, y este al piñón.

Estructura del sistema de transmisión:

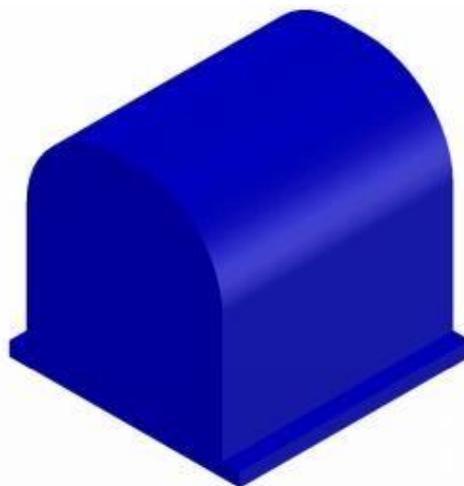
Dos ejes, uno de velocidad lenta que es la que genera los álabes por acción del movimiento del agua y un eje de velocidad rápida que es la captación de la energía a través del giro de un generador a determinadas revoluciones por minuto. Esta configuración de engranajes se le llamará caja multiplicadora y tiene que tener un recubrimiento (carcasa) para que pueda tener su lubricación correspondiente.

En suma, la caja multiplicadora y el generador tienen que tener una base (estructura) donde asentarse, por lo que, una estructura tipo esqueleto va a ser diseñada para reforzar el recubrimiento general y también para base de estos componentes.

a. Caja multiplicadora:

Dimensiones exteriores: Caja con base rectangular de 400x400mm considerando ambos extremos para empernado a la estructura con una distancia de 30x400mm.

Dimensiones de altura: Sección semicircular de 400x400mm con una curvatura de radio de 150mm.



*Figura 5.14.* Caja multiplicadora de engranajes

(Fuente: Elaboración Propia).

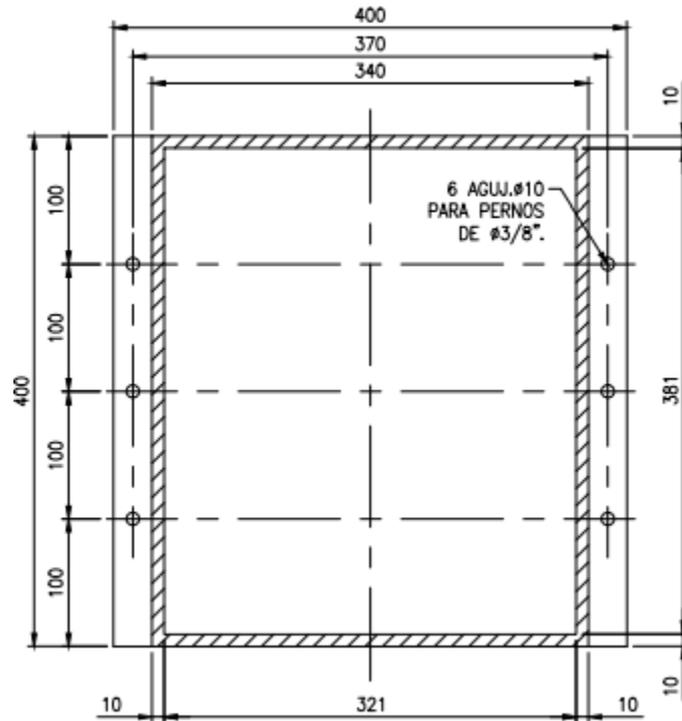


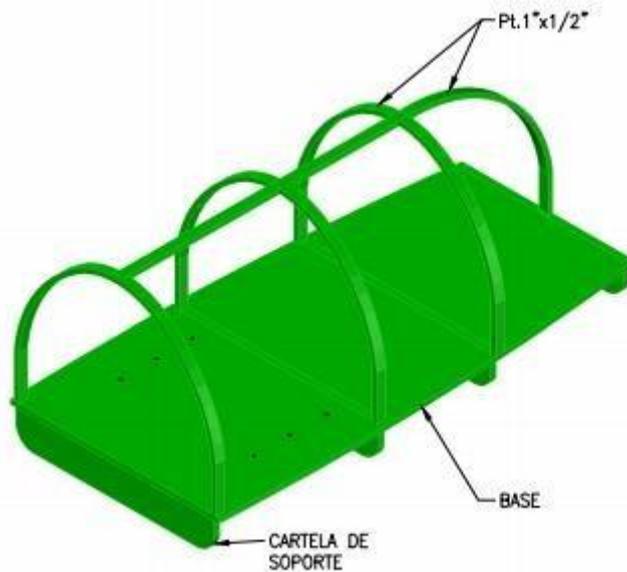
Figura 5.15. Especificación de medidas de la caja multiplicadora.

(Fuente: Elaboración Propia).

b. Estructura:

Basada en la idea de diseño de parte de la Universidad de Brasilia en su diseño de una turbina hidrocínética con aplicación en el mar [32], se adapta el concepto y se sujeta a las medidas coherentes que propone el diseño. Se mejora la ergonomía de la turbina y de la estructura para captar menos espacio y tener el mismo fin. Este sirve como base y como protección para el sistema de transmisión como para el generador.

Con una longitud de 1200x579mm, está dividida en tres partes. La primera acoge a la caja multiplicadora y estará emperrada con pernos de 1/2" en seis agujeros, mientras que la segunda y tercera serán la conexión para el generador.



*Figura 5.16.* Esqueleto de soporte para caja y generador.

(Fuente: Elaboración Propia).

c. Carcasa

Es el que encierra a todos los componentes y deja libre al paso del eje de velocidad lenta con la conexión del buje que gira con el rotor. Este tiene como dimensiones un total de 1300x585mm y considera tanto a la estructura como a la caja multiplicadora para su ensamble.

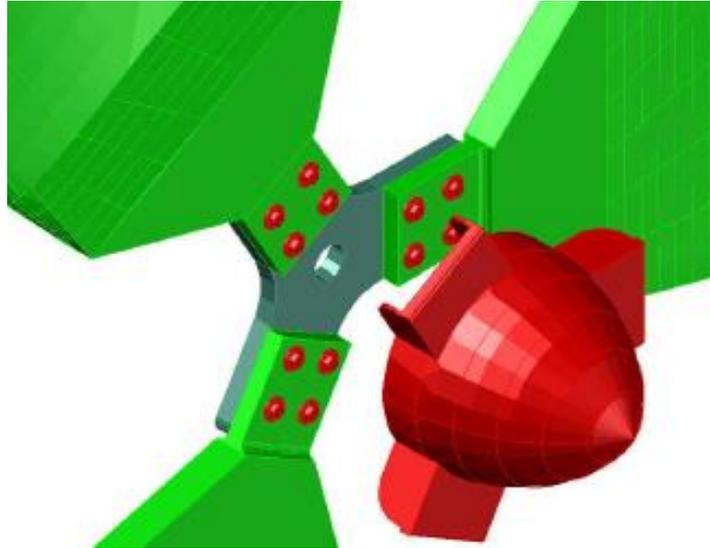


*Figura 5.17.* Recubrimiento general del sistema de transmisión y generador.

(Fuente: Elaboración Propia).

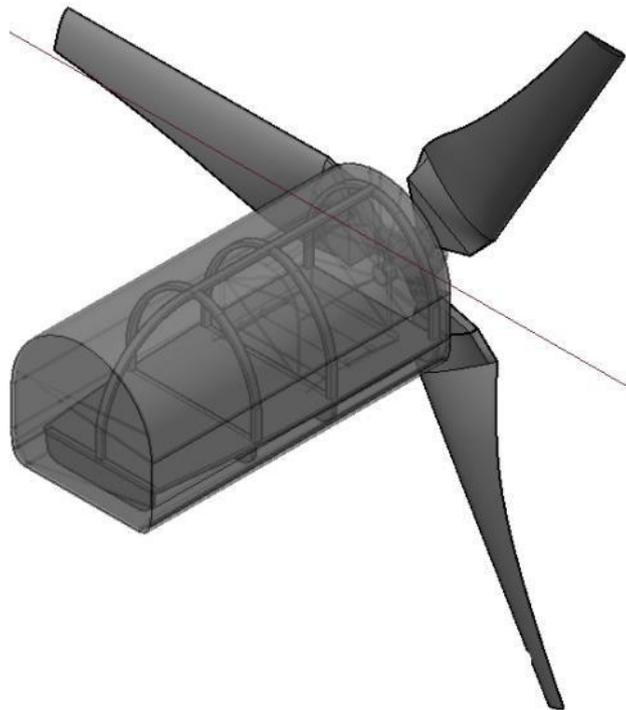
#### 5.4 Ensamble general

Viene a ser la unión de los álabes, el buje y la punta de la turbina. Con el perfil NACA 4412, con 2.82m de diámetro general, 1.2m de longitud de álabes, 4° de ángulo de ataque y 3 álabes en total y un empernado de 4 agujeros por álabes.



*Figura 5.18.* Detalle de la pernería del rotor.

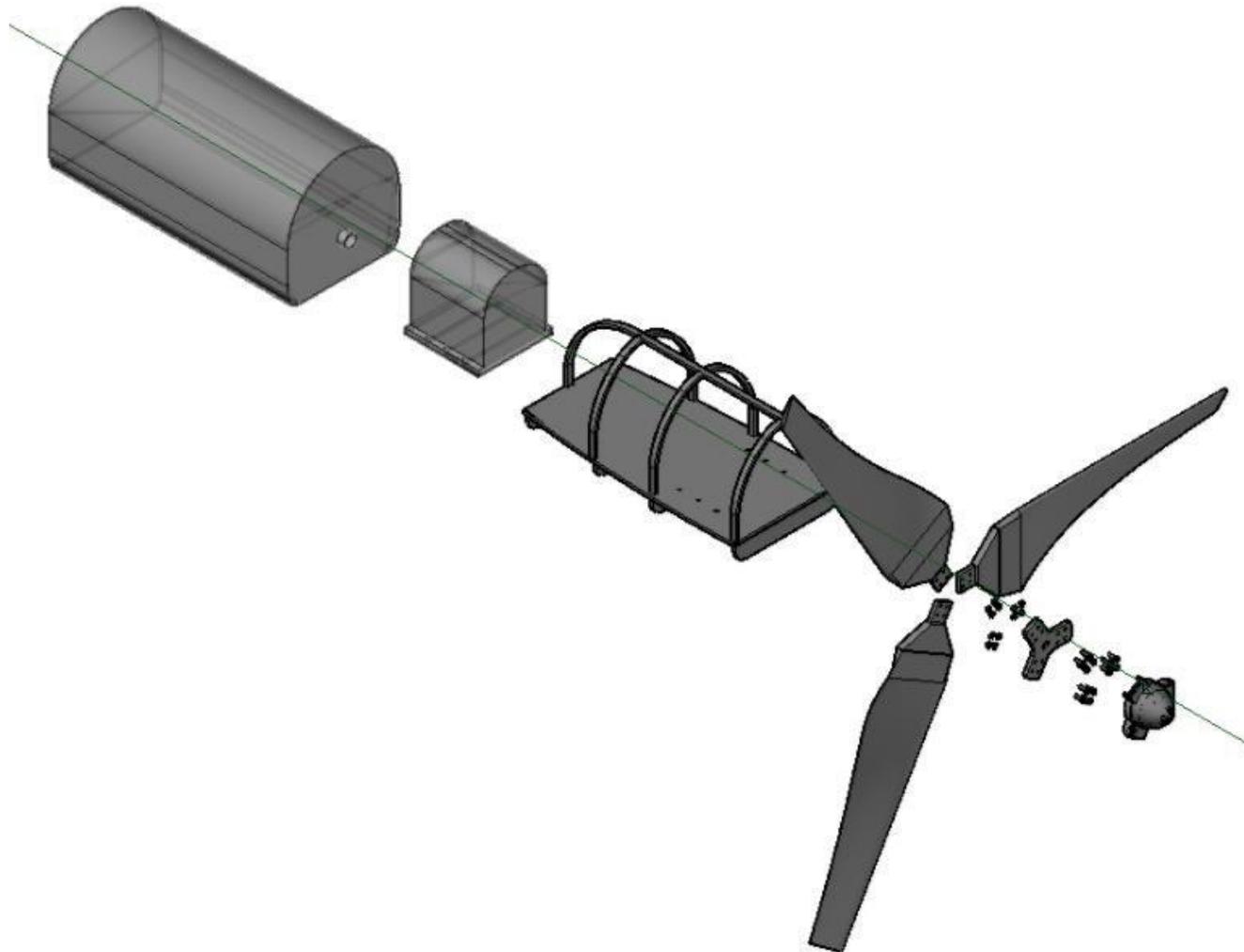
(Fuente: Elaboración Propia).



*Figura 5.19.* Ensamble general del rotor.

(Fuente: Elaboración Propia).

Explosión de todo el sistema en general:



*Figura 5.20.* Ensamble general del rotor.

(Fuente: Elaboración Propia).

# CAPÍTULO VI

## ANÁLISIS DE RESULTADOS

Una vez que se tiene definida la geometría del álabe, las fuerzas que interactúan de acuerdo a las condiciones de entrada (especificaciones finales) y de la eficiencia con la que esta trabaja, se procede a analizar cómo es que la variación de sus diferentes parámetros afecta e interactúa con el agua para así poder determinar cuál es el mejor estado posible para su operación. De acuerdo a la metodología, parte del proceso de la comprobación del buen funcionamiento de un producto, es determinar que tan bien trabaja bajo condiciones de simulación como en la realidad. Además, se hará la comparación en base a las diez fuentes de información presentadas en el capítulo anterior para verificar el buen diseño del rotor y se discutirá los puntos fundamentales para que, comprobado el diseño del rotor, el proceso para el diseño del sistema de transmisión y la selección del generador sea el correcto ya que siempre se está considerando el diseño en base a su aplicación en el río seleccionado.

### 6.1 Resultados

a. Variación del número de álabes para mejorar eficiencia.

Para hacer la determinación del coeficiente de potencia óptimo de acuerdo al número de revoluciones que se debe generar, se hace su variación de acuerdo a estos RPM teniendo como base el número de álabes en la instalación. Para un rotor con seis álabes, tenemos un  $C_P$  máximo de 0.4020 a 90 rev/min, mientras que para una configuración de cuatro álabes en la instalación, se tiene un  $C_P$  máximo de 0.4655 a 80 rev/min. (La combinación de cuatro álabes suele ser bastante convencional para asegurar la rotación y funcionamiento de este tipo de rotores). Por otro lado, se hace la determinación de una configuración con 3 álabes (diseño propuesto) y se obtiene un  $C_P$  máximo de 0.501939 con una velocidad óptima de 78 rev/min. Esta velocidad es la que va a entrar en el sistema de transmisión a través del eje lento y se cumple con la especificación N° 17 que propone la instalación de sólo 3 álabes para la turbina.

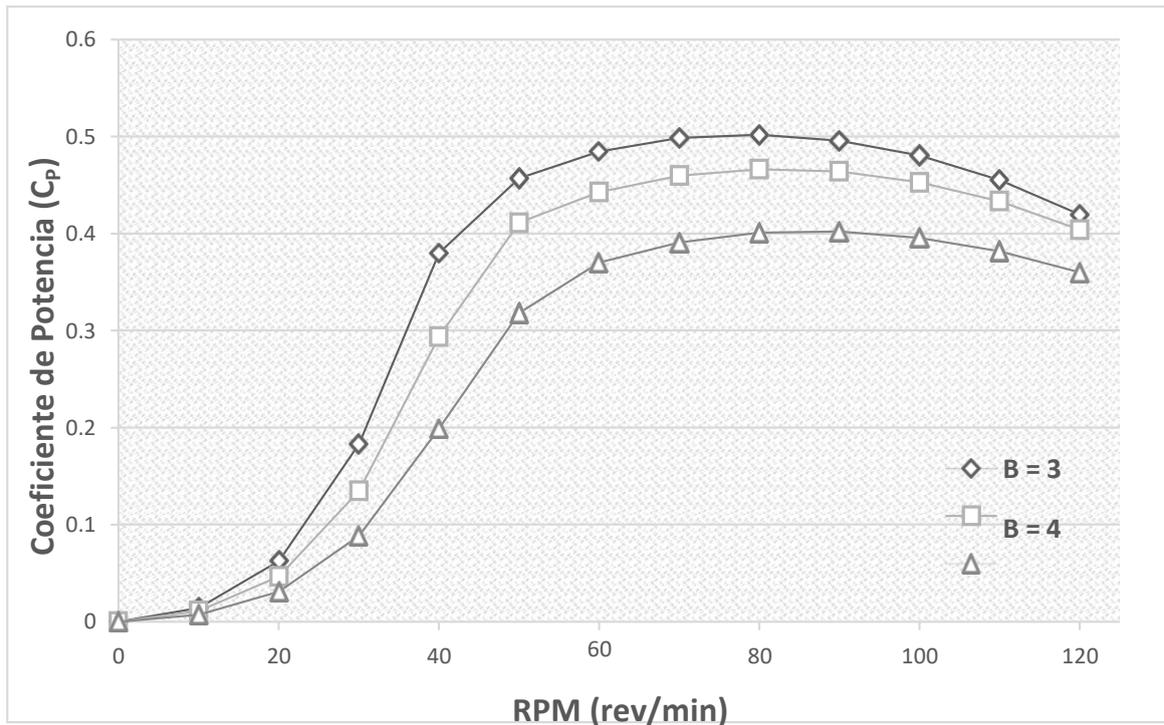


Figura 6.1. Coeficiente de potencia vs RPM. (Fuente: Elaboración Propia).

Además, con esto se verifica que una configuración de 3 álabes es 7.26% más efectivo que una de cuatro álabes y 19.91% más que un ensamble con seis álabes.

b. Potencia generada de acuerdo a la velocidad del río

La ley de Betz establece que del total de energía posible de extraer de un medio como el agua en un río, se puede sacar como máximo el 59.259% del total. De este porcentaje es del que se tiene que hacer las comparaciones para poder establecer cuánto es lo que en realidad está produciendo la THC. La figura 6.2 muestra como es esta diferencia con la velocidad mínima y máxima del río estudiado.

Valores input: TSR = 4,  $CL = 1.101$ , RPM = 78, B = 3, Ángulo de ataque =  $7^\circ$ , diámetro del rotor = 2.82m y longitud del álabes=1.2m.

- Mínima (0.77m/s): Potencia real máxima = 355.066W, Potencia real = 294.705W
- Máxima (1.9m/s): Potencia real máxima = 9193.89W, Potencia real = 7787.44W

En este punto es donde se convalida las dimensiones y parámetros del diseño propuesto: Una THC de 3 álabes, con los mismos valores inputs de esta prueba y una generación de energía real de 7.787kW a 1.9m/s con un coeficiente de potencia de 0.501939.

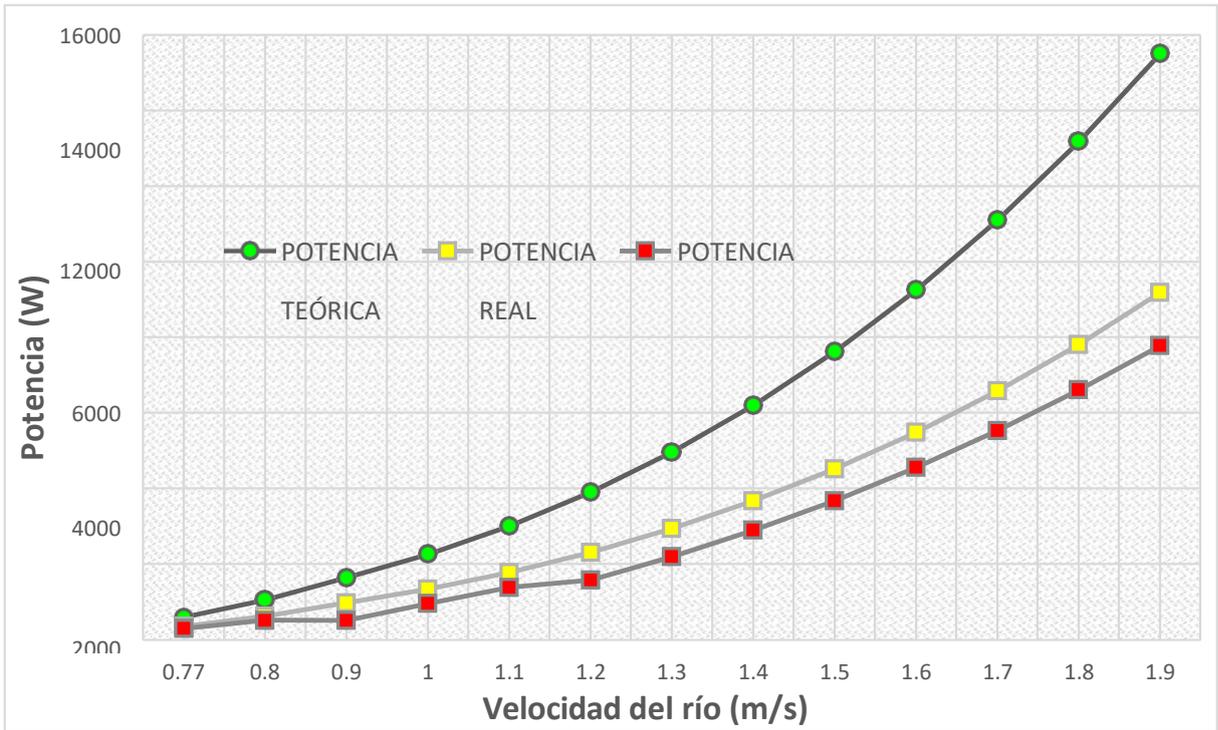


Figura 6.2. Potencia vs velocidad del río. (Fuente: Elaboración Propia).

c. Eficiencia del rotor de acuerdo a la velocidad del río

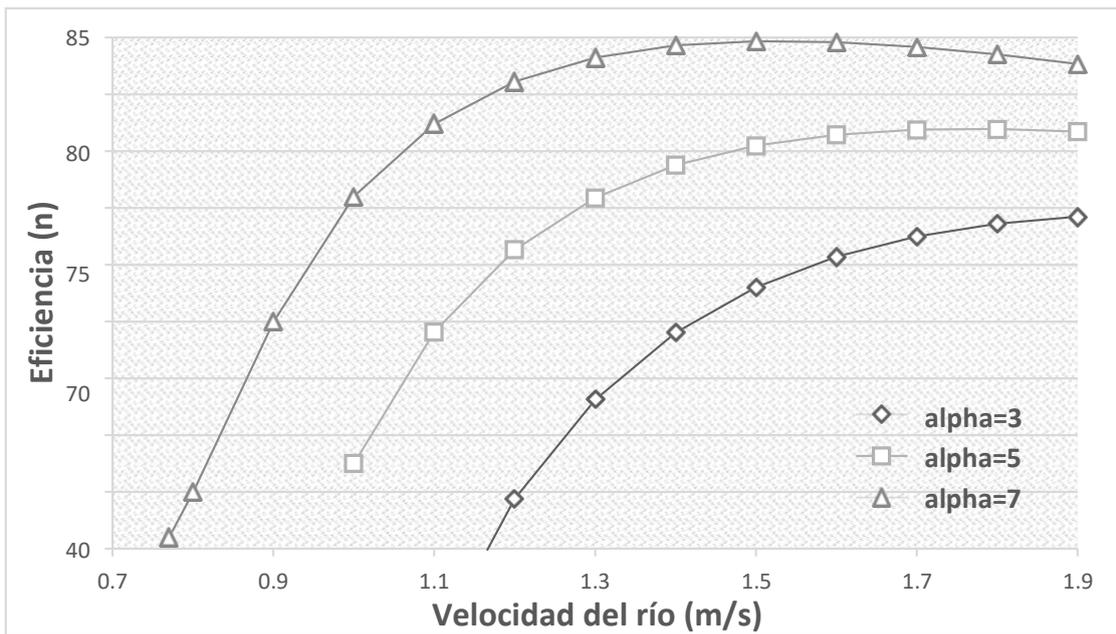


Figura 6.3. Eficiencia vs velocidad del río (Fuente: Elaboración Propia).

Valores input:  $TSR = 4$ ,  $C_L = 1.101$ ,  $RPM = 78$ ,  $B = 3$ , Ángulo de ataque =  $7^\circ$ , diámetro del rotor =  $2.82m$  y longitud del álabe= $1.2m$ .

Con la variación de los ángulos de ataque, se verifica que la eficiencia del rotor conviene a un mayor ángulo de ataque. Para un  $\alpha$  igual a 3, se tiene como máximo una eficiencia total de 69.22% y para un  $\alpha$  igual a 5, se tiene como máximo una eficiencia de 76.94%. Una vez comprobado el patrón de que a mayor ángulo de ataque, es mayor la eficiencia, se prueba con uno de  $7^\circ$  y se obtiene 84.70% a 1.5m/s. Esto significa que con la velocidad máxima posible establecida por los datos hidrológicos del río Santiago (1.9m/s), se tendría como eficiencia máxima un total de 82.68%.

Por lo tanto, se establece el diseño para un ángulo de ataque igual a 7 con una condición de frontera a nivel máximo con la velocidad del río a 1.9m/s. Esto quiere decir que para época de avenidas (mayor velocidad del río) se podrá tener una eficiencia total de 82.68% de parte de la THC. Esto ayudará a no solo cumplir con la demanda de electricidad que se necesita para la comunidad, sino también para tener almacenada energía que en época de estiaje no se pueda tener.

d. Torque y potencia generada por la variación de la velocidad del sistema.

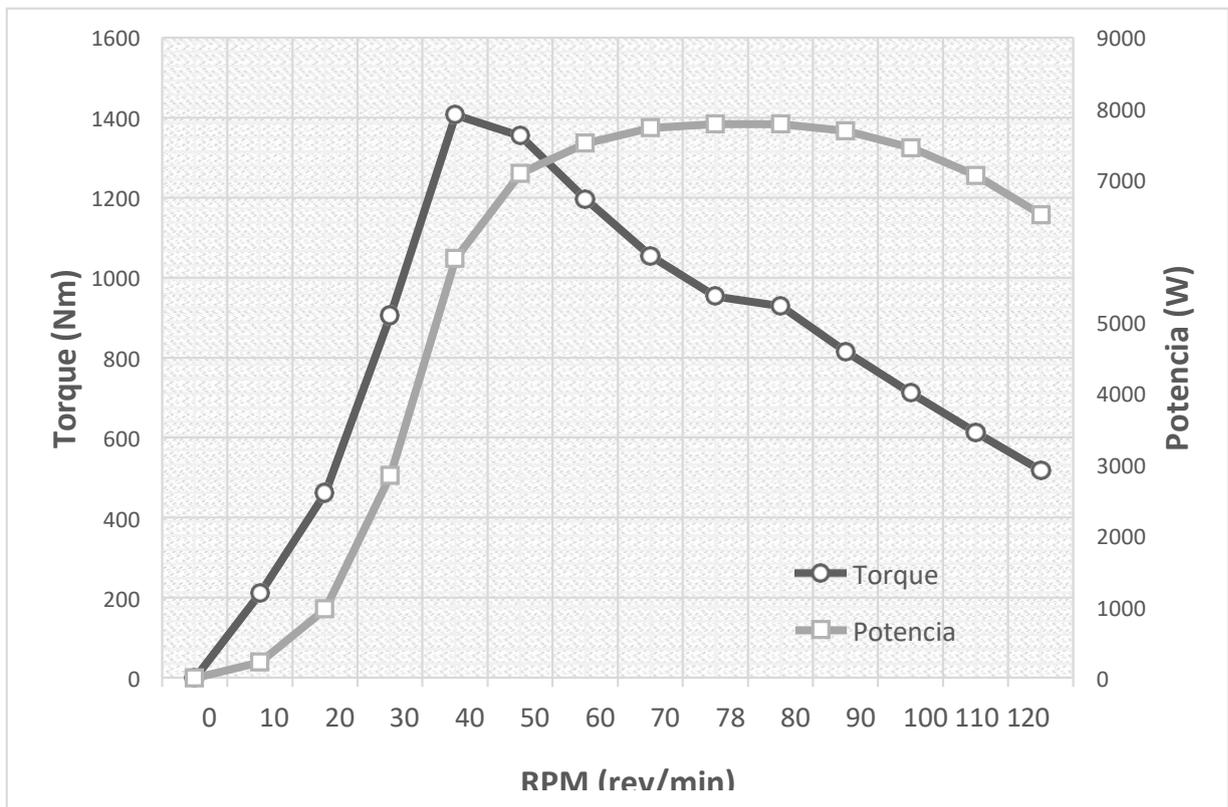


Figura 6.4. Torque y potencia vs RPM. (Fuente: Elaboración Propia).

Valores input:  $TSR = 4$ ,  $C_L = 1.101$ ,  $B = 3$ , Ángulo de ataque =  $7^\circ$ , diámetro del rotor = 2.82m y longitud del álabe=1.2m.

Para el caso del torque, se tiene un máximo de 1407.293Nm a 40 rev/min y un mínimo de 518.188Nm a 120 rev/min. Para encontrar el valor ideal con el que el sistema tenga una configuración de operación correcta tiene que alinearse con el lado derecho: la potencia generada. Esta se determina en tal punto que a 78rev/min se obtiene un 953.392Nm que van a ser los datos de entrada para el diseño del eje y el sistema de engranajes. Además de este dato, se tiene que considerar que a mayor revolución del sistema, la potencia y el torque que genera la THC suele bajar de forma lineal inversa teniendo declives hasta 518.1875Nm.

e. Torque y fuerza axial necesario para el sistema de transmisión

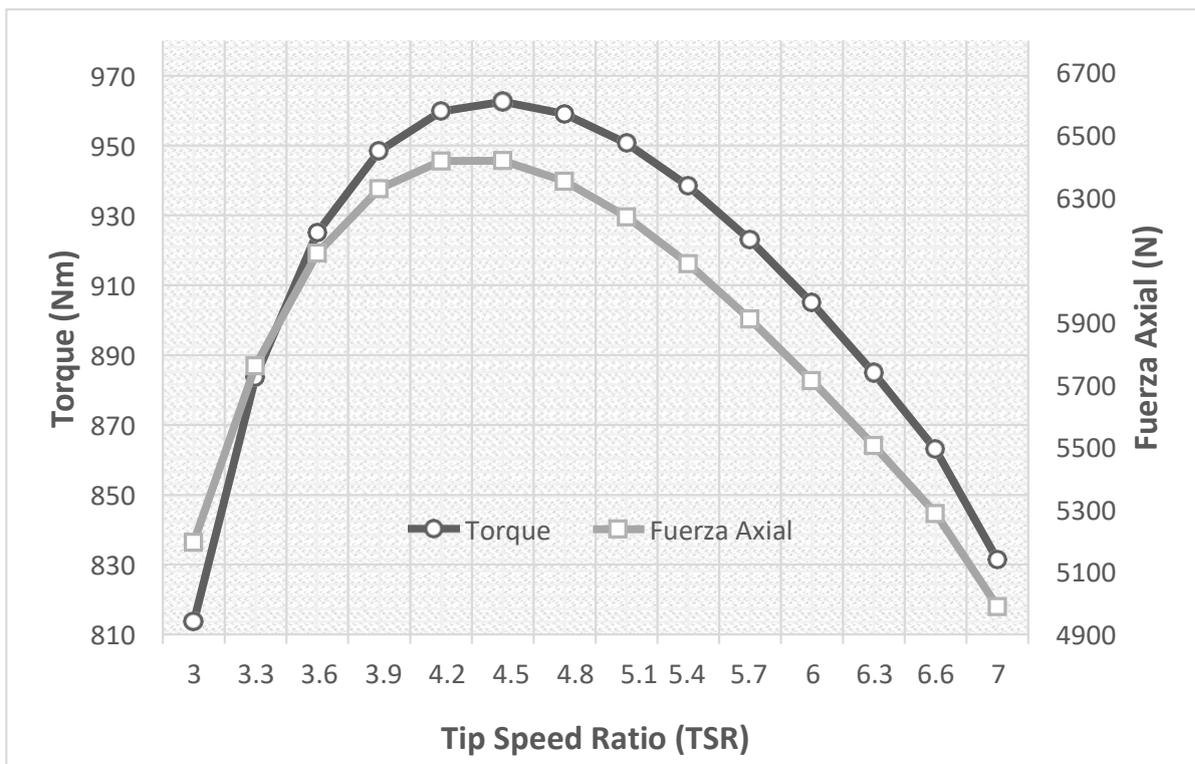


Figura 6.5. Torque y fuerza axial vs TSR (Fuente: Elaboración Propia).

La celeridad del diseño de una THC llamada TSR por sus siglas en inglés, hace referencia a la velocidad de la punta del álabe del rotor, por lo que, conocer su valor óptimo ayuda a maximizar la potencia de salida y la eficiencia de la turbina. De acuerdo a los cálculos realizados, el TSR óptimo para el diseño es de 4. Se tiene que tener en

cuenta que si el rotor gira demasiado despacio, gran cantidad de agua pasará a través de las brechas de los álabes en lugar de dar energía a la turbina. Mientras que si el rotor gira demasiado rápido, el agua podría crear turbulencia o actuar como una pared sólida contra el agua.

Variando la celeridad del diseño (TSR), se obtiene los valores con los que la THC trabajaría en condiciones de alto y bajo giro. Con un valor de 4 (diseño propuesto), el torque tiene valor mínimo de 953.392Nm y una fuerza axial de 6367.206N.

## 6.2 Benchmarking

Con los resultados obtenidos, se establece el siguiente cuadro para determinar la eficiencia del diseño propuesto respecto a las demás fuentes de información referenciadas para este trabajo. Considerar que las dimensiones no son las mismas y se toma como comparación sólo a seis de las diez inicialmente propuestas porque estas son las que más se acercan al tipo de aplicación y a las condiciones de trabajo que el diseño propone, es por eso que el valor de comparación principal viene a ser el coeficiente de potencia obtenido.

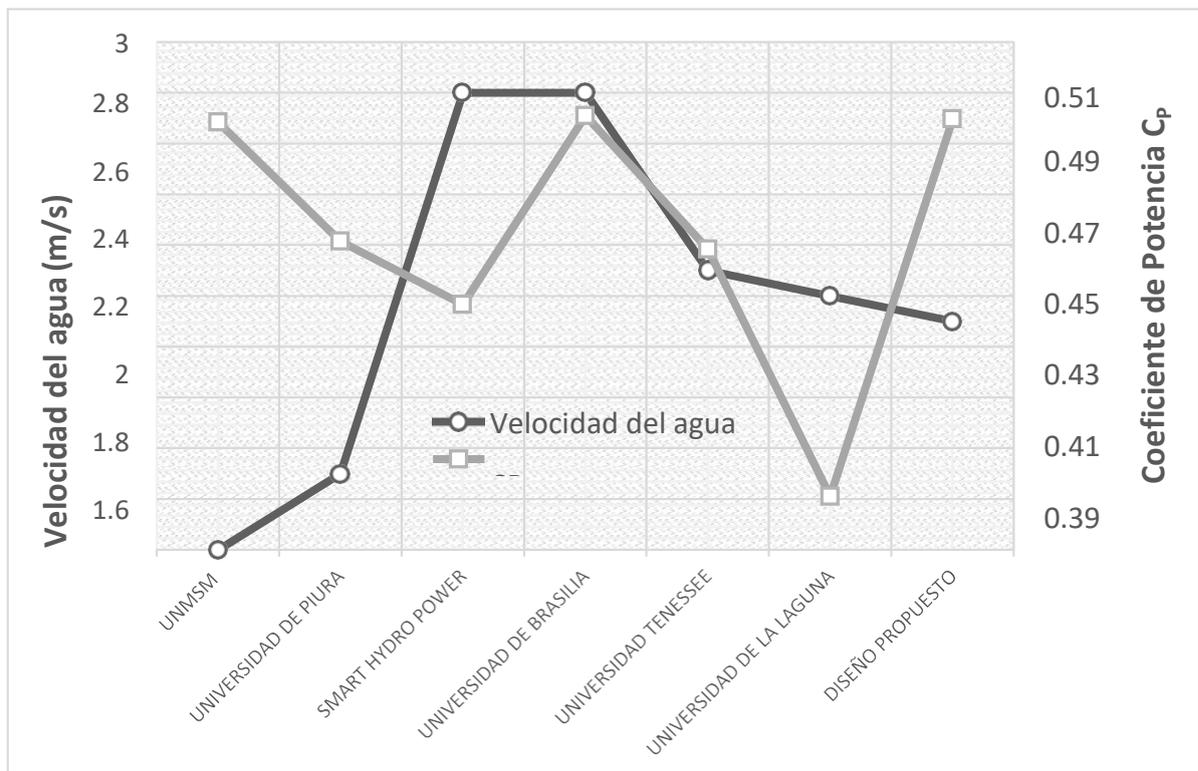


Figura 6.6. Torque y fuerza axial vs TSR (Fuente: Elaboración Propia).

Entre las seis comparaciones se establece que el diseño propuesto está dentro de los valores óptimos que se manejan en la industria tanto para el coeficiente de potencia como la potencia misma generada. Sin embargo, se tiene que tener en cuenta que esta potencia aún no cuenta con las pérdidas de energía que se generarán en el sistema de transmisión mecánico y en la del generador (son mínimas pero reducen la potencia real calculada).

	Potencia Real	Longitud del álabe (m)	Velocidad del agua (m/s)	Velocidad de giro (rpm)	Número de álabes	Celeridad (TSR)	Ángulo de ataque (alpha)	Coefficiente de sustentación $C_L$	Perfil NACA	Coefficiente de potencia $C_P$
UNMSM	2000.00	0.93	1	48	3	5	7	0.88	23012	0.5007
UNIVERSIDAD DE PIURA	1000.00	1.39437205	1.3	18	3	4	3.15	1.101	4412	0.45883
SMART HYDRO POWER	5000.00	0.45	2.8	150	3	5	7	1.101	4412	0.4365
UNIVERSIDAD DE BRASILIA	5000.00	1	2.8	100	3	4	7	0.88	23012	0.503
UNIVERSIDAD TENESSEE	35000.00	2.5	2.1	27	3	5.7	7	0.88	23012	0.456
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	2000.00	0.7	2	80	3	5	7	1.101	4412	0.369
DISEÑO PROPUESTO	7787.44	1.2	1.9	78	3	7	4	1.101	4412	0.501939

Tabla 6.1. Comparativa de resultados de acuerdo a fuentes de información.

(Fuente: Elaboración Propia)

Los valores en rojo hacen referencia a que este dato no se obtuvo de la fuente de información, por lo que se tuvo que inferir en este para hacer el cálculo del coeficiente de potencia.

## CAPÍTULO VII

### CONCLUSIONES

1. Se aplica la metodología de procesos de desarrollo genérico de Ulrich y Eppinger, donde se hace el diseño del rotor y estructura de una turbina hidrocínética con la evaluación de cinco pasos fundamentales y se profundiza en las oportunidades, necesidades y especificaciones que son requeridas para su correcta aplicación. Esto, trae en consecuencia un correcto procedimiento de diseño para llegar a valores específicos para determinar la operación correcta de lo diseñado en el río escogido.
2. El estudio se centra en las diez comunidades que tienen a río Santiago como su principal fuente de recurso. En esta, se trabajó con 110 necesidades encontradas y 77 métricas interpretadas para la elaboración del diseño. Se calculó la demanda de energía con un total de 203.8kW por mes donde se incluye desde la comunidad con menos pobladores que es Papayacu (134) hasta la más poblada que es Yutupis (1360).
3. Se hace el diseño de un rotor con un diámetro de 2.82m y una longitud de álabe de 1.2m, este álabe es dividido en 8 partes para su evaluación mediante la teoría BEM y es sometido a valores estándar de diseño para que cumpla las especificaciones finales: ángulo de ataque = 7, celeridad (TSR) = 4, perfil NACA 4412, coeficiente de sustentación = 1.101, velocidad de giro = 78RPM y una velocidad de río de 1.9m/s. Con estos valores se genera una potencia igual a 7787.44W y un coeficiente de potencia igual a 0.501939.
4. Se hace el estudio y el análisis general de las teorías del momento angular, del elemento del álabe y del momento del elemento del álabe (BEM) para determinar la geometría, fuerzas y coeficientes necesarios para el correcto diseño de una turbina. En suma, se hace el estudio y comparación de los perfiles hidrodinámicos más usados por la industria para esta aplicación y mediante la evaluación del BEM, se establece que el perfil NACA 4412 es el más adecuado para el diseño propuesto.
5. Centrados específicamente en la teoría BEM, se encuentra los factores de inducción axial y tangencial con valores de 0.293 y 0.074 respectivamente,

certificando que la fuerza axial tiene que ser mayor a la tangencial debido a la rotación que se tiene que generar. Esto se comprueba de mejor forma en los coeficientes de sustentación y arrastre (0.924 y 0.008) ya que el de sustentación está directamente ligado al torque que hace girar al rotor y el de arrastre es el que impide el movimiento de los álabes.

6. En relación a los resultados obtenidos, se finaliza con que la instalación de 3 álabes es 7.26% más efectivo que uno de 4 álabes y 19.91% más que uno de seis álabes. Se comprueba la ley de Betz y se establece que el valor máximo a 1.9m/s es justamente los 7787.44W de energía captada por los álabes. Además, es preferible tener un ángulo de ataque de  $7^\circ$  para poder tener un mejor coeficiente de potencia, esto quiere decir que entre más empinado esté la posición de los álabes en el rotor, mayor va a ser la captación de energía al encuentro con el agua. Finalmente, se encuentra la velocidad de giro ideal con 78 rev/min para generar el torque y potencia necesaria en el sistema.
7. Se hace el diseño de la estructura general de la turbina, con tolerancias en los espacios que van a ser requeridos tanto para el sistema de transmisión como para el generador (ver sección Planos). Se considera dos recubrimientos: uno para la caja multiplicadora de engranajes que van a transformar los 78RPM de giro del rotor en los RPM de giro del generador, y un recubrimiento general que encierre a la caja multiplicadora y al generador. Además, este está unido a un esqueleto que va a ser usado de protección y de base para la caja y la base del generador.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Dávila, C.; Vilar, D.; Villanueva, G.; Quiroz, L. (2010). Manual para la evaluación de la demanda, recursos hídricos, diseño e instalación de microcentrales hidroeléctricas. Lima: Soluciones Prácticas, Perú.
- [2] Renewable Energy Policy Network, REN 21. (2016). Nuevas inversiones mundiales en energía renovable por tecnología. Reporte Anual 2016.
- [3] Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía SNMPE (2016). Reporte estadístico minero energético 2016. Lima, Perú.
- [4] Instituto Nacional de Estadística e Informática INEI. (2015). Encuesta Nacional de Hogares 2015: Electrificación de zonas rurales. Lima, Perú.
- [5] Ulrich, K., Eppinger, S. (2013). Product Design and Development 5th Edition. Mc Graw Hill Education.
- [6] Renewable Energy Policy Network, REN 21. (2016). Participación estimada de energía renovable en la producción de electricidad a nivel mundial hasta fines del 2015. Reporte Anual 2016.
- [7] Renewable Energy Policy Network, REN 21. (2016). Comparativa de la capacidad de energía hidráulica de acuerdo a países en desarrollo y emergentes. Reporte Anual 2016.
- [8] Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía SNMPE (2016). Reporte Estadístico Minero Energético 2016: Producción de electricidad a nivel nacional de acuerdo a tipo de instalación. Lima, Perú.
- [9] Instituto Nacional de Estadística e Informática INEI. (2015). Encuesta Nacional de Hogares 2015: Zonas rurales con mayor déficit de electricidad. Lima, Perú.

[10] Mitme, R. (2011). Perú: Subasta de Energías Renovables. Organismo Superior de la Inversión en Energía y Minería OSINERGMIN. Lima, Perú.

[11] U.S Department of Energy. (2016). Marine and Hydrokinetic Energy Projects. Wind and water power technologies office: Fiscal year 2008-2015. United States of America.

[12] Guney, MS. Kaygusuz, K. (2010). Hydrokinetic energy conversion systems: a technology status review. *Renewable Sustain Energy*. p. 2996-3004.

[13] M. Khan, M. Iqbal and J. Quaicoe, "River current energy conversion systems: Progress, prospects and challenges," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 2177, no. 93, p. 12, 2008.

[14] M. Khan, G. Bhuyan, M. Iqbal and J. Quaicoe, "Hydrokinetic energy conversion systems and assessment of horizontal and vertical axis turbines for river and tidal applications: A technology status review," *Applied Energy*, vol. 86, no. 10, 1823-1835.

[15] Christensen, Clayton M., *The Innovator's Dilemma: When New Technologies Cause Great Firms to Fail*, Harvard Business School Press, Boston, 1997.

[16] World Wide Found for Nature, WWF. (2011). El informe de la energía renovable: 100% de energía renovable para el año 2050. 1196 Gland, Switzerland.

[17] Terwiesch, Christian y Karl T. Ulrich. (2009). *Innovation Tournaments: Creating and Identifying Exceptional Opportunities*, Harvard Business Press, Boston, United States of America.

[18] Crawford, C. Merle y Anthony Di Benedetto. (2008). *New Products Management*, novena edición, McGraw-Hill, Nueva York.

[19] Sanchez, T, Escobar, R. (2012). Microcentrales hidroeléctricas: cartilla informativa para la generación de energía eléctrica. Soluciones Prácticas. Lima, Perú.

[20] Sanchez, T, Escobar, R. (2012). Microcentrales hidroeléctricas: cartilla informativa para la generación de energía eléctrica. p. 6-11. Soluciones Prácticas. Lima, Perú.

[21] Sanchez, T, Escobar, R. (2012). Microcentrales hidroeléctricas: cartilla informativa para la generación de energía eléctrica. p. 10-12. Soluciones Prácticas. Lima, Perú.

[22] Sistema de información sobre comunidades nativas de la Amazonía Peruana SICNA. (2017). Registro anual de comunidades. Lima, Perú.

[23] Sistema de información sobre comunidades nativas de la Amazonía Peruana SICNA. (2017). Registro de necesidades básicas de acuerdo a la variación de número de familias. Lima, Perú.

[24] Ulrich, K., Eppinger, S. (2013). Product Design and Development 5th Edition. Mc Graw Hill Education. p. 120-121.

[25] Ulrich, K., Eppinger, S. (2013). Product Design and Development 5th Edition. Mc Graw Hill Education. p. 18-19.

[26] Dávila, C.; Vilar, D.; Villanueva, G.; Quiroz, L. (2010). Manual para la evaluación de la demanda, recursos hídricos, diseño e instalación de microcentrales hidroeléctricas. p. 19-32. Lima: Soluciones Prácticas, Perú.

[27] Ulrich, K., Eppinger, S. (2013). Product Design and Development 5th Edition. Mc Graw Hill Education. p. 148-149.

[28] Hansen L. Martin. (2008). Aerodynamics of Wind Turbines. Second Edition. Mc. Graw Hill Education.

[29] Khan, MJ. Bhuyan, G. Iqbal, MT. Quaicoe, JE. (2009). Hydrokinetic energy conversion systems and assesment of horizontal and vertical axis turbines for river and tidal applications: a technology status review. Applied Energy.

[30] Raymod A. Serway y John W. Jewett, Jr. (2013) Física para Ciencias e Ingeniería, Volumen 1, 7° edición. Cengage Learning.

[31] Gasch, R. Twele, J. (2011). Wind Power Plants: Fundamentals, Design, Construction and Operation. Second edition, Springer Editorial. Berlín, Alemania.

[32] Amarante, A. Amarante, A. Coutinho, F. Pinheiro, J. (2014). A methodology for the transient behavior of horizontal axis hydrokinetic turbines. University of Brasilia. Brasilia, Brazil.

## ANEXOS

### Anexo 2.1 Representantes de la tecnología hidrocínética a nivel mundial.

THC	Fabricante	Ubicación	Nombre del dispositivo	Página Web
1	Atlantis Resources	Escocia	MeyGen Project HKT	<a href="http://www.meygen.com/">http://www.meygen.com/</a>
2	Blue Energy	Canada	Davis Turbine	<a href="http://www.bluenergy.com">www.bluenergy.com</a>
3	Bourne Energy	Malibu, CA	Riverstar	<a href="http://www.bourneenergy.com">www.bourneenergy.com</a>
4	Clean Current	Canada	Clean Current Turbine	<a href="http://www.cleancurrent.com">www.cleancurrent.com</a>
5	Current to Current	Burlington MA	Submersible Power Generator	<a href="http://www.currenttocurrent.com">www.currenttocurrent.com</a>
6	Free Flow Power	Manchester, MA		<a href="http://www.free-flow-power.com">www.free-flow-power.com</a>
7	Hammerfest Strom	Norway	Hammerfest Strom Turbine	<a href="http://www.tidevannsennergi.com">www.tidevannsennergi.com</a>
8	Hydro Green Energy	Houston, TX	HydroGreen Turbine	<a href="http://www.hgenergy.com">www.hgenergy.com</a>
9	Lucid Energy	Goshen, IN	Lucid Energy Turbine	<a href="http://www.lucidenergy.com">www.lucidenergy.com</a>
10	Lunar Energy Ltd	United Kingdom	RTT	<a href="http://www.lunarenergy.co.uk">www.lunarenergy.co.uk</a>
11	Marine Current Turbines Ltd	United Kingdom	Seaflow SeaGen	<a href="http://www.marineturbines.com">www.marineturbines.com</a>
12	Natural Currents	Highland, NY	Natural Current Vertical Axis Turbine	<a href="http://www.naturalcurrents.com">www.naturalcurrents.com</a>
13	Neptune Renewables	United Kingdom		<a href="http://www.neptunerenewableenergy.com">www.neptunerenewableenergy.com</a>
14	Oceana	Washington DC		<a href="http://www.oceanaenergy.com">www.oceanaenergy.com</a>
15	Ocean Flow Energy	United Kingdom	EvapodTM	<a href="http://www.oceanflowenergy.com">www.oceanflowenergy.com</a>
16	Open Hydro	Ireland	Open Center Turbine (OCT)	<a href="http://www.openhydro.com">www.openhydro.com</a>
17	Ocean Renewable Power	Fall River, MA	OCGenTM	<a href="http://www.oceanrenewablepower.com">www.oceanrenewablepower.com</a>
18	Pulse Generation	United Kingdom	Pulse Generation	<a href="http://www.pulsegeneration.co.uk">www.pulsegeneration.co.uk</a>
19	Ponte di Archimeda	Italy	Enemar	<a href="http://www.pontediarchimede.com">www.pontediarchimede.com</a>
20	Seapower Int'l AB	Sweden	EXIM TM	<a href="http://www.seapower.se">www.seapower.se</a>
21	Sea Snail	United Kingdom	Sea Snail	<a href="http://www.rgu.ac.uk">www.rgu.ac.uk</a>
22	Scots Renewables	United Kingdom	SRTP	<a href="http://www.scotrenewables.com">www.scotrenewables.com</a>
23	SMD Hydrovision	United Kingdom	TidEl	<a href="http://www.smd.co.uk">www.smd.co.uk</a>
24	Startkraft	Norway	Statkraft	<a href="http://www.statkraft.com">www.statkraft.com</a>
25	Smart Hydro Power	Germany	Hydrokinetic Turbine	<a href="http://www.smart-hydro.de">http://www.smart-hydro.de</a>
26	Tidal Generation Limited	United Kingdom	Tidal Generation Turbine	<a href="http://www.tidalgeneration.co.uk">www.tidalgeneration.co.uk</a>
27	Tidal Hydraulic	United Kingdom	Tidal Hydraulic Generator (THG)	<a href="http://www.dev.onlinemarketinguk.net/THG/">www.dev.onlinemarketinguk.net/THG/</a>
28	Tidal Sails	Norway	Tidal Sail	<a href="http://www.tidalsails.com">www.tidalsails.com</a>
29	Tidal Stream	United Kingdom	Tidal Stream Device	<a href="http://www.tidalstream.co.uk">www.tidalstream.co.uk</a>
30	UEK	Annapolis, Maryland	Underwater Electric Kite	<a href="http://www.uekus.com">www.uekus.com</a>
31	Verdant Power	Arlington, VA	Kinetic Hydro Power System	<a href="http://www.verdantpower.com">www.verdantpower.com</a>
32	Vortex Hydro Energy	Ypsilanti, MI	Vivaci	<a href="http://www.vortexhydroenergy.com">www.vortexhydroenergy.com</a>
33	Woodshed Technologies	Australia	Tidal DelayTM	<a href="http://www.woodshedtechnologies.com.au">www.woodshedtechnologies.com.au</a>
34	Schootel Industries	Alemania/Colombia	Hydrokinetic Turbine	<a href="http://www.schottel.de">www.schottel.de</a>

## Anexo 3.1 Identificación de Oportunidades.

Establecer un compromiso de innovación PASO 1	Generar y percibir muchas oportunidades PASO 2	Filtrar Oportunidades PASO 3	Desarrollar oportunidades prometedoras PASO 4	Seleccionar oportunidades excepcionales PASO 5	Reflexionar sobre los resultados y el proceso PASO 6
Diseñar un sistema mecánico en la categoría de equipos electromecánicos para minicentrales hidroeléctricas por tiempo de un año. 1	T1 Formas no convencionales para generar electricidad: Fuente renovable de energía. 1				
Diseñar una máquina que genere energía a través de un proceso de diseño específico nunca antes aplicado para el diseño mecánico. 2	T1 Uso de energía cinética como nueva tecnología para minicentrales hidroeléctricas. 2	Uso de energía cinética como nueva tecnología para minicentrales hidroeléctricas. 2	Uso de energía cinética como nueva tecnología para minicentrales hidroeléctricas. 2	RGV Uso de energía cinética como nueva tecnología para minicentrales hidroeléctricas. 2	Uso de energía cinética como nueva tecnología para minicentrales hidroeléctricas. 2
Diseñar un sistema mecánico como el de las centrales hidroeléctricas, que soporte condiciones extremas que puede tener un río de la selva amazónica. 3	T1 Acceso de energía a zonas rurales: Ampliar la frontera eléctrica en zonas aisladas. 3	Acceso de energía a zonas rurales: Ampliar la frontera eléctrica en zonas aisladas. 3			
Crear una máquina flotante que produzca energía y que pertenezca a la rama de centrales hidroeléctricas. 4	T1 Demanda de energía en zonas rurales que son bajas respecto a las grandes urbes. 4				
Diseñar un equipo mecánico como el de las centrales hidroeléctricas, a través de un proceso de diseño exclusivo y que sea aplicable para diferentes condiciones. 5	T1 Proyección del número de viviendas rurales necesitadas de electrificación. 5				
	T1 Sistema electromecánico autónomo para satisfacer demanda de electricidad. 6	Sistema electromecánico autónomo para satisfacer demanda de electricidad. 6			
	T2 2.1 Principio de las turbinas eólicas para ser aplicables en el agua. (ITDG) 7	Principio de las turbinas eólicas para ser aplicables en el agua. (ITDG) 7	Principio de las turbinas eólicas para ser aplicables en el agua. (ITDG) 7	RG Principio de las turbinas eólicas para ser aplicables en el agua. (ITDG) 7	Principio de las turbinas eólicas para ser aplicables en el agua. (ITDG) 7
	T2 2.1 Generación de energía en un río para que esté cerca de alguna comunidad. (SOLUCIONES PRÁCTICAS) 8	Generación de energía en un río para que esté cerca de alguna comunidad. (SOLUCIONES PRÁCTICAS) 8	Generación de energía en un río para que esté cerca de alguna comunidad. (SOLUCIONES PRÁCTICAS) 8	RV Generación de energía en un río para que esté cerca de alguna comunidad. (SOLUCIONES PRÁCTICAS) 8	Generación de energía en un río para que esté cerca de alguna comunidad. (SOLUCIONES PRÁCTICAS) 8
	T2 2.1 Adaptación del diseño de generadores de energía en mares para que sean aplicables en ríos. (SCHOTTEL) 9				
	T2 2.2 Implementación de una central completa en toda una zona rural. 10				
	T2 2.3 Diseño de una picocentral hidroeléctrica a través de un sistema electromecánico. 11	Diseño de una picocentral hidroeléctrica a través de un sistema electromecánico. 11	Diseño de una picocentral hidroeléctrica a través de un sistema electromecánico. 11	RGV Diseño de una picocentral hidroeléctrica a través de un sistema electromecánico. 11	Diseño de una picocentral hidroeléctrica a través de un sistema electromecánico. 11
	T2 2.4 Comprobar el diseño de turbinas aplicables en mares para que se usen en ríos de la selva. 12	Comprobar el diseño de turbinas aplicables en mares para que se usen en ríos de la selva. 12	Comprobar el diseño de turbinas aplicables en mares para que se usen en ríos de la selva. 12		
	T3 Costo de inversión inicial bajo para el equipamiento de algún sistema para este caso. 13				
	T3 Fácil transporte de la máquina al sitio de instalación. 14				
	T3 Bomba con factor de seguridad y eficiencia alta. 15				
	T3 Turbina con mecanismo simple y fácil de poder entender su funcionamiento. 16	Turbina con mecanismo simple y fácil de poder entender su funcionamiento. 16	Turbina con mecanismo simple y fácil de poder entender su funcionamiento. 16		
	T3 Sistema que satisfaga la demanda y que tenga un ratio adicional para caso de emergencias. 17				
	T3 Diseño de un sistema que no contamine el ambiente ni que produzca gases o humo en su funcionamiento. 18				
	T4 4.1 Sistema que sea ligero y que no contenga muchas piezas en su ensamble. 19				
	T4 4.2 Utilización de la energía potencial en alturas mínimas para el diseño del sistema. 20	Utilización de la energía potencial en alturas mínimas para el diseño del sistema. 20			
	T4 4.2 Uso de la energía cinética para mayor rango de aplicación en la creación del sistema. 21				
	T4 4.3 Turbina/Bomba que sea ligero y que aproveche la energía cinética para conversión de energía. 22	Turbina/Bomba que sea ligero y que aproveche la energía cinética para conversión de energía. 22	Turbina/Bomba que sea ligero y que aproveche la energía cinética para conversión de energía. 22		
	T4 4.3 Diseño de una turbina que nunca se haya aplicado en una cascada o un río. 23				
	T4 4.4 Sistema que genere energía en ríos, que sea ligero, aproveche la energía potencial y que sea automatizado. 24	Sistema que genere energía en ríos, que sea ligero, aproveche la energía potencial y que sea automatizado. 24			
	T5 Electrificación para todas las zonas en las que no ha llegado el estado. 25				
	T5 Diseño de un sistema que apoye a la red energética pero que no contamine el ambiente. 26				
	T5 Aumentar el alcance de la electricidad a todas las personas, en especial, a las de menos recursos económicos. 27	Aumentar el alcance de la electricidad a todas las personas, en especial, a las de menos recursos económicos. 27	Aumentar el alcance de la electricidad a todas las personas, en especial, a las de menos recursos económicos. 27		
	T5 Cumplimiento del Plan Energético Nacional mediante la implementación de proyectos de investigación por entidades universitarias. 28				
	T5 Investigación de nuevas tecnologías adaptables para zonas rurales del país. 29	Investigación de nuevas tecnologías adaptables para zonas rurales del país. 29			
	T5 Negocio de fuentes energéticas para abastecimiento de necesidades básicas en personas de bajos recursos económicos. 30				
	T6 Una bomba que sea de fácil uso para cualquier persona y que no tenga problemas en su mantenimiento. 31				
	T6 Sistema que sea de permanente atención por la ayuda que va a dar, es decir, que sea multifuncional por todos. 32				
	T6 Turbina que no requiera altura por posibles problemas en seguridad. Además, que sea de fácil uso y fácil mantenimiento. 33	Turbina que no requiera altura por posibles problemas en seguridad. Además, que sea de fácil uso y fácil mantenimiento. 33	Turbina que no requiera altura por posibles problemas en seguridad. Además, que sea de fácil uso y fácil mantenimiento. 33		
	T6 Sistema que no sea tan sofisticado y que tenga una estructura ergonómica eficiente. 34	Sistema que no sea tan sofisticado y que tenga una estructura ergonómica eficiente. 34			
	T6 Implementación del sistema que englobe el trabajo de toda una comunidad para su instalación. 35				
	T6 Generación de puestos de trabajo para la fabricación, montaje e instalación del sistema (bomba, generador, turbina, etc). 36				
	T7 Sistema que implique parámetros de diseño específicos de acuerdo a las necesidades del cliente. 37	Sistema que implique parámetros de diseño específicos de acuerdo a las necesidades del cliente. 37	Sistema que implique parámetros de diseño específicos de acuerdo a las necesidades del cliente. 37	RG Sistema que implique parámetros de diseño específicos de acuerdo a las necesidades del cliente. 37	Sistema que implique parámetros de diseño específicos de acuerdo a las necesidades del cliente. 37
	T7 Búsqueda de apoyo por parte de instituciones comprometidas con el desarrollo de energías renovables. 38	Búsqueda de apoyo por parte de instituciones comprometidas con el desarrollo de energías renovables. 38			
	T7 Soluciones Prácticas es una organización que apoya el desarrollo de las RER y que ayudaría para diseñar una. 39				
	T7 UTEC como primera institución a nivel nacional que investigue de manera profunda el diseño de turbinas para ríos. 40	UTEC como primera institución a nivel nacional que investigue de manera profunda el diseño de turbinas para ríos. 40	UTEC como primera institución a nivel nacional que investigue de manera profunda el diseño de turbinas para ríos. 40		
	T7 Competencias para poder destacar cuál sería un sistema aplicable en ríos para ayudar a comunidades de bajos recursos económicos. 41				
	T7 Encuestas para obtener resultados del desarrollo de un proyecto de este tipo, por lo que, solo sería investigación. 42				

Anexo 3.2 Identificación de Necesidades.

Directriz	Frase / Enunciado	Necesidad interpretada
<b>"QUÉ"</b>	"¿Por qué no lo hacen más fácil de usar y poder mantenerlo?"	Las condiciones del río determinan las medidas de los álabes y de la estructura.
	"No entendemos cuando vienen a aplicar su tecnología, ni siquiera sabemos cómo es por dentro"	La THC tiene planos de ingeniería fáciles de entender y que están de acuerdo a la norma.
<b>"ESPECIFICIDAD"</b>	"Nunca dura este tipo de proyectos en esta zona"	La THC tiene una selección de materiales óptima para que el equipo trabaje normalmente por años.
	"¿Qué pasaría si cuando se quiere operar la máquina, alguien se accidenta?"	La THC cuenta con un sistema de anclaje fácil de operar en caso se requiera hacerle alguna reparación internamente.
	"Cómo harán para que no haya cortocircuitos o que el agua se meta en el sistema eléctrico"	La THC cuenta con un recubrimiento que es de un material de bajo peso y que es difícil de corroerse.
	"Van a tener cuidado de no matar a los animales"	La THC cuenta con un sistema que no permite la entrada de los animales a los álabes.
<b>"POSITIVA"</b>	"No importa si viene más caudal o si hay época de estiaje, eso debería seguir funcionando"	La THC cuenta con condiciones de trabajo mínimas y máximas para poder cumplir la demanda de electricidad y por seguridad.
	"Imagino que este equipo no vendrá a hacerme bulla por acá"	La THC no emite sonidos de gran intensidad y está en el rango de dB considerables para una persona.
	"No porque esté el equipo, voy a dejar de usar el agua para mi comida o para bañarme"	La THC no interviene en cambiar la dirección de los canales ni de contaminar el agua.
<b>"ATRIBUTO"</b>	"Me gustaría poderle hacer su mantenimiento con mis hijos y que ellos entendieran más eso"	La THC cuenta con un manual de partes y medidas, como también de las recomendaciones para su mantenimiento.
	"No sé que es lo que les diferencia a ustedes de esas empresas que hacen grandes turbinas"	La THC es considerada una RER y cumple las normas peruanas que legislan este tipo de tecnologías.
	"¿Qué pasa si es muy grande o muy pequeño?"	La THC es un equipo ergonómico y que se acopla de acuerdo a las condiciones de uso.
	"Va a costar mucho para todos tenerlo acá"	La THC no es de un costo inicial alto y cuenta con componentes que no generan mayor gasto tanto de inversión como de mantenimiento.
	"Si no funciona en este río, como sé que funcionará en otros"	La THC es aplicable para diferentes ríos de acuerdo a las condiciones de cada una de estas.
	"Se supone que deberá quedarse solo por esta zona y no moverse hacia otros lados"	La THC tiene una ubicación específica y con una estructura que no permite que la turbina se desplace.
	"La idea es que tengamos electricidad todo el día y podamos controlar el consumo"	La THC tiene un sistema de reserva de energía.
<b>"DEBE Y DEBERÍA"</b>	"No tendría ni la menor idea si el equipo corre peligro por temperatura, presión, etc."	La THC cuenta con una pantalla externa que indica que sus parámetros de funcionamiento estén en buenas condiciones.
	"Si se malogra de un momento a otro, ¿Cómo me doy cuenta de eso?"	La THC cuenta con un sistema de emergencia y apagado automático para evitar problemas.

Anexo 3.3 Lista de métricas.

Número de métrica	Necesidades	Métrica	Importancia	Unidades
1	6,17,25,50	Masa total	3	kg
2	1	Diámetro máximo del rotor	3	m
3	2,53	Color identificador de las partes de la máquina	5	Lista
4	3	Velocidad del agua (sólo el valor fijo en época de estiaje y avenida)	1	m/s
5	8	Tiempo de montaje y desmontaje del sistema	3	Hr
6	10,57	Vida útil del equipo	1	años
7	7	Área de captación del agua (barrido)	1	m <sup>2</sup>
8	7	Valores máximos de movimiento	1	Nm
9	5	Materiales de uso de los álabes y el buje.	5	Lista
10	7	Fuerzas axiales y tangenciales de los álabes	1	N
11	4	Velocidad de giro del rotor	1	min <sup>-1</sup>
12	9	Número de Reynolds para analizar turbulencia	5	Re
13	11,14	Rigidez de los soportes	5	kN/m
14	13	Tiempo de montaje del sistema	1	Hr
15	15	Tiempo de mantenimiento de piezas	3	Hr
16	16	Resistencia del material a choques	5	kN
17	18,19	Valor máximo de energía debido a pérdidas mecánicas	1	kW
18	12	Fuerza que se genera al eje principal	1	N
19	20	Tamaño del sistema en general	3	mm
20	21,24,26	Tipo de instalación	1	Lista
21	22,27	Sistema de seguridad para cortocircuitos y sobrecargas	3	Lista
22	29	Voltaje de instalación para trabajo continuo	1	V
23	30	Pérdidas de energía por alternador	5	%
24	31,36	Resistencia de las fuerzas externas del eje principal	1	N/mm <sup>2</sup>
25	32,37,39	Material del eje principal y de su recubrimiento	3	Lista
26	33	Diámetro máximo del eje principal	1	pulgadas
27	34,35,38,40	Condiciones de fabricación del eje	3	Lista
28	41,45,46	Presión necesaria para evitar paso de animales, sólidos y sedimentos	1	kPa
29	42	Elementos de unión del sistema de protección al rotor	5	Lista
30	43	Dimensiones del sistema de protección acorde al tamaño de los álabes	3	m
31	44	Turbulencia máxima de paso hacia los álabes	1	m/s
32	47	Bio - criterios para dimensionar el sistema de protección	5	Lista
33	48,49,53,55,60	Material de la estructura, soportes y cubrimiento (carcasa)	3	Lista
34	51,52	Masa del soporte y estructura	3	kg
35	54	Volumen de agua necesario para el sistema en general	3	m <sup>3</sup>
36	56,62	Resistencia del cubrimiento a choques	3	N/mm <sup>2</sup>
37	58	Material de pernería en general	3	Lista
38	59	Tamaño de los agarres para el sistema de anclaje	1	mm
39	61	Tiempo de instalación del cubrimiento de la turbina	5	hr
40	63	Tipo de corriente a usar para transformación de energía	3	CA
41	64	Capacidad de batería de almacenamiento de energía	1	V
42	65,66	Cantidad de pérdidas eléctricas	3	W
43	67	Tipo de calor que genera el trabajo de la turbina	5	J
44	68,69	Características del sistema eléctrico	3	Lista
45	70	Tipo de conexión eléctrica	1	Fase
46	71	Temperatura máxima del trabajo de componentes	1	°C
47	72	Estándar de diseño para los componentes mecánicos	1	Lista
48	73	Facilidad de lubricación de componentes	5	Manual
49	74	Componentes de diseño y selección (primarios y secundarios)	5	Lista
50	75	Velocidades de entrada y salida de los componentes	3	min <sup>-1</sup>
51	76	Tolerancias de diseño de componentes	5	pulgadas
52	77	Esfuerzos de contacto, por tensión, flexión, etc.	3	psi
53	78	Factor de seguridad y de confiabilidad del diseño	1	ad
54	79	Costos de materia prima	3	USD
55	80	Geometría del sistema	1	pulgadas
56	81,82	Aislamiento del cableado	1	ohm
57	83,84	Manual de uso del sistema eléctrico y cableado	3	Lista
58	85	Código de colores para uso y seguridad	5	Lista
59	86	Mínima y máxima velocidad de corriente útil	1	m/s
60	87	Profundidad mínima útil	1	m
61	88,90	Dimensiones del sistema de anclaje	3	m
62	89	Geolocalización del río escogido	5	GPS
63	91	Fijación y distribución de fuerzas en el sistema de anclaje	1	Lista
64	92,93,95,97,99,100	Sistema automatizado de control	1	Lista
65	94	Capacidad del regulador de carga	3	W
66	96	Tiempo de mantenimiento del sistema automatizado	5	hr
67	98	Contador de horas de trabajo y energía producida	1	Lista
68	101	Tamaño de la turbina	1	mm
69	102	Número de álabes de instalación	1	ad
70	103	Coefficiente de potencia	1	ad
71	104	Potencia generada por la turbina	1	kW
72	105	Energía generada por día	1	kWh/d
73	106	Torque generado por los álabes	1	Nm
74	107	Coefficiente de sustentación y arrastre de los álabes	1	ad
75	108	Celeridad de diseño	1	ad
76	109	Ángulo de ataque de los álabes	1	grado sexagesimal
77	110	Fuerza de arrastre	1	N

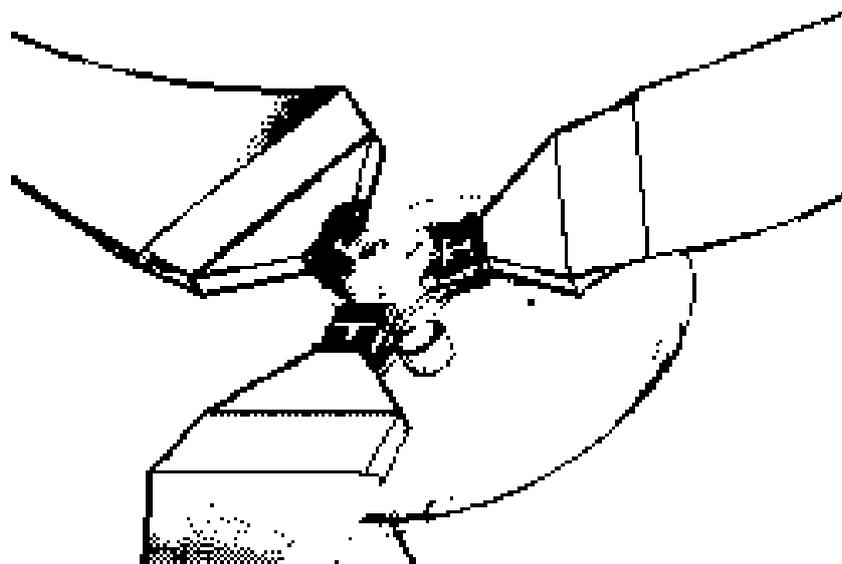
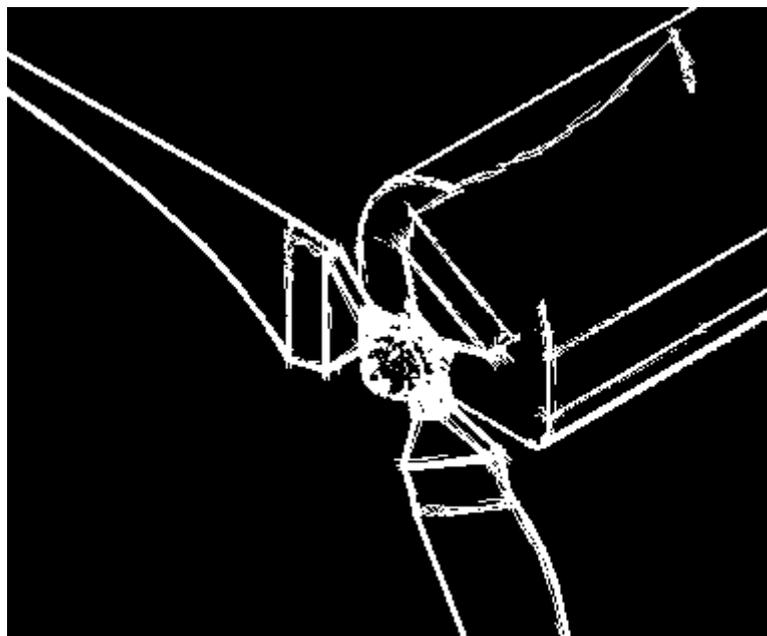
Anexo 3.4 Matriz necesidades – métricas.

Necesidad		Métrica	
1	2	1	2
1	Tiene una geometría acorde al río escogido	•	
2	Permite verlo con facilidad por el color	•	
3	Hace posibles cambios de velocidad debido a la velocidad del río	•	
4	Tiene un sensor de torque por seguridad		
5	Los álabes y el buje deben tener un material acorde al trabajo en ríos		
6	Es ligero en peso	•	
7	Debe haber un torque máximo de trabajo		
8	Es de fácil desmontaje	•	
9	No debe trabajar con fluido turbulento		
10	Tiene una larga vida útil por los materiales con los que se fabricó	•	
11	Contiene puntas rígidas de montaje para que no se desprendan las piezas		
12	Las fuerzas que se generan al eje no deben ser mayores		
13	Es fácil de instalar		
14	Trabajo con soportes internos fijos	•	
15	Su mantenimiento no es prolongado		
16	Es seguro por un posible choque		
17	No tiene un peso exagerado	•	
18	Se tiene pérdidas mínimas por rozamiento y fricción		
19	No tiene grandes pérdidas de energía por las piezas		
20	Cuenta con un espacio acorde al tamaño del rotor		
21	Tiene una conexión trifásica de fácil instalación	•	
22	Tiene un sistema para evitar cortocircuitos y sobrecargas		
23	Contiene un fácil mecanismo para el alineamiento		
24	Permite hacer la conexión al sistema eléctrico de fácil forma	•	
25	No es muy pesado	•	
26	Tiene una conexión de corriente alterna para su trabajo (CA)		
27	Soporta las cargas nominales propias del diseño de la turbina	•	
28	Cuenta con un soporte interno que está conectado al cubrimiento externo		
29	La relación voltaje vs frecuencia debe ser de forma lineal		
30	No tiene pérdidas mayores por conversión de energía		
31	Soporta las fuerzas externas que se ejercen sobre este		
32	No sufre desgaste mayor para evitar fatiga		
33	Considera el menor diámetro posible y con gran resistencia		
34	Cuenta con un alineamiento bien realizado		
35	Es fácil de fabricar		
36	Tiene gran resistencia con poco peso		
37	Resistente a la oxidación, es decir, un buen recubrimiento		
38	Debe tener acoples y rodamientos para fijar al soporte		
39	Su material debe soportar las cargas y condiciones de uso		
40	Cuenta con elementos de sujeción fáciles de montar		
41	No deja pasar animales a los álabes		
42	Forma de unión a la estructura del rotor		
43	No tiene una longitud prolongada		
44	Reduce la turbulencia de paso a los álabes		
45	No deja pasar sedimentos o sólidos de ningún tipo a los álabes		
46	No dejar pasar restos forestales al sistema en general		
47	Consideraciones del ambiente y biológicos para su diseño		
48	Tienen un material que no se corroe		
49	No contienen al sedimento		
50	No tienen demasiado peso	•	
51	No tiene problemas con la flotación		
52	Tiene dimensiones acorde al tamaño del rotor		
53	Deben ser de un color distinto a la turbina	•	
54	Hay un espacio necesario que se cubre con el sistema en general		
55	Contiene un material que no se corroe		
56	Es resistente a sólidos mayores		
57	Tiene una larga vida útil	•	
58	Tiene pernería con recubrimiento difícil de corroerse		
59	Trabajo con agarres para el sistema de anclaje		
60	No genera contaminación		
61	Es fácil de instalar		
62	Es resistente a un choque o volcadura		
63	Se cuenta con corriente alterna (CA) por su trabajo a distintos RPM		
64	Contiene una batería que almacena la energía eléctrica		
65	No tiene pérdidas por histéresis magnética		
66	Tiene pérdidas mínimas por resistencia eléctrica		
67	La generación de calor no debe ser relevante		
68	Tiene una red de distribución detallada		
69	Contiene fusibles como medida de emergencia alterna		
70	Tiene una conexión por conductores trifásicos		
71	No sobrepasan temperaturas de operación		
72	Respeto estándares de diseño		
73	Los cojinetes son de fácil lubricación		
74	Se sabe cuáles son los componentes que se diseñaron y seleccionaron		
75	Se tiene especificada la velocidad de entrada y salida		
76	Se tiene en cuenta las tolerancias de diseño de componentes		
77	Se tiene determinado si hay esfuerzos de cualquier tipo		
78	Cuenta con un factor de seguridad y de confiabilidad propio		
79	Es bajo en costos de material		
80	Tiene la geometría general del sistema		
81	Cuenta con aislamiento para poder evitar cortocircuitos al interior		
82	Contiene cubrimiento contra el agua en la parte exterior		
83	Tiene terminales de cables bien ajustados		
84	Tiene bornes de conexión para seguridad		
85	Cuenta con código de colores para seguridad e información		
86	Está ubicada en un río tal que se tiene una mínima velocidad de corriente útil		
87	Está ubicada en un río tal que se encuentra con una profundidad mínima útil		
88	Cuenta con un sistema de anclaje compacto y de fácil uso		
89	Está en una posición de acuerdo a la dirección del agua		
90	La THC cuenta en su exterior con puntos de amarre para el sistema de anclaje		
91	El sistema de anclaje no debe ser muy extendido ni muy corto		
92	Cuenta con un sistema de control electrónico para controlar el voltaje		
93	Tiene un sistema de protección para emergencias de paradas por fallas		
94	Contiene un regulador de carga en límites preestablecidos		
95	Cuenta con un panel que regula los parámetros de trabajo		
96	No tiene un mantenimiento prolongado		
97	Cuenta con botones de encendido y parada		
98	Cuenta con hidrómetro		
99	Tiene señalización por alto o bajo nivel de agua		
100	Tiene señalización por alta temperatura de cojinetes		
101	Se tiene las dimensiones generales de la turbina		
102	Se sabe el número de álabes de instalación		
103	Tiene un coeficiente de potencia alto para mejor eficiencia		
104	Genera una cierta cantidad de kW para cubrir demanda de electricidad		
105	Cumple con una cantidad de energía generada por día		
106	Tiene un torque generado por los álabes		
107	Contiene coeficientes hidrodinámicos óptimos para el trabajo de los álabes		
108	Existe una relación de velocidad en la punta de los álabes		
109	Cuenta con un ángulo de ataque que diferencia la velocidad del agua		
110	Tiene una fuerza de arrastre que se opone a la generación del torque		

Anexo 3.5 Identificación de modelos técnicos de la THC.

N°	PRIMERA ETAPA	SEGUNDA ETAPA (PRE)
1	Modelo estructural de la geometría de la turbina (Analítico)	Modelo de la dinámica de fluidos actuantes en los álabes (Analítico)
2	Modelo estático de la rigidez de la estructura y soportes (Analítico)	Modelo estático del sistema de transmisión (eje, engranajes, frenos, etc) (Analítico)
3	Modelo dinámico de las velocidades reales de ríos Amazónicos (Físico)	Modelo estructural de la geometría de la turbina (chasis, anclaje, etc) (Analítico)
4	Modelo dinámico del perfil hidrodinámico del perfil (Analítico)	Modelo estático de la rigidez de la estructura y los soportes (Analítico)
5	Modelo del diseño de álabes según teoría BEM (Analítico)	Modelo del diseño de los álabes según teoría BEM (Analítico)
6	Modelo energético de la producción de electricidad (Analítico)	Modelo del estudio hidrológico e hidráulico fluvial de los ríos Amazónicos (Analítico)
7	Modelo estático de la resistencia de materiales (Analítico)	Modelo de la selección del generador y el regulador de carga (Analítico)
8	Modelo estático de las cargas actuantes (Analítico)	Modelo energético de la producción de electricidad (Analítico)
9	Modelo dinámico de la velocidad del agua (Analítico)	Modelo geográfico de la localización de los ríos Amazónicos (Analítico)
10	Modelo de durabilidad de fatiga del eje de transmisión (Analítico)	Modelo de la mecánica de materiales general (momentos, fuerzas, deflexiones, esfuerzos, materiales, etc)
11	Modelo estático de las fuerzas generadas por los engranajes (Analítico)	Modelo del diseño del sistema de anclaje y flotación (Analítico)
12	Modelo dinámico del funcionamiento del rotor (Analítico)	Modelo estructural del sistema de protección (bio - criterios) (Analítico)
13	Modelo de durabilidad a la fatiga del eje (Analítico)	
14	Modelo estático del sistema de transmisión (Analítico)	
15	Modelo dinámico del comportamiento de la presión en las álabes (Analítico)	
16	Modelo computacional de la dinámica de fluidos en los álabes (Analítico)	
17	Modelo del estudio hidrológico e hidráulico fluvial de los ríos Amazónicos (Analítico)	
18	Modelo geográfico de la localización de ríos Amazónicos (Analítico)	
19	Modelo de las fuentes de carga presentes en la turbina (Analítico)	
20	Modelo energético de la producción de electricidad (Analítico)	
21	Modelo de los sistemas de seguridad y control (Analítico)	
22	Modelo de la selección del generador y el regulador de carga (Analítico)	
23	Modelo estructural del sistema de protección (bio - criterios) (Analítico)	

Anexo 3.6 Conceptos de solución de la THC.





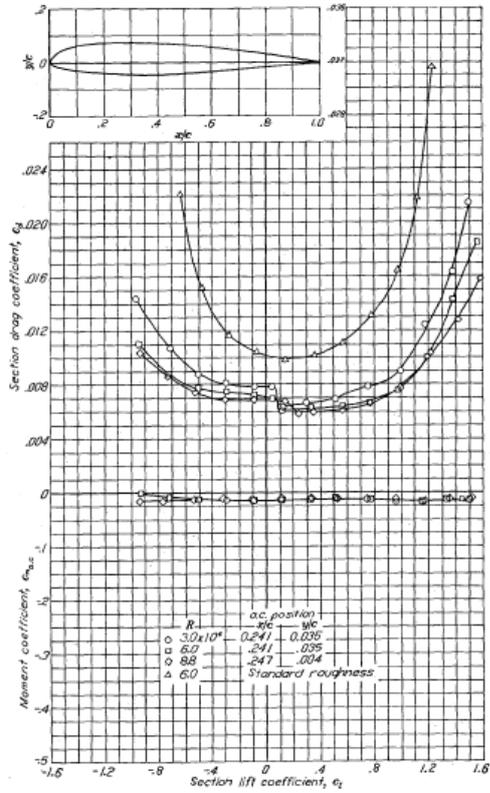
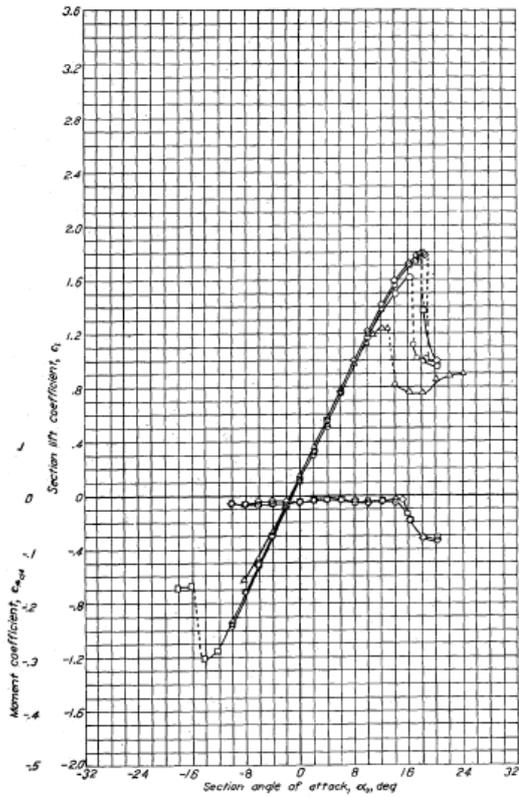
Cálculo de la electricidad promedio por horas de consumo.

Utilidad	Potencia Eléctrica		Cantidad de artefactos	Hrs de consumo en un día	Días de consumo al mes	Horarios de consumo (en horas)								Consumos de electricidad (kW)		
	Watts	kW				0-5	5-7	7-11	11-13	13-17	17-19	19-21	21-24	Día	Mes	Año
<b>Área Interna</b>																
Iluminación	20	0.02	3	6	30		2			2	2		0.36	10.8	129.6	
Refrigeradora	250	0.25	1	9	30			4	2	3			2.25	67.5	810	
Televisor 32"	120	0.12	1	6	30					2	2	2	0.72	21.6	259.2	
Plancha eléctrica	1000	1	1	2	8						2		2	16	192	
Radiograbadora	30	0.03	1	10	30			4	2	4			0.3	9	108	
Licudora	300	0.3	1	0.5	12				0.5				0.15	1.8	21.6	
Hervidora	50	0.05	1	1	30						1		0.05	1.5	18	
<b>Total Área Interna</b>												<b>5.83</b>	<b>128.2</b>	<b>1538.4</b>		
<b>Área Externa</b>																
Alumbrado público	100	0.1	1	12	30	5	1			1	2	3	1.2	36	432	
Patio	20	0.02	1	6	30					1	2	3	0.12	3.6	43.2	
Comunicaciones	300	0.3	1	4	30					2	2		1.2	36	432	
Otros																
<b>Total Área Externa</b>												<b>2.52</b>	<b>75.6</b>	<b>907.2</b>		
<b>Total final</b>												<b>8.35</b>	<b>203.8</b>	<b>2445.6</b>		

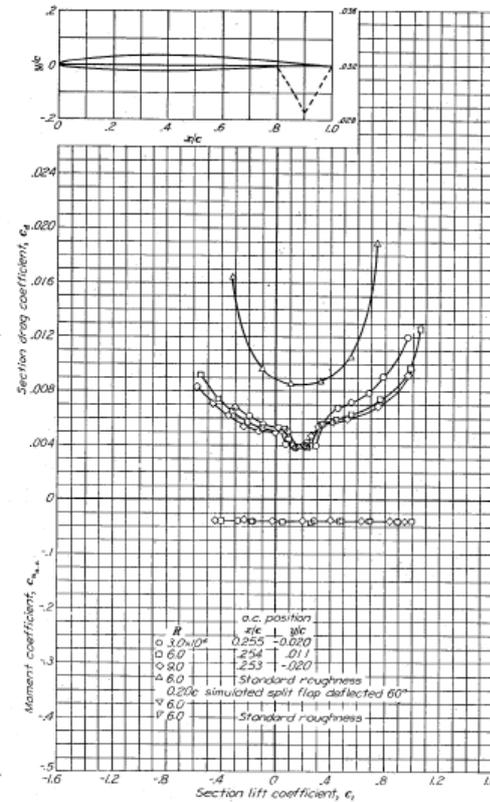
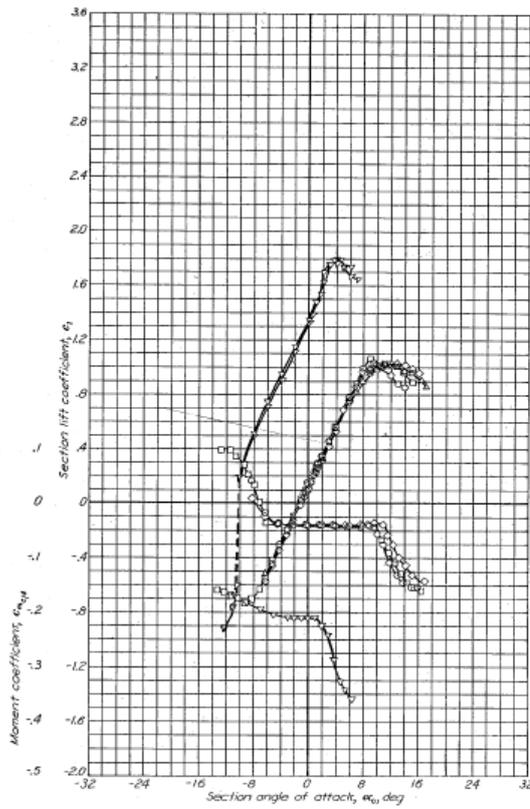
Demanda de electricidad mensual y anual.

Comunidad	Número de Familias	MENSUAL		ANUAL	
		Consumo total por comunidad	Consumo total (MW)	Consumo total por comunidad	Consumo total (MW)
San Juan	40	8,152.00	8.15	97,824.00	97.82
Belén	60	12,228.00	12.23	146,736.00	146.74
Fortaleza	22	4,483.60	4.48	53,803.20	53.80
Guayabal	65	13,247.00	13.25	158,964.00	158.96
Yutupis	392	79,889.60	79.89	958,675.20	958.68
Villa Gonzalo	80	16,304.00	16.30	195,648.00	195.65
Alianza Progreso	56	11,412.80	11.41	136,953.60	136.95
Soledad	23	4,687.40	4.69	56,248.80	56.25
Candungos	70	14,266.00	14.27	171,192.00	171.19
Papayacu o San Martín	24	4,891.20	4.89	58,694.40	58.69
<b>Total para Rio Santiago</b>	<b>832</b>	<b>169,561.60</b>	<b>169.56</b>	<b>2,034,739.20</b>	<b>2,034.74</b>

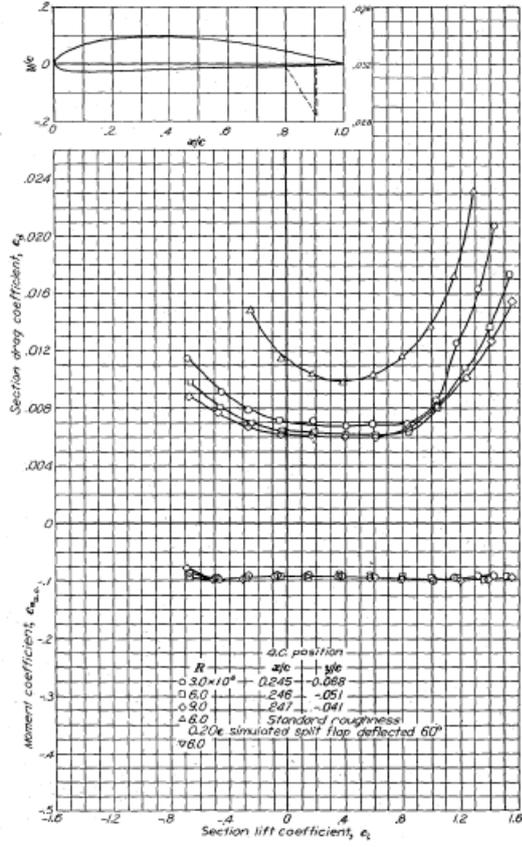
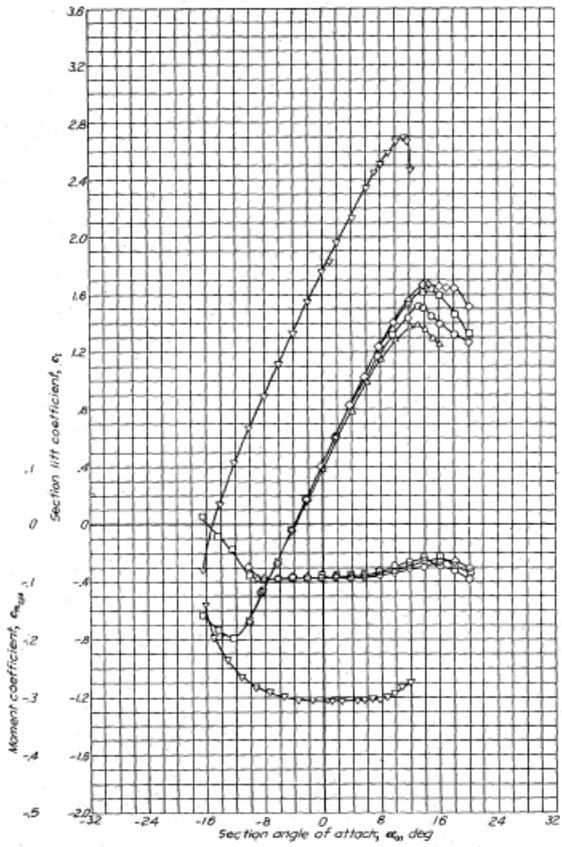
## Anexo 5.1 Selección de coeficientes de sustentación y arrastre.



NACA 23012



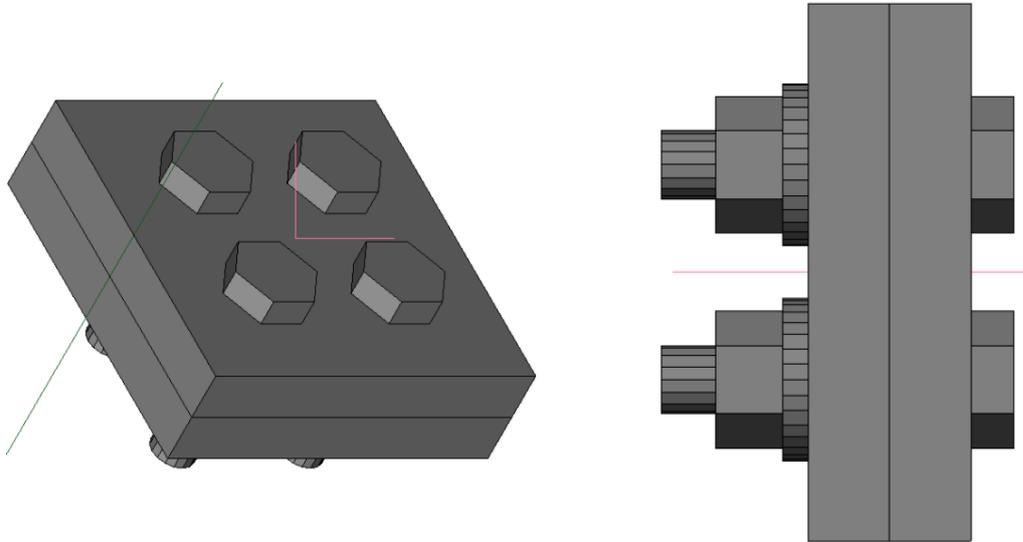
NACA 64-206



$R$   $\alpha$  position  
 $\circ$   $3.0 \times 10^6$   $0.245$   $-0.088$   
 $\square$   $6.0$   $0.246$   $-0.051$   
 $\triangle$   $9.0$   $0.247$   $-0.041$   
 $\square$   $6.0$  Standard roughness  
 $\nabla$   $6.0$  simulated split flap deflected  $60^\circ$

Anexo 5.2 Cálculo de pernería para el rotor.

Se simula dos planchas de conexión entre la punta del álabe que se conecta al rotor y el buje de este. Esta simulación será desarrollada a través del software Autodesk Advance Steel.



Este software genera una memoria de cálculo tal que verifica si el empernado entre estas dos planchas son correctos. A continuación, se presenta este procedimiento:

### Profile width - thickness ratio

#### Profile width - thickness ratio

$$0.5 \cdot b/t < 35$$

$$0.5 \cdot 103.1\text{mm}/8.8\text{mm} < 35$$

$$5.88 < 35$$

**OK**

### Bolt Checking

#### Conditions

Bolts center distance  $\leq$  Secondary beam width

$$40\text{mm} \leq 103.1\text{mm}$$

**OK**

#### Bolts on connecting object:

Minimum Bolt Edge Distance

$$1 \frac{3}{4} \cdot d \text{ (round up to } \frac{1}{8} \text{ inch or } 5 \text{ mm)} \leq \text{Bolt Edge Distance}$$

$$25\text{mm} \leq 30\text{mm}$$

**OK**

Maximum Bolt Edge Distance

Bolt Edge Distance  $\leq \min(6 \text{ inch or } 150 \text{ mm}, 12 * \min(\text{connected objects thicknesses}))$   
 $30\text{mm} \leq 150\text{mm}$

**OK**

Minimum Bolt Spacing

$3*d$  (round up to 1/8 inch or 5 mm)  $\leq$  Bolt Spacing

$40\text{mm} \leq 40\text{mm}$

**OK**

Maximum Bolt Spacing

Bolt Spacing  $\leq \min(12 \text{ inch or } 305 \text{ mm}, 24 * \min(\text{connected objects thicknesses}))$

$40\text{mm} \leq 305\text{mm}$

**OK**

### Bolt Strength Verification

$V_u \leq n_{Obj} * \phi * n * r_{nv}$

$0.5\text{kN} \leq 1 * 0.75 * 4 * 41.8\text{kN}$

$0.5\text{kN} \leq 125.4\text{kN}$

0.4 %

**OK**

### Bolt Bearing Verification

$1.2 * L_c * t * F_u \leq 2.4 * d * t * F_u$

Bolt Spacing Bearing Strength For Plate

$1.2 * 25.7\text{mm} * 15\text{mm} * 399.9\text{N/mm}^2 \leq 2.4 * 12.7\text{mm} * 15\text{mm} * 399.9\text{N/mm}^2$

$185.1\text{kN} \leq 182.8\text{kN}$

Bolt Edge Distance Bearing Strength For Plate

$1.2 * 22.9\text{mm} * 15\text{mm} * 399.9\text{N/mm}^2 \leq 2.4 * 12.7\text{mm} * 15\text{mm} * 399.9\text{N/mm}^2$

$164.5\text{kN} \leq 182.8\text{kN}$

$r_{nv} = \text{Min} = 164.5\text{kN}$

$V_u \leq n_{Obj} * \phi * n * r_{nv}$

$0.5\text{kN} \leq 1 * 0.75 * 4 * 164.5\text{kN}$

$0.5\text{kN} \leq 493.6\text{kN}$

0.1 %

**OK**

### Bolt Strength Verification At Combined Forces

$V_u \leq \phi * R_n$

$0.5\text{kN} \leq 0.75 * 167.2\text{kN}$

$0.5\text{kN} \leq 125.4\text{kN}$

0.4 %

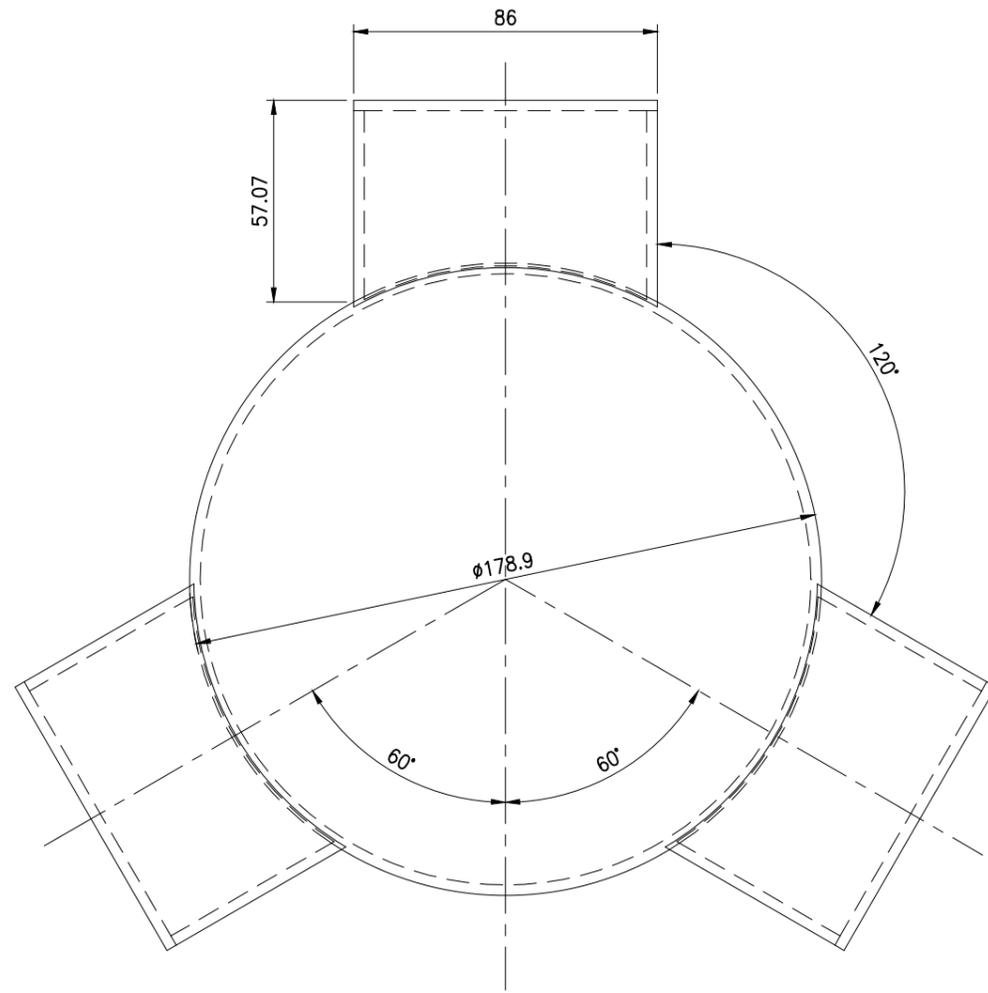
**OK**

## Conclusion

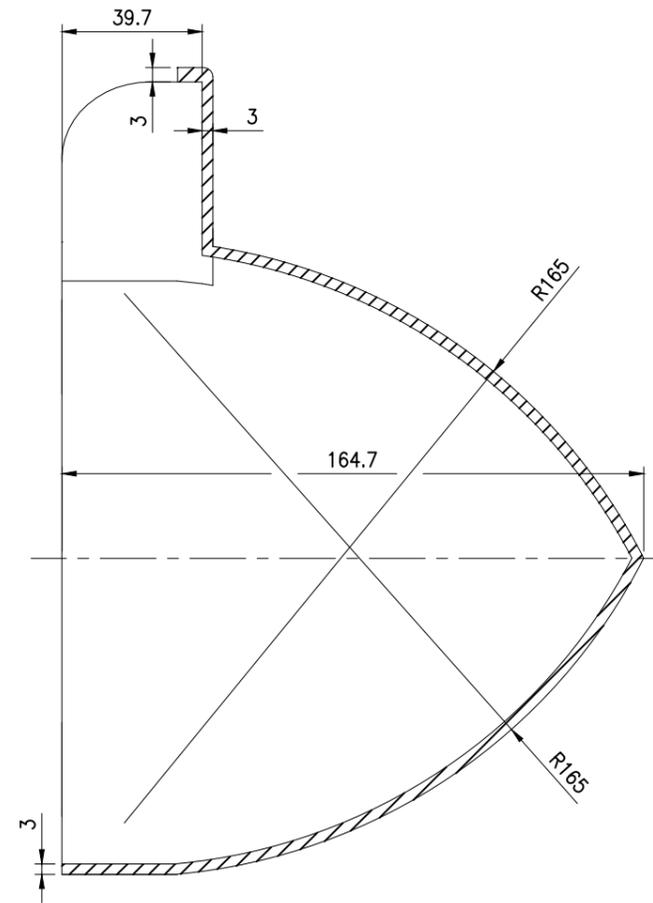
The connection is correctly designed to resist the applied forces

# **PLANOS**

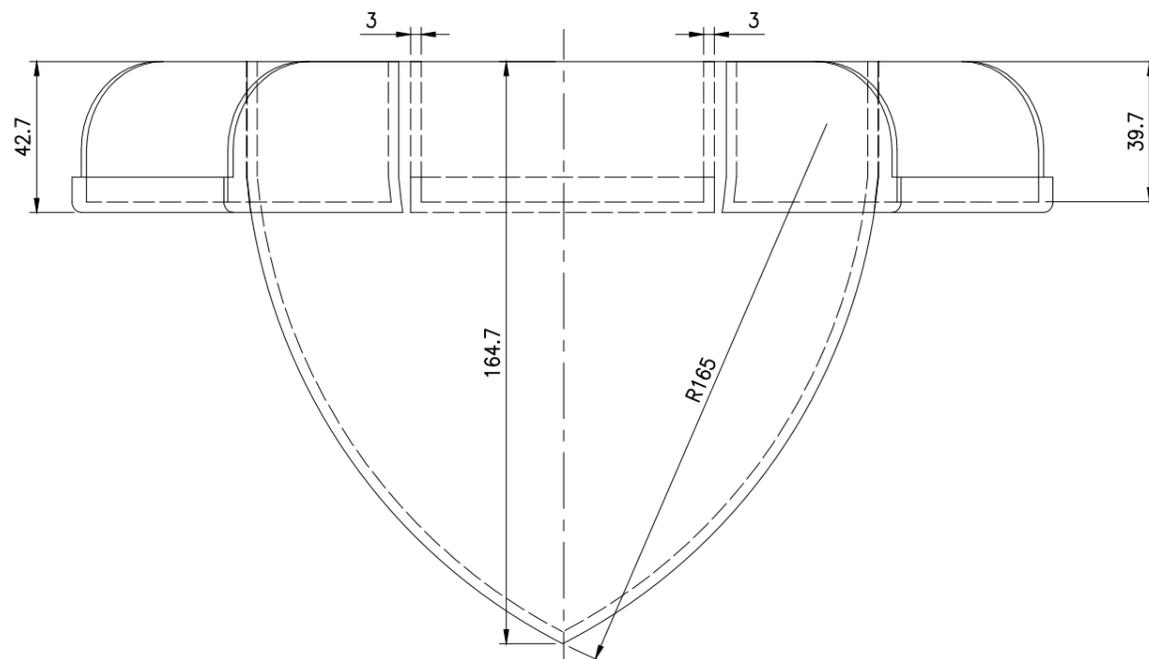




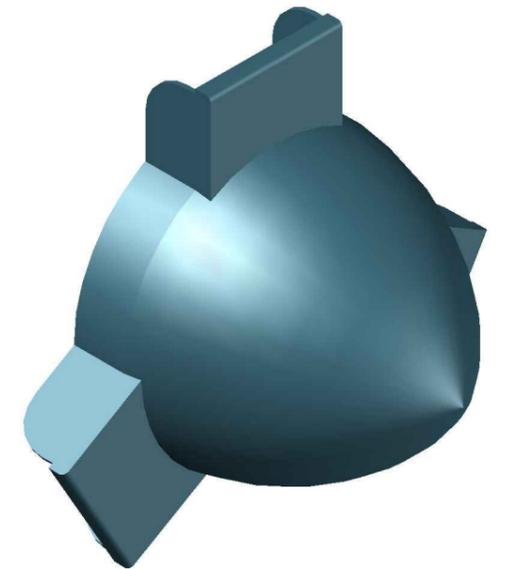
VISTA FRONTAL - Punta Turbina



SECCIÒN A-A



VISTA SUPERIOR



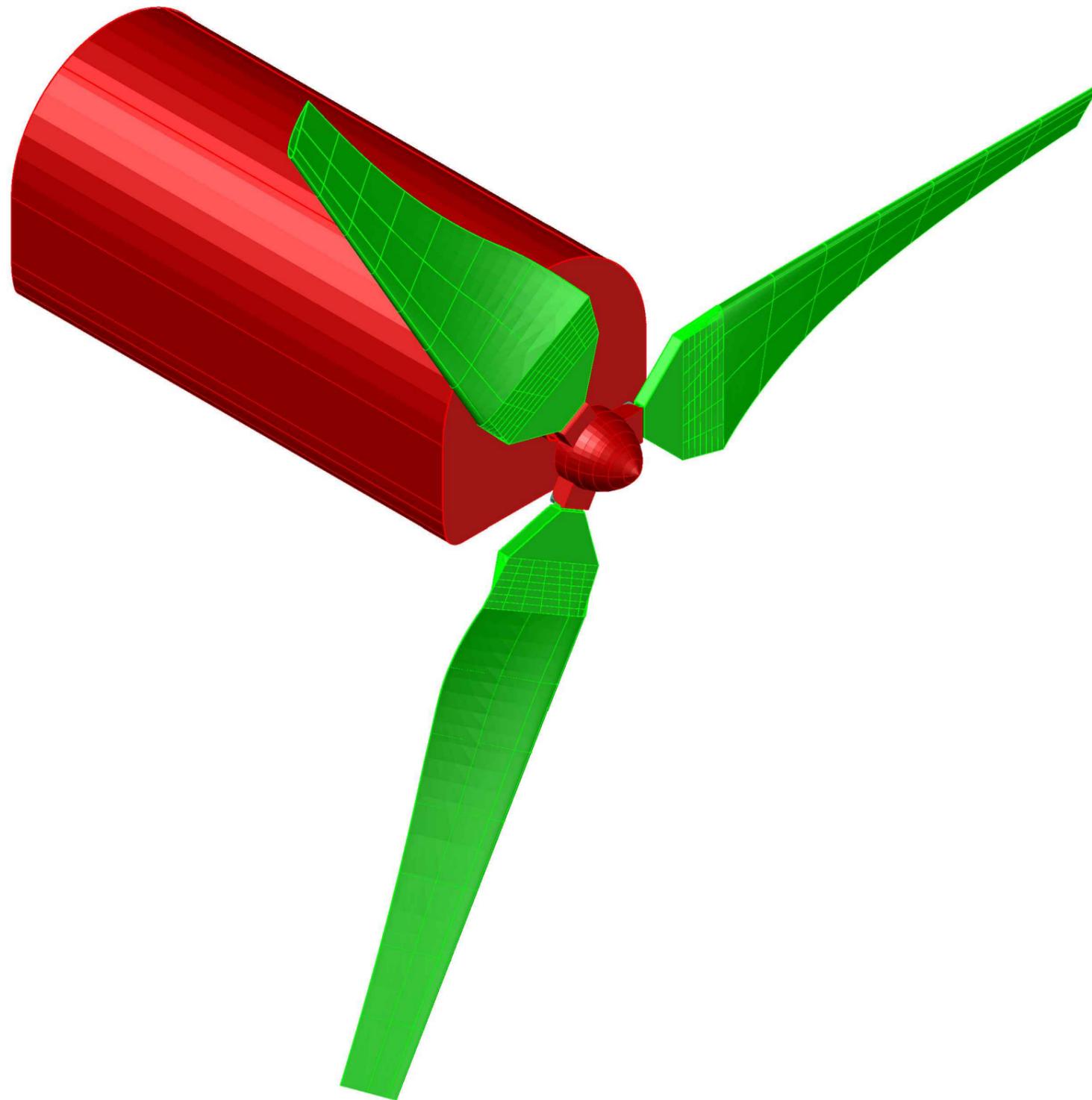
VISTA ISOMÈTRICA

**NOTAS GENERALES:**

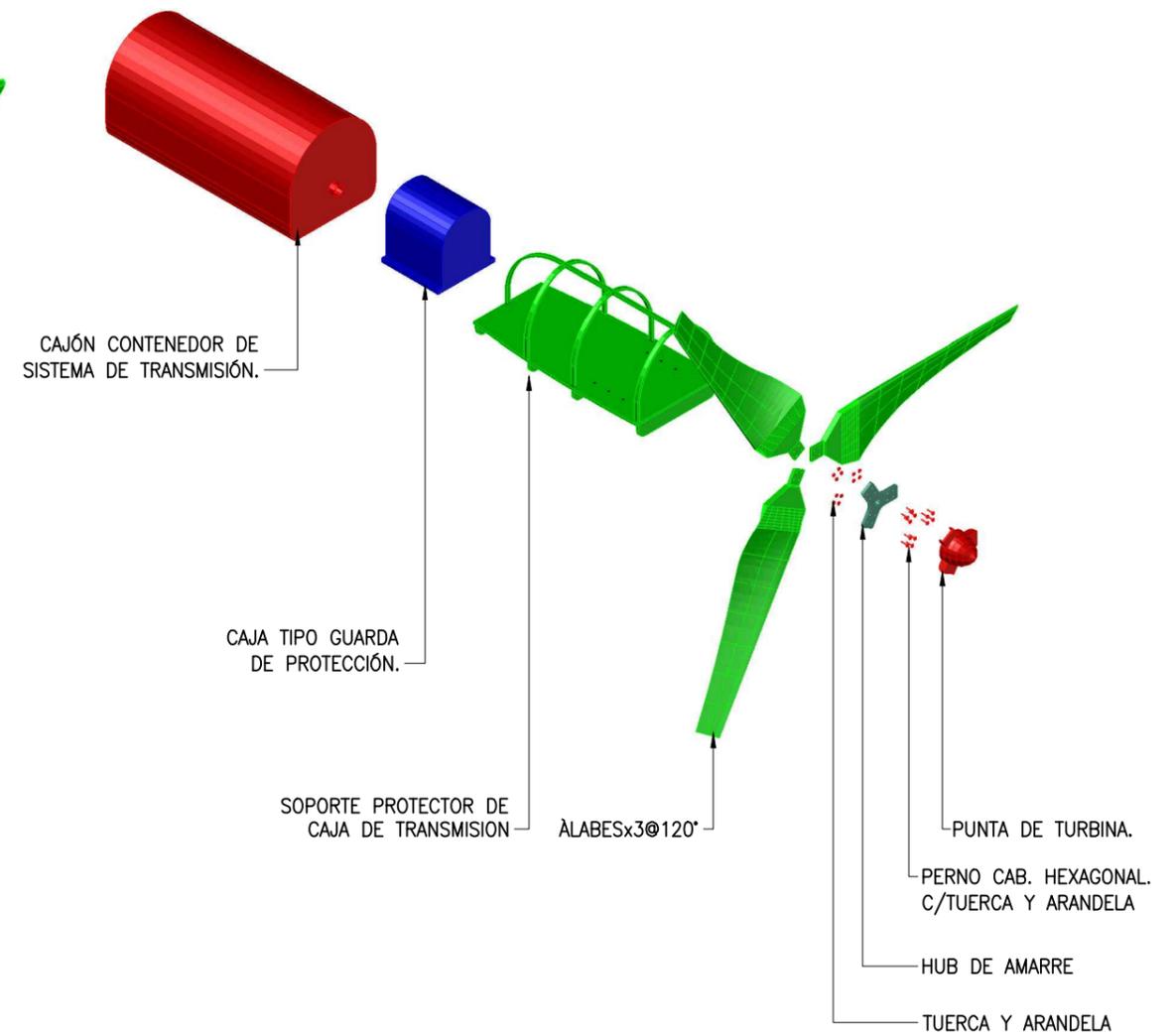
1. TODAS LAS DIMENSIONES EN MILIMETROS.
2. REDONDEOS DE 3mm EN ARISTAS EXTERNAS.
3. TOLERANCIAS GENERALES DE +/- 0.1mm.

Rev.	Fecha	Descripción	Realizado	Comprobado	Aprobado
A	27/11/17	Aprobado	YGZ	YGZ	YGZ
ESCALAS			TÍTULO PLANO		
1:2	Conjunto : Turbina Hidrocinética Título : Punta Turbina			REV.	A 01/01
UTEC	PLANO N° CLIENTE			PLANO N°	
A	YGU-002			YGZ-002	





ENSAMBLE DE ALABES  
ESC.SE

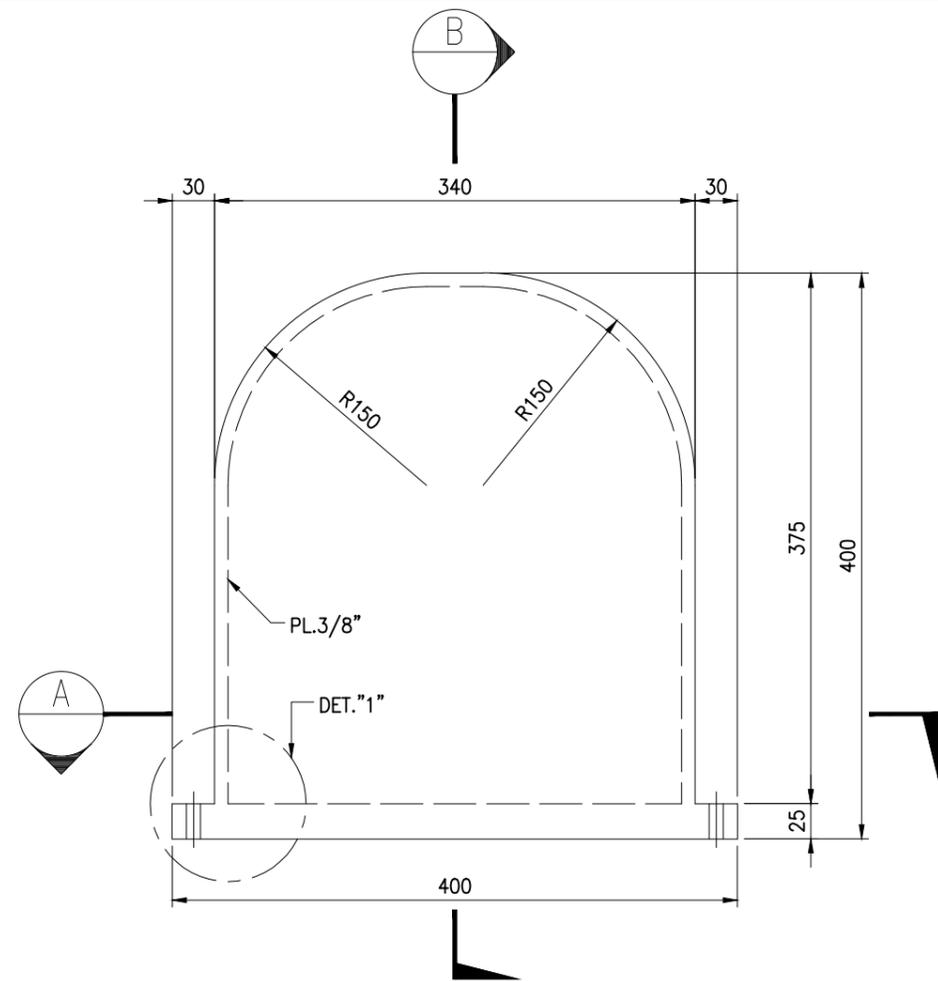


VISTA DE EXPLOSIÓN DE AMARRE DE ALABES A HUB  
ESC.SE

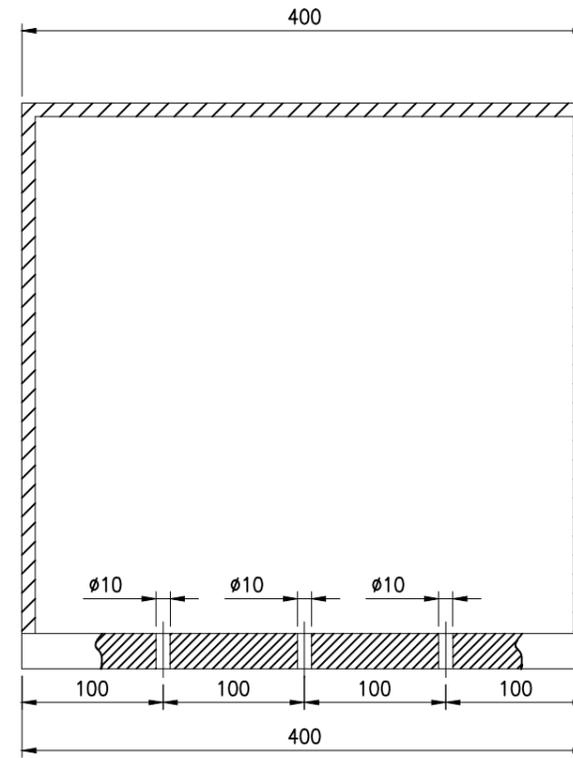
**NOTAS GENERALES:**

1. TODAS LAS DIMENSIONES EN MILIMETROS.
2. REDONDEOS DE 3mm EN ARISTAS EXTERNAS.
3. TOLERANCIAS GENERALES DE +/- 0.1mm.

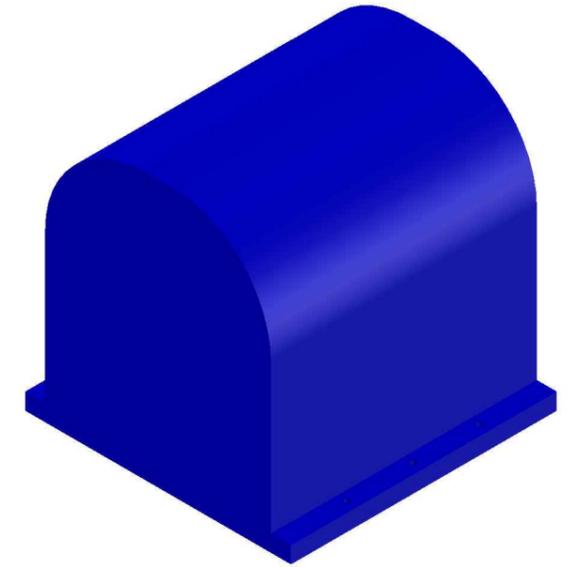
Rev.	Fecha	Descripción	Realizado	Comprobado	Aprobado
A	27/11/17	Aprobado	YGZ	YGZ	YGZ
ESCALAS			TÍTULO PLANO		
1:2	Conjunto : Turbina Hidrocinética Título : Ensamble de Alabes		REV.	A	01/01 DIN-A3
UTEC	PLANO N° CLIENTE		PLANO N°		
A	YGU-004		YGZ-004		



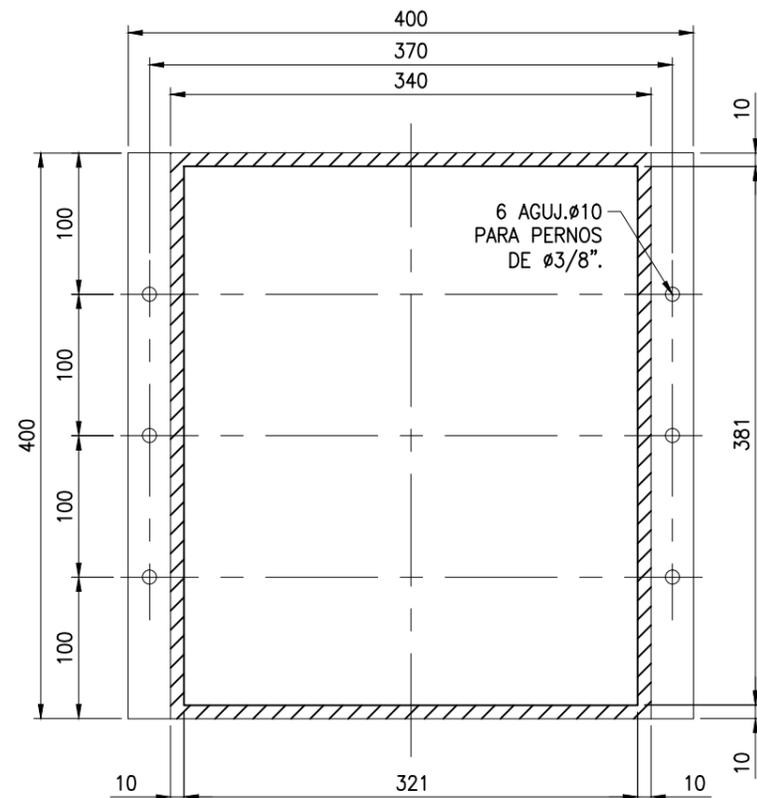
VISTA FRONTAL  
ESC.1:5



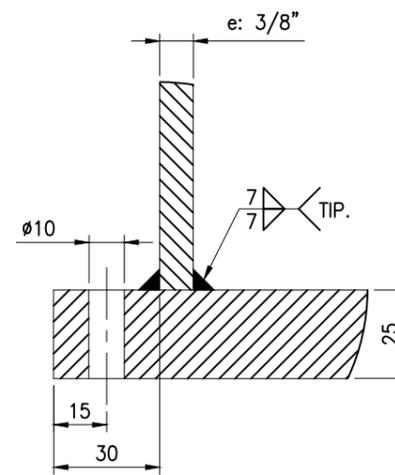
SECCIÓN B  
1:2



VISTA ISOMÉTRICA  
ESC.1:5



SECCIÓN A  
1:2

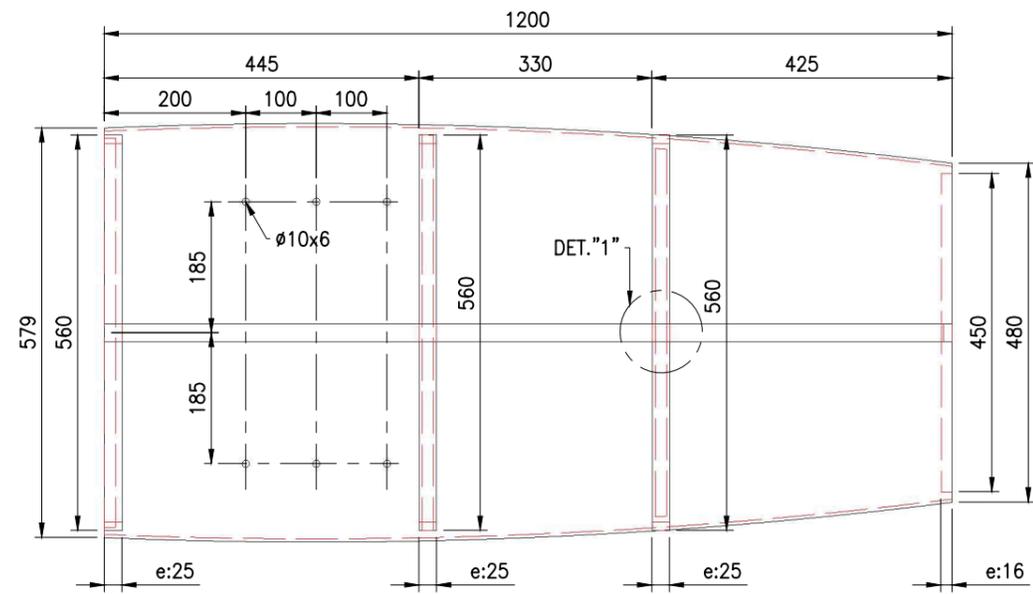


DETALLE 1  
1:2

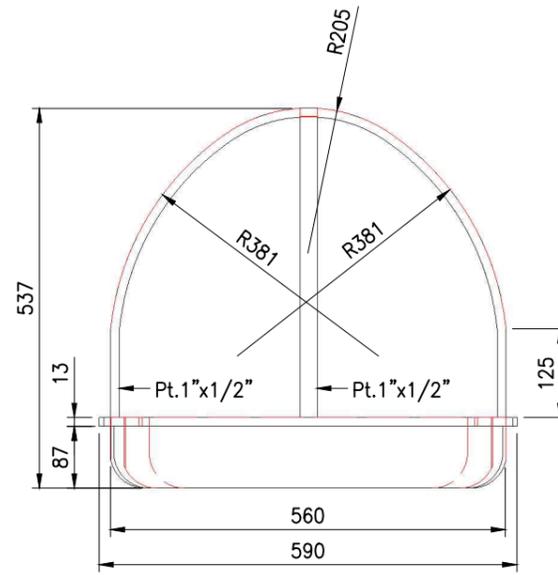
**NOTAS GENERALES:**

1. TODAS LAS DIMENSIONES EN MILIMETROS.
2. REDONDEOS DE 3mm EN ARISTAS EXTERNAS.
3. TOLERANCIAS GENERALES DE +/- 0.1mm.

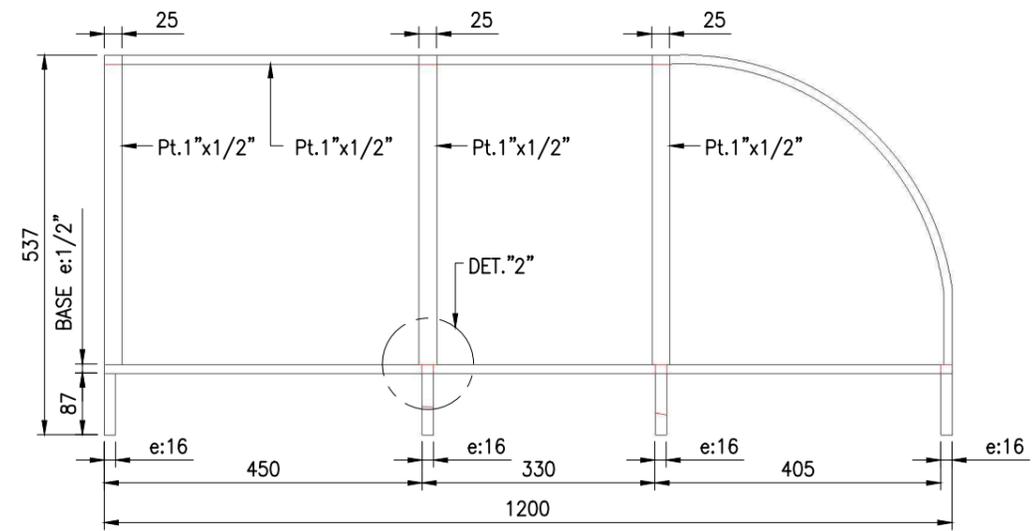
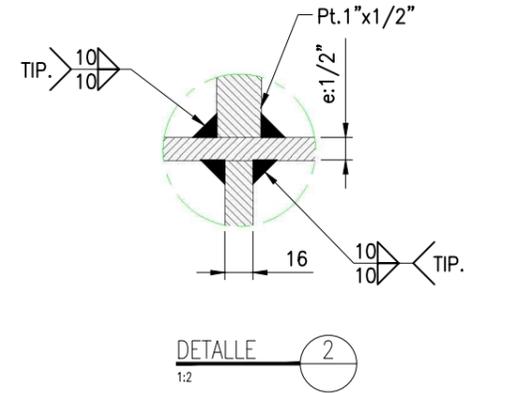
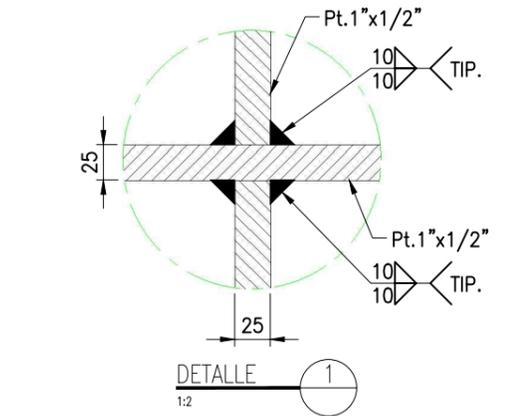
Rev.	Fecha	Descripción	Realizado	Comprobado	Aprobado
A	27/11/17	Aprobado	YGZ	YGZ	YGZ
ESCALAS			TÍTULO PLANO		
1:2	Conjunto : Turbina Hidrocinética Título : Caja Protectora		REV.	A	01/01
UTEC		PLANO N° CLIENTE	PLANO N°		
A		YGU-005	YGZ-005		



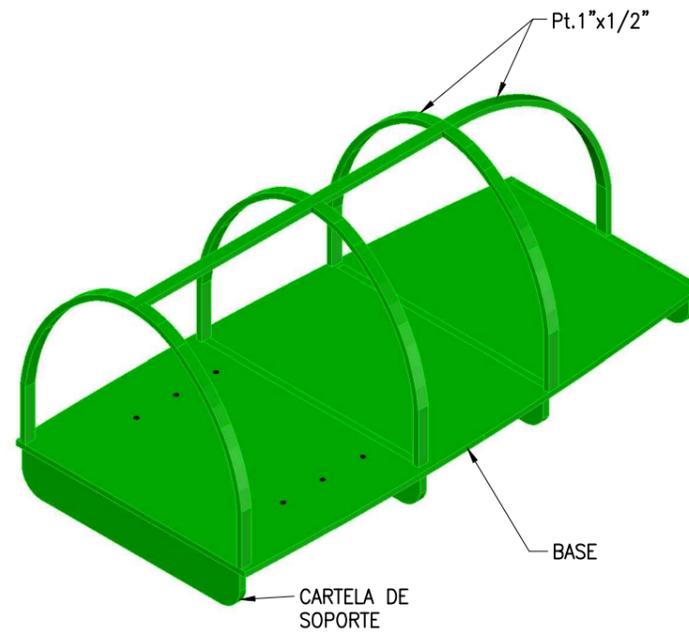
VISTA PLANTA  
ESC. 1:10



VISTA LATERAL  
ESC. 1:10



VISTA FRONTAL  
ESC. 1:10

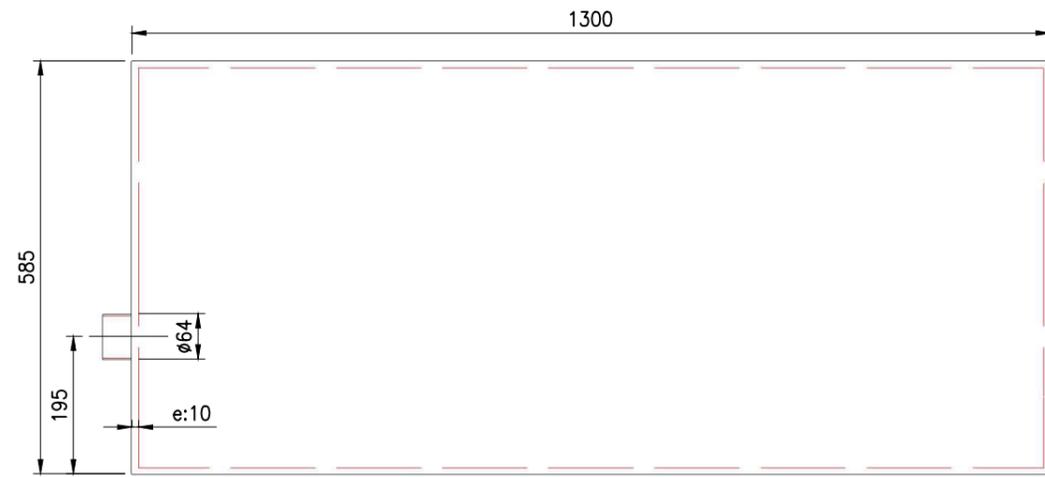


VISTA ISOMÉTRICA  
ESC. 1:10

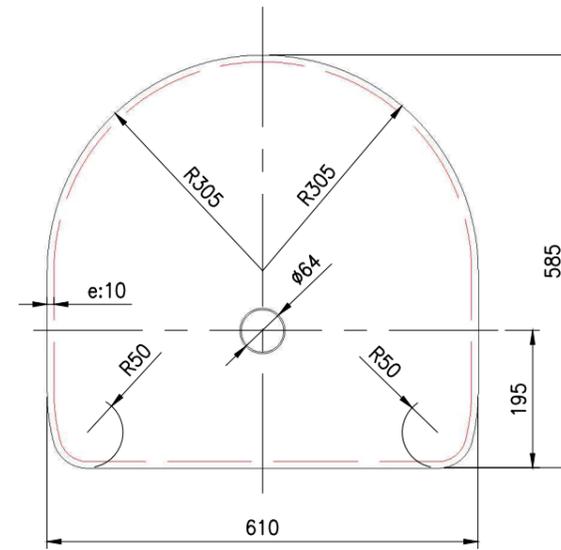
**NOTAS GENERALES:**

1. TODAS LAS DIMENSIONES EN MILIMETROS.
2. REDONDEOS DE 3mm EN ARISTAS EXTERNAS.
3. TOLERANCIAS GENERALES DE +/- 0.1mm.

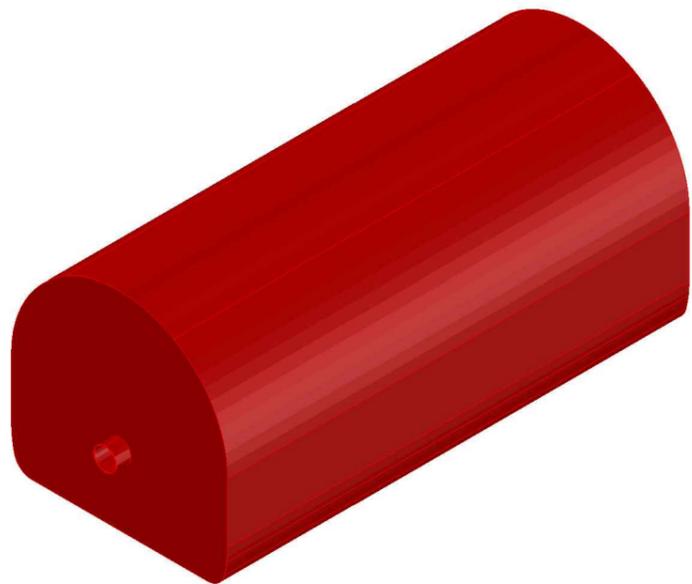
Rev.	Fecha	Descripción	Realizado	Comprobado	Aprobado
A	27/11/17	Aprobado	YGZ	YGZ	YGZ
ESCALAS			TÍTULO PLANO		
1:2	Conjunto : Turbina Hidrocinética Título : Protector de Caja			REV.	A 01/01
UTEC	PLANO N° CLIENTE			PLANO N°	
A	YGU-006			YGZ-006	



VISTA FRONTAL  
ESC.1:10



VISTA LATERAL  
ESC.1:10



VISTA ISOMÉTRICA  
ESC.1:10

**NOTAS GENERALES:**

1. TODAS LAS DIMENSIONES EN MILIMETROS.
2. REDONDEOS DE 3mm EN ARISTAS EXTERNAS.
3. TOLERANCIAS GENERALES DE +/- 0.1mm.

Rev.	Fecha	Descripción	Realizado	Comprobado	Aprobado
A	27/11/17	Aprobado	YGZ	YGZ	YGZ
ESCALAS			TÍTULO PLANO		
1:2	Conjunto : Turbina Hidrocinética Titulo : Cajón Protector de Sistema		REV.	A	01/01 DIN-A3
UTEC	PLANO N° CLIENTE		PLANO N°		
A	YGU-007		YGZ-007		