



**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE
TUXTLA GUTIÉRREZ**

RESIDENCIA PROFESIONAL
“CONSTRUCCIÓN DE TURBINA PICO HIDROELÉCTRICA”

LICENCIATURA
INGENIERÍA ELÉCTRICA

PRESENTA
HÉCTOR MANUEL CALDERÓN GÓMEZ
RICARDO GONZÁLO MARTÍNEZ VELASCO

ASESOR INTERNO
DOC. RAFAEL MOTA GRAJALES

EMPRESA
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ.

TUXTLA GUTIÉRREZ, CHIAPAS, MÉXICO A 16 DE DICIEMBRE DEL
2019.

RESUMEN

La generación de energía eléctrica, es una labor de ingeniería aplicable en todo el mundo. Las principales fuentes energéticas son las proporcionadas por los saltos de agua con inclinaciones máximas permisibles de un 10% en ríos o riachuelos. Gracias a la fuerza de gravedad ejercida sobre estas corrientes de agua, se puede generar energía eléctrica hasta 5 kW con un caudal aproximado de 500 litros/segundo.

Por lo general se pueden comparar y comprobar la teoría con la práctica en el comportamiento de las variables para la generación de energía mediante una Picocentral hidroeléctrica (PCH), estudios y mediciones con el fin de desarrollar conocimientos y competencias, dando como resultado la relación entre energía potencial, cinética, hidráulica, mecánica y eléctrica. Las centrales pico-Hidroeléctricas tienen el mismo principio de funcionamiento que una central hidroeléctrica con una escala menor de producción de potencia Este trabajo permitió diseñar una turbina de una central pico hidroeléctrica que se acople con las necesidades energéticas y aplicar los conocimientos en temas relacionados como: máquinas hidráulicas, diseño, mecánica de fluidos ya que se propone un modelo didáctico de laboratorio capaz de generar hasta 1000 watt.

GLOSARIO.

Turbina: máquina que consiste en una rueda en el interior de un tambor provista de paletas curvas sobre las cuales actúa la presión de un fluido haciendo que esta gire.

Energía: capacidad que tiene la materia de producir trabajo en forma de movimiento, luz, calor, etc.

Álabe: diente de la rueda de un mecanismo dispuesto de manera que al pasar una lengüeta, varilla o mazo lo levanta y deja caer después.

Potencia: capacidad para realizar una función o una acción, o para producir un efecto determinado.

Calor: energía que se manifiesta por un aumento de temperatura y procede de la transformación de otras energías.

ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS.

$\varepsilon_T =$ Eficiencia de la turbina (Adimensional).

$W_f =$ Potencia al freno (W).

$W_n =$ Potencia real (W).

$\rho =$ Densidad ($\frac{kg}{m^3}$).

$g =$ Aceleración gravitacional ($\frac{m}{s^2}$).

$D_m =$ Diámetro interior del rodete (m).

$D_M =$ Diámetro exterior del rodete (m).

$K_u =$ Coeficiente de velocidad periférica del rodete (adimensional).

$N_s =$ Número específico de revoluciones (adimensional)

ÍNDICE

CAPÍTULO 1.- INTRODUCCIÓN.....	1
1.1.- Antecedentes.....	3
1.2.- Planteamiento del problema.....	5
1.3.- Justificación.....	5
1.4.- Objetivos.....	6
1.4.1.- Objetivo general.....	6
1.4.2.- Objetivos específicos.....	6
1.5.- Hipótesis.....	6
1.5.1.- Hipótesis de investigación.....	6
1.5.2.- Hipótesis de Trabajo.....	7
CAPÍTULO 2.- MARCO TEÓRICO.....	9
2.1.- Centrales hidroeléctricas.....	9
2.1.1.- Definición.....	9
2.1.2.- Elementos Principales de una Central Hidroeléctrica.....	9
2.1.3.- Clasificación de Centrales Hidroeléctricas.....	10
2.1.4.- Centrales Pico Hidroeléctricas.....	11
2.2.- Turbinas.....	12
2.2.1.- Definición.....	12
2.2.2.- Elementos constitutivos.....	12
2.2.2.1.- Canal de llegada.....	12
2.2.2.2.- Caja Espiral.....	13
2.2.2.3.- Distribuidor.....	13
2.2.2.4.- Rodete.....	13
2.2.2.5.- Tubo de Aspiración.....	13

2.2.3.- Clasificación de las Turbinas Hidráulicas.....	13
2.2.4.- Selección de Turbina tomando en cuenta condiciones iniciales.	14
2.2.5.- Turbina Kaplan.	15
2.2.5.1.- Elementos de una Turbina Kaplan.....	15
2.2.5.1.1.- Compuerta de Admisión.	15
2.2.5.1.2.- Distribuidor Fink.	16
2.2.6.- Diseño de Turbinas Kaplan.....	16
2.2.6.1.- Diseño del rodete.....	16
2.2.6.2.- Diseño de los álabes.....	18
2.2.6.2.1.- Triángulos de velocidades.	19
2.2.6.2.2.- Ángulo de ataque.....	20
2.3.- Influencia de la altura neta del afluente en la potencia eléctrica generada.....	21
2.3.1.- Definición.....	21
2.3.2.- Influencia en la potencia generada.	21
CAPÍTULO 3.- INGENIERÍA CONCEPTUAL Y INGENIERÍA A DETALLE.....	25
3.1.- Diseño de las turbinas a analizar.	25
3.1.1.- Fase 1. Medición de los parámetros de diseño de una turbina Kaplan.	25
3.1.1.1.- Medición del caudal del afluente.....	25
3.1.1.2.- Medición del área de tubería.....	26
3.1.1.3.- Obtención de la velocidad del flujo.	26
3.1.1.4.- Medición de la altura bruta.	27
3.1.1.5.- Obtención de la altura neta.....	27
3.1.2.- Fase 2. Diseño de las turbinas a analizar en SOLIDWORKS.	28
3.1.2.1.- Elección de la turbina idónea para las condiciones iniciales anteriormente medidas.	28
3.1.2.1.1.- Cálculo de dimensiones del rodete de la turbina.....	28

3.1.2.1.2.- Análisis, elección y cálculo del perfil del álabe.....	28
3.1.3.- Fase 3. Simulación.	31
3.1.3.1.- Resultados de simulación.	33
CAPÍTULO 4.- RESULTADOS.	38
4.1.- Resultados de la simulación.....	38
FUENTES DE INFORMACIÓN.....	42
ANEXOS.	45

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

<i>Ilustración 1. Gráfico comparativo de los costos de producción de electricidad. (Vicéns, Zamora, & Kaiser, 2011)</i>	3
<i>Ilustración 2. Esquema de un sistema Hidroeléctrico.</i>	9
<i>Ilustración 3. Elementos principales de una central hidroeléctrica.</i>	10
<i>Ilustración 4. Clasificación de las turbinas por su grado de reacción.</i>	14
<i>Ilustración 5. Curvas de selección de turbinas tomando en cuenta las condiciones iniciales.</i>	14
<i>Ilustración 6. Bosquejo de una turbina Kaplan.</i>	15
<i>Ilustración 7. Dimensionamiento de turbinas Kaplan. (Zapico Gutiérrez, 2016).</i>	18
<i>Ilustración 8. Representación de los triángulos de velocidades de una turbina Kaplan.</i>	19
<i>Ilustración 9. Representación del ángulo de ataque de las turbinas.</i>	20
<i>Ilustración 10. Familia de perfiles usados para turbinas Kaplan.</i>	20
<i>Ilustración 11. Influencia de la altura neta en el caudal. (Sturdivant, Stambaugh, Zahnd, & Chong, 2017)</i>	23
<i>Ilustración 12. Influencia de la altura neta en la potencia generada. (Sturdivant, Stambaugh, Zahnd, & Chong, 2017)</i>	23
<i>Ilustración 13. Representación de la medición del caudal del afluente.</i>	26
<i>Ilustración 14. Procedimiento de medición de la altura bruta.</i>	27
<i>Ilustración 15. Perfil del álabe elegido.</i>	29
<i>Ilustración 16. Curva de rendimiento de una turbina Kaplan. (Fernández Díez, 1987)</i>	29
<i>Ilustración 17. Turbinas diseñadas en el software SOLIDWORKS.</i>	31
<i>Ilustración 18. Geometría de referencia del estudio.</i>	32
<i>Ilustración 19. Volumen de la región a analizar.</i>	32
<i>Ilustración 20. Velocidad angular de las turbinas simuladas.</i>	34
<i>Ilustración 21. Torque de las turbinas simuladas.</i>	35
<i>Ilustración 22. Eficiencia de las turbinas simuladas.</i>	36
<i>Ilustración 23. Simulación turbina 25°.</i>	38
<i>Ilustración 24. Simulación turbina 20°.</i>	39
<i>Ilustración 25. Simulación turbina 15°.</i>	39
<i>Ilustración 26. Simulación turbina 10°.</i>	40
<i>Ilustración 27. Simulación turbina 5°.</i>	40

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Clasificación de Centrales Hidroeléctricas según la potencia al eje en América.</i>	<i>11</i>
<i>Tabla 2. Obtención del número de palas de la turbina.</i>	<i>19</i>
<i>Tabla 3. Resultados de variación del caudal en una central pico hidroeléctrica. (Sturdivant, Stambaugh, Zahnd, & Chong, 2017)</i>	<i>22</i>
<i>Tabla 4. Dimensiones del rodete de la turbina.....</i>	<i>28</i>
<i>Tabla 5. Resultados de simulación de fluidos de turbina $\phi=15^\circ$</i>	<i>33</i>
<i>Tabla 6. Tabla comparativa de resultados de simulación.....</i>	<i>34</i>
<i>Tabla 7. Tabla comparativa de eficiencias.</i>	<i>35</i>
<i>Tabla 8. Comparativa de datos de salida de turbina seleccionada y turbina de la literatura.....</i>	<i>36</i>
<i>Tabla 9. Resultados simulación 25°.....</i>	<i>38</i>
<i>Tabla 10. Resultados simulación 20°.....</i>	<i>39</i>
<i>Tabla 11. Resultados simulación 15°.....</i>	<i>39</i>
<i>Tabla 12. Resultados simulación 10°.....</i>	<i>40</i>
<i>Tabla 13. Resultados simulación 5°.....</i>	<i>40</i>

CAPÍTULO 1.- INTRODUCCIÓN.

A lo largo de la evolución de la humanidad, el ser humano ha buscado formas de generar energía y hacer eficientes las actividades productivas necesarias para el sustento de la sociedad, la forma de energía más usada en la actualidad es la energía eléctrica. Existen muchas formas de producir energía eléctrica algunas de estas son: por medio de luz, calor, fricción, reacciones químicas, magnetismo, etc. la forma más empleada es por magnetismo, en este caso se usa la fuerza de los campos magnéticos presentes en los imanes para desplazar los electrones por medio de un conductor, para producir energía eléctrica por magnetismo se emplea un generador, este es un dispositivo que funciona cumpliendo la “ley de Faraday” que dice textualmente: “el voltaje inducido en un circuito cerrado es directamente proporcional a la rapidez con que cambia en el tiempo el flujo magnético que atraviesa una superficie cualquiera con el circuito como borde” (Peralta, Darwin Giovanni, Lima Alulima, Villavicencio Erazo, & Juan, 2011), para que este aparato funcione necesita de otro tipo de energía que le proporcione un movimiento angular ala bobina, para que se produzca la energía eléctrica, los tipos de energía más populares para proporcionarle este movimiento a la bobina de generador son: la eólica y la hidráulica; esta última es el tipo de energía más explotada, ya que con ella se consigue producir una potencia eléctrica mucho mayor, comparado con la eólica, y a su vez existen más fuentes de energía hidráulica(ríos, arroyos, etc.) también es el tipo de fuente que produce energía eléctrica a un menor costo. La energía hidráulica es un tipo de energía mecánica que produce un flujo de agua en su trayecto, es producida por ríos, arroyos, etc. En México un 20% de la energía eléctrica es producida mediante presas hidroeléctricas, localizándose en el estado de Chiapas las centrales más importantes.

Para que el flujo de agua pueda generar el movimiento angular en la bobina del generador se necesita una turbina hidráulica: “es una turbo máquina motora y por tanto es una bomba roto dinámica que trabaja a la inversa” (Peralta, Darwin Giovanni, Lima Alulima, Villavicencio Erazo, & Juan, 2011), es decir es un dispositivo que absorbe energía del fluido y restituye un porcentaje de esta al eje de la bobina del generador; los antecedentes de las turbinas hidráulicas datan de la edad media con los molinos de

agua, estos direccionaban la energía mecánica del río o arroyo y la usaban para mover maquinaria de aplicaciones diversas, la más común: molienda de granos.

Posteriormente se crearon las centrales hidroeléctricas, estas son un conjunto de elementos que están conectados entre sí, su principal función es la producción de energía eléctrica a gran escala aprovechando la energía potencial de ríos de gran caudal. A lo largo de los años se han estudiado cada parte de las centrales para hacer eficiente la producción de energía eléctrica.

Las centrales pico-Hidroeléctricas tienen el mismo principio de funcionamiento que una central hidroeléctrica con una escala menor de producción de potencia (ilustración 1) eléctrica (1-10 kW), estas han tenido su auge de 15 años a la actualidad, ya que son una forma de producir energía eléctrica sin contaminar, y pueden instalarse en regiones de difícil acceso, donde el cableado eléctrico nacional no puede llegar. Las instalaciones de estas centrales se han llevado sin estudios previos de sus elementos, ya que hay escasa información de los elementos de estas pequeñas centrales; lo que ocasiona que en las centrales instaladas se esté desaprovechando la energía hidráulica de afluente.

La presente investigación descentra en el diseño de una turbina para una región del municipio de Sitalá, Chiapas, ya que esta región no cuenta con energía eléctrica proporcionada por el país debido a su difícil acceso y cuenta con los recursos hidrológicos necesarios para la instalación de un central pico hidroeléctrica. La turbina diseñada será la idónea, aprovechando al máximo el flujo de agua, esto se logrará mediante la modificación del ángulo de ataque de los alabes de la turbina, ya que este está directamente relacionado con la velocidad angular y torque que la turbina le proporciona al eje del generador y a su vez con la producción de energía eléctrica.

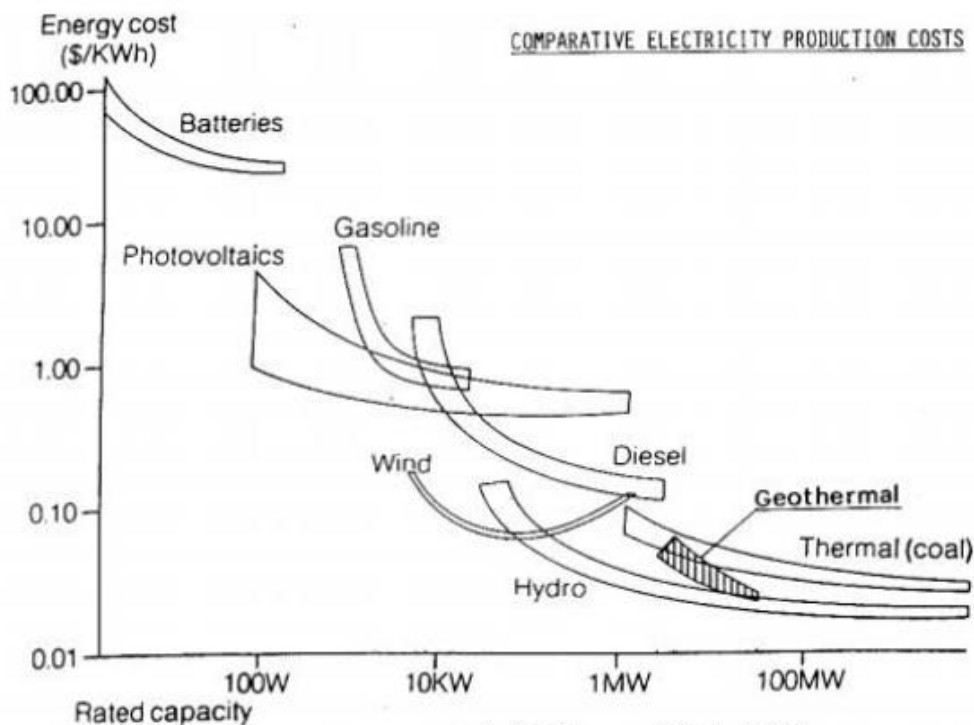


Ilustración 1. Gráfico comparativo de los costos de producción de electricidad. (Vicéns, Zamora, & Kaiser, 2011)

1.1.- Antecedentes.

Lima, Villavicencio y Tapia, diseñaron y construyeron un prototipo de una turbina 'Kaplan' para implementarla a una central pichidroeléctrica para la región sur y analizaron la eficiencia de esta, la cual les arrojó los siguientes resultados: velocidad máxima de 120 rpm, una potencia efectiva en el eje de 81.87W y un torque de 6.74Nm a un ángulo de 32°. (Peralta, Darwin Giovanni, Lima Alulima, Villavicencio Erazo, & Juan, 2011)

Nalubega, Da Silva, Assoc, Okou y Abbo, presentan un análisis en las técnicas para el control de carga utilizadas en generadores de inducción en centrales pico hidroeléctricas de Uganda, ellos compararon dos sistemas de control de carga automáticos con el control de carga manual y concluyeron que estas técnicas de control mejoran de forma sustancial el rendimiento, que el rendimiento del control manual (Nalubega, Da Silva, Okou, & Abbo, 2014).

Desai, Mukhopadhyay y Ray, estudiaron diversas configuraciones de centrales pico hidroeléctricas y relacionaron las alturas netas y flujos de entrada con la energía generada por hora (Desai, Mukhopadhyay, & Ray, 2015).

Sturdivant, Stambaugh y Chong, realizaron un estudio de factibilidad para la construcción y mantenimiento de una central pico hidroeléctrica en Nepal, y concluyeron que el proyecto necesita de una inversión externa y la recuperación de la inversión sería en un periodo de 5 años aproximadamente (Sturdivant, Stambaugh, Zahnd, & Chong, 2017).

S.J. Williamson a, B.H. Stark a, J.D. Booker, realizaron una metodología de como escoger la turbina idónea para un proyecto específico (Williamson, Stark, & Booker, 2014).

Pablo Zapico Gutiérrez, realizó una metodología de como dimensionar el rodete de una turbina usando los datos geográficos e hidrológicos de la región donde planea instalarse (Zapico Gutiérrez, 2016).

En el libro 'Turbinas hidráulicas y bombas centrífugas volumétricas' de Pedro Fernández Díez se muestra una tabla en donde se puede apreciar los ángulos de inclinación óptimos del álabe de una turbina Kaplan, mediante el caudal medido (Fernández Díez, 1987).

José L. Vicéns, Blas Zamora y Antonio S. Kaiser, estudiaron la incidencia del ángulo de ataque de los álabes en la potencia en el rotor de una turbina Kaplan (Vicéns, Zamora, & Kaiser, 2011).

En el libro 'Mecánica de Fluidos Aplicada' de Robert Mott nos dan una definición de eficiencia de una turbina Kaplan y como calcularla (Mott, 1996).

Bhusal, Zahnd, Eloholma y Halonen, analizaron diversas formas de producir electricidad para iluminación de zonas marginadas en países subdesarrollados y

concluyeron que la instalación de centrales pico hidroeléctricas o micro hidroeléctricas tiene una de las mejores relaciones costo-beneficio para las regiones (Bhusal, Zahnd, Eloholma, & Halonen, 2007).

Gaiser, Eriksson, Stroeve y Delplanque, analizaron las turbinas 'Turgo' y 'Pelton' para centrales pico hidroeléctricas y la incidencia que tiene la variación del ángulo ' φ ' y el número de palas 'Z' en la eficiencia de la turbina. (Gaiser, Erickson, Stroeve, & Delplanque, 2016)

En el libro: "MODEL RESEARCH: THE NATIONAL ADVISORY COMMITTEE FOR AERONAUTICS, 1915-1958", encontramos los perfiles de álabe y ángulo de ataque óptimo que deben usarse en turbinas Kaplan para centrales hidroeléctricas validados por la N.A.C.A. (Ronald, 1985).

En el libro "Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas" de Mataix nos muestra un esquema en donde podemos elegir la turbina ideal para ciertas condiciones iniciales (Mataix, 1986).

1.2.- Planteamiento del problema.

Cómo producir energía eléctrica mediante una turbina picohidroeléctrica

1.3.- Justificación.

Las centrales pico hidroeléctricas han tenido un auge junto con las celdas solares en la generación de energía eléctrica limpia en las regiones marginadas de difícil acceso en donde las líneas de cableado no pueden llegar. A pesar de esto las instalaciones de centrales pico hidroeléctricas son hechas sin un estudio previo de diseño y de manera empírica, debido a que en la literatura no hay suficientes estudios acerca de los elementos principales de la central (turbina, caracol), esto impacta negativamente a la eficiencia y vida útil de la central, lo que a su vez provoca que se produzca menos potencia eléctrica, desperdiciando la energía mecánica del afluente.

Debido a esto este trabajo estudiara uno de los elementos más importantes dentro de la central: la turbina, que es el elemento que transfiere la mayor cantidad de energía del río hacia el generador eléctrico, estudiaremos como la posición de los alabes de la turbina varían la eficiencia de la turbina y por ende la potencia eléctrica generada y eficiencia de la central.

1.4.- Objetivos.

1.4.1.- Objetivo general.

de la región productora de café del municipio de Sitalá, Chiapas y que mejore la eficiencia hidráulica de los diseños anteriores.

1.4.2.- Objetivos específicos.

- Medir los parámetros necesarios en la región para el diseño de la turbina.
- Dimensionar la turbina elegida.
- Diseñar la turbina en SOLIDWORKS, realizando el análisis del perfil y ángulo de los álabes.
- Simular el funcionamiento de las turbinas diseñadas con las condiciones anteriormente medidas mediante la paquetería “FLOW SIMULATION” (SOLIDWORKS) y comparar los resultados.

1.5.- Hipótesis.

1.5.1.- Hipótesis de investigación.

La turbina diseñada será una ‘Kaplan’ y tendrá como variables de salida:

$$v = 350 \text{ rpm}$$
$$\varepsilon_T > 84\%$$

Donde:

- v = Velocidad angular del rodete (rpm).
- ε_T = Eficiencia de la turbina (adimensional).

Asimismo, será una turbina idónea para la región cafetalera de Sitalá, Chiapas.

1.5.2.- Hipótesis de Trabajo.

La turbina diseñada, tendrá una eficiencia mayor a las turbinas para centrales pico hidroeléctricas diseñadas anteriormente y esto conllevará a un diseño óptimo para futuras instalaciones.

CAPÍTULO 2.- MARCO TEÓRICO.

2.1.- Centrales hidroeléctricas.

2.1.1.- Definición.

Se define como un conjunto de elementos que trabajan en conjunto en un proceso, en este caso específico, la generación de energía eléctrica mediante el aprovechamiento de la energía potencial de un afluente, la energía potencial es generada debido a un salto (diferencia de alturas entre el cauce), la función de este es proporcionarle velocidad angular y torque a una turbina hidráulica, esta a su vez proporciona velocidad y torque a un generador, mediante los elementos de transmisión de potencia de la central. En la ilustración 2 se muestra el esquema general de una central hidroeléctrica, en donde la energía mecánica del afluente es transferida al sistema hidroeléctrico en un porcentaje, ya que existen pérdidas dentro de este (pérdidas en la turbina y generador principalmente).



Ilustración 2. Esquema de un sistema Hidroeléctrico.

2.1.2.- Elementos Principales de una Central Hidroeléctrica.

- **Turbina Hidráulica:** Turbo máquina que proporciona velocidad angular y torque a un generador eléctrico, obtiene esta energía de un afluente.
- **Generador Eléctrico:** Máquina rotativa que transforma energía mecánica en eléctrica.

- **Transmisión:** sistema mediante el cual se transmite velocidad angular y torque de una turbina hidráulica hacia el eje del generador eléctrico, este es capaz de aumentar la velocidad y disminuir el torque y viceversa.
- **Almacenamiento:** conjunto de elementos que almacenan la energía producida por el generador, un ejemplo es un banco de baterías.

En la ilustración 3 se muestra una imagen de una central hidroeléctrica en donde se identifican los componentes principales de esta.

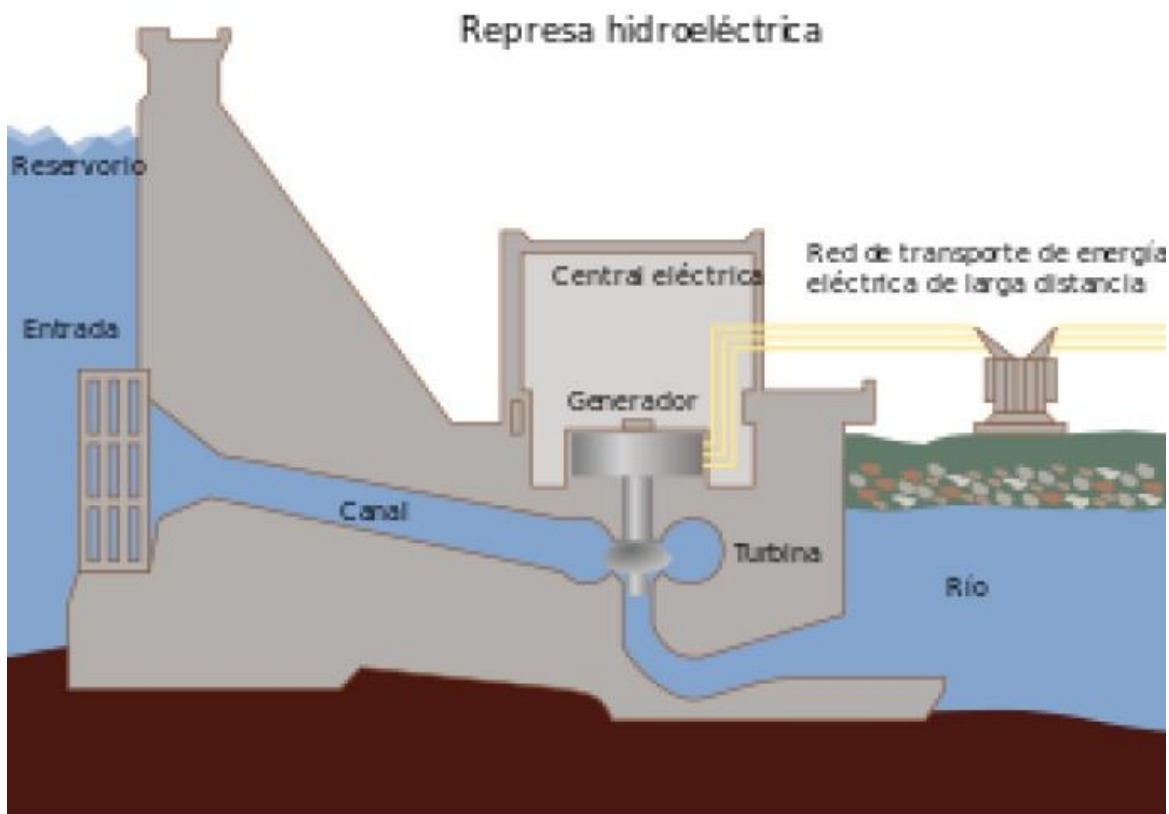


Ilustración 3. Elementos principales de una central hidroeléctrica.

2.1.3.- Clasificación de Centrales Hidroeléctricas.

La clasificación más popular de las centrales hidroeléctricas es por la potencia eléctrica que son capaces de producir, en la tabla 1 se muestra la clasificación de las centrales según la potencia eléctrica que son capaces de generar.

Tabla 1. Clasificación de Centrales Hidroeléctricas según la potencia al eje en América.

CLASIFICACIÓN	RANGO DE TAMAÑO
Nano	Vatios- 1Kw
Pico	1kW-10Kw
Micro	10Kw-50Kw
Mini	50 kW-1000Kw
Pequeña	1MW-5MW
Mediana	5MW-30MW
Grande	>30MW

2.1.4.- Centrales Pico Hidroeléctricas.

Las centrales Pico Hidroeléctricas como vimos anteriormente son un tipo de centrales hidroeléctricas a pequeña escala, en las que la generación de potencia eléctrica (1-10kW) es mucho menor que de una central grande, también tienen un costo mucho menor y no necesitan un embalse de agua para poder funcionar.

El auge de estas centrales se dio de hace 15 años a la fecha, debido a la necesidad de buscar recursos renovables que no afecten demasiado a la naturaleza, las centrales pico hidroeléctricas son una alternativa, ya que, a diferencia de las grandes centrales tienen un costo mucho menor, pueden construirse con materiales reciclados, y no requieren de un afluente con un caudal tan grande, ni la construcción de un embalse del fluido, y el cauce del afluente es mínimamente afectado por la obra civil, y comparado con las micro centrales, las pico centrales tienen un poder de generación mayor, que puede abastecer de energía eléctrica a una pequeña comunidad que pueden utilizar para sus principales necesidades energéticas.

La popularidad de estas centrales se basa también en el hecho de que se pueden instalar en zonas de complicada comunicación, donde el cableado eléctrico del país no puede llegar, y la mayor parte de las comunidades donde existen estas condiciones por lo general cuentan con un afluente cercano, de donde se puede aprovechar la energía hidráulica para la generación de energía eléctrica.

2.2.- Turbinas.

2.2.1.- Definición.

Este capítulo hablara acerca de los elementos que les proporcionan la velocidad angular a los ejes de los generadores: las turbinas; su definición, tipos de turbinas, principales características, similitudes, diferencias y formas de elección de ellas. También se hablará de la turbina de reacción “Kaplan”, que es la turbina en la que se centrara nuestra investigación.

Para comenzar definiremos que es una turbina; una turbina “es una turbo máquina motora, esencialmente es una bomba roto dinámica que trabaja a la inversa” (Peralta, Darwin Giovanny, Lima Alulima, Villavicencio Erazo, & Juan, 2011); es decir absorbe energía de un flujo de agua y restituye un porcentaje de esta al eje del generador. Para que un generador sea capaz de generar potencia eléctrica, necesita que se le provea una velocidad angular y un torque, esta es la función de la turbina; aprovechar el tipo de energía mecánica que proporciona el flujo de agua y convertirla en otra forma de energía mecánica, que es la que necesita el generador.

2.2.2.- Elementos constitutivos.

2.2.2.1.- Canal de llegada.

El canal de llegada es el conducto de alimentación de la caja espiral o caracol, es decir es la forma mediante la cual el flujo de agua entra al caracol de la turbina.

2.2.2.2.- Caja Espiral.

Es un dispositivo en forma de espiral cuya principal función es convertir la presión del fluido en velocidad antes de que este tenga contacto con los alabes o palas de la turbina.

2.2.2.3.- Distribuidor.

Elemento de una turbina que se encarga de que el fluido tenga un mejor contacto con los alabes de la turbina.

2.2.2.4.- Rodete.

Parte central de la turbina en donde van acoplados los alabes y el eje del generador.

2.2.2.5.- Tubo de Aspiración.

Es llamado así el canal de desagüe de la turbina, es decir, es el conducto por el cual el fluido retorna a su cauce después de haber tenido contacto con los alabes.

2.2.3.- Clasificación de las Turbinas Hidráulicas.

Por su grado de reacción.

Esta clasificación es la más usada por los autores, la reacción es la medida de relación entre la altura de presión y la altura total; en la ecuación 1 se define el grado de reacción de una turbina.

$$\varepsilon_R = \frac{\text{altura de presión absorbida por el rodete}}{\text{altura total absorbida por el rodete}} \quad (1)$$

La clasificación por grado de reacción se divide en dos segmentos, en las ecuaciones (2) y (3) se observan estos dos segmentos de la clasificación.

$$\varepsilon_R = 0 \text{ (Turbina de acción)} \quad (2)$$

$$\varepsilon_R \neq 0 \text{ (Turbina de reacción)} \quad (3)$$

Donde:

- ε_R = Grado de reacción de la turbina (adimensional).

En la ilustración 4 se aprecia un diagrama de flujo que nos muestra la clasificación de las turbinas por su grado de reacción y sus subclasificaciones.

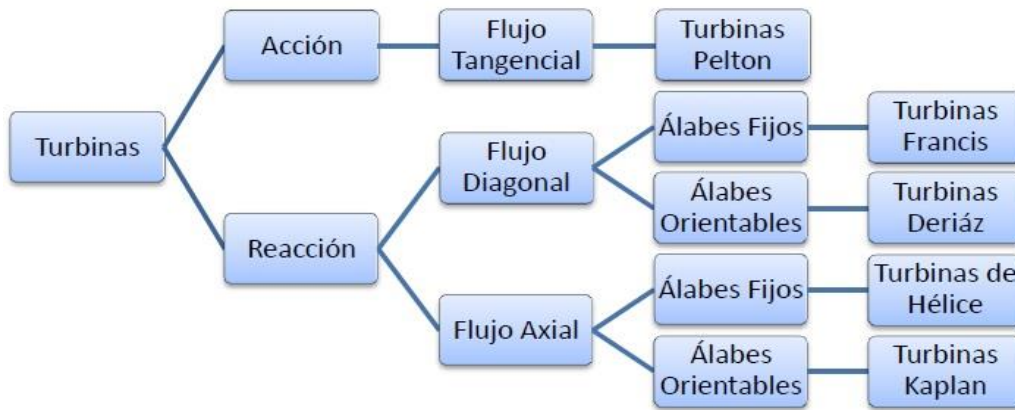


Ilustración 4. Clasificación de las turbinas por su grado de reacción.

2.2.4.- Selección de Turbina tomando en cuenta condiciones iniciales.

La selección de la turbina idónea para una región dada, viene representada en las curvas de comportamiento características de las turbinas anteriormente descritas, en la ilustración 5 se presentan las curvas de comportamiento de las turbinas, que nos ayudan a seleccionar la turbina idónea.

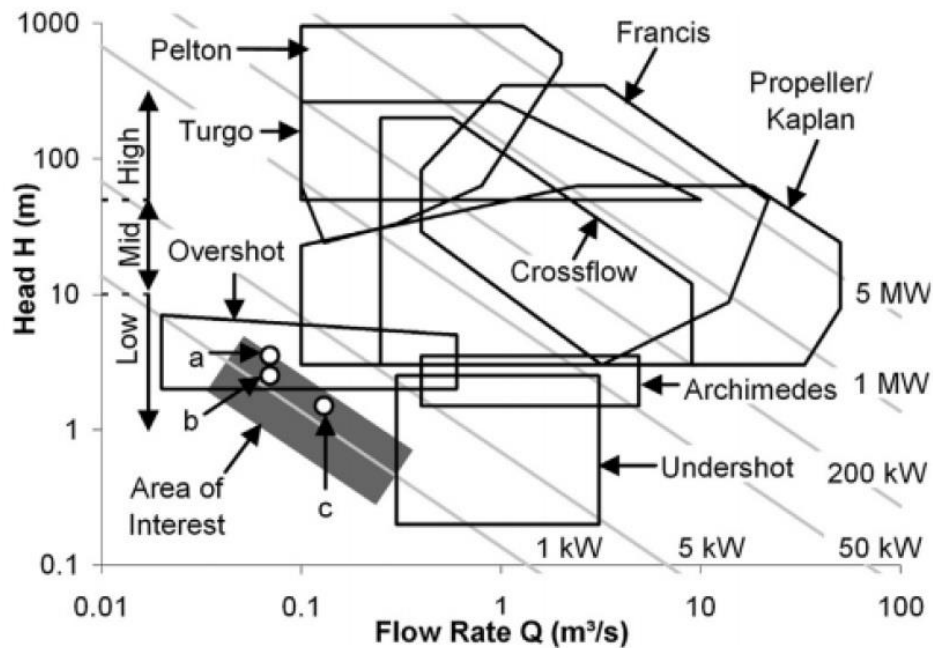


Ilustración 5. Curvas de selección de turbinas tomando en cuenta las condiciones iniciales.

Los parámetros necesarios para la selección de la turbo máquina son el caudal “Q”, y la altura bruta “H”, estas curvas nos proporcionan la turbina idónea para las condiciones iniciales de la región de instalación de la central.

Nuestra investigación se centrará en el estudio de la turbina de reacción: “Kaplan”, debido a que es la idónea para la región de instalación de estudio.

2.2.5.- Turbina Kaplan.

La turbina Kaplan es una turbina de Hélice con alabes móviles, es decir que son autoajustables mediante un mecanismo interno dentro del cubo del rodete, este sistema se usa para turbinas Kaplan para centrales pico hidroeléctricas, por lo general en centrales pico hidroeléctricas no se usan algunos elementos de las turbinas Kaplan. En la ilustración 6 se observa una imagen de una turbina Kaplan instalada.

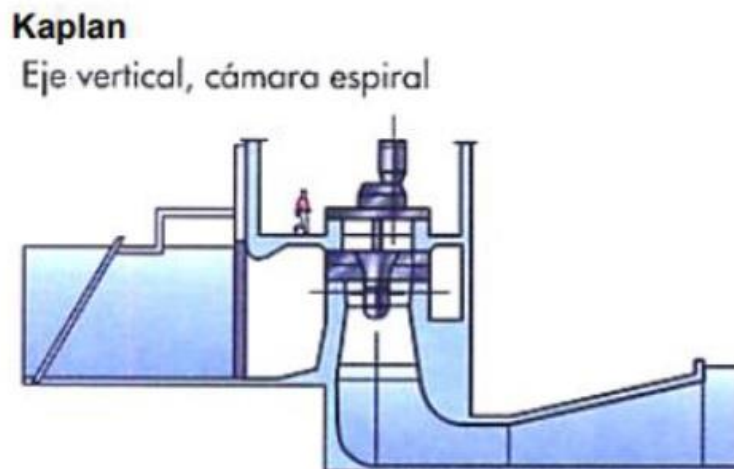


Ilustración 6. Bosquejo de una turbina Kaplan.

2.2.5.1.- Elementos de una Turbina Kaplan.

Los elementos que componen a una turbina Kaplan, son los mencionados anteriormente, solo se agregan los siguientes que son los característicos de este tipo de turbinas.

2.2.5.1.1.- Compuerta de Admisión.

Es un dispositivo permite o bloquea el paso del fluido hacia el distribuidor de la turbina, este se encuentra de la cámara espiral de la turbina, este elemento puede omitirse en

centrales pico hidroeléctricas, debido al pequeño caudal de entrada y que se le puede realizar mantenimiento de otras formas.

2.2.5.1.2.- Distribuidor Fink.

Conjunto de elementos ubicados en un radio mayor al de los alabes, la función de este es modificar el ángulo de ataque del fluido hacia los alabes, este dispositivo no es usado en turbinas de centrales pico hidroeléctricas debido a su complejidad.

2.2.6.- Diseño de Turbinas Kaplan.

El diseño de una turbina Kaplan se realiza en dos partes: diseño del rodete y diseño de los alabes.

2.2.6.1.- Diseño del rodete.

El diseño del rodete se comienza teniendo como dato de entrada el N_s (Número específico de revoluciones), se usan las siguientes fórmulas para su dimensionamiento:

Las ecuaciones (4) y (5), son dos formas de calcular el número específico de revoluciones de la turbina.

$$N_s = \frac{2419}{H^{0.489}} \quad (4)$$

$$N_s = \frac{n\sqrt{P}}{H^4} \quad (5)$$

Donde:

- N_s = Número específico de revoluciones (adimensional).
- n = Número de revoluciones (rpm).
- H = Altura bruta del afluente (m).

En la ecuación (6) se muestra la forma de calcular la velocidad periférica de la turbina.

$$k_u = 0.79 + \frac{N_s}{621} \quad (6)$$

Donde:

- k_u = Velocidad periférica de la turbina (adimensional).

En las ecuaciones (7) y (8) se aprecian las ecuaciones para calcular los diámetros de los rodets (interior y exterior).

$$D_M = \frac{84.55k_u\sqrt{H}}{n} \quad (7)$$

$$D_m = \left(0.25 + \frac{94.64}{N_s}\right) D_M \quad (8)$$

Donde:

- D_M = Diámetro exterior del rodete (m).
- D_m = Diámetro interior del rodete (m).

En las ecuaciones (9), (10), (11) y (12) se muestra como calcular los parámetros relativos del rodete y la caja espiral.

$$H_m = \frac{6.94D_M}{N_s^{0.403}} \quad (9)$$

$$H_1 = \left(0.38 + \frac{N_s}{19342}\right) D_M \quad (10)$$

$$v_1 = 3.17 + \frac{759.21}{N_s} \quad (11)$$

$$H_2 = \left(1.19 + \frac{4.69}{n}\right) D_M \quad (12)$$

Donde:

- H_m = Parámetro relativo del rodete y caja espiral (m).
- H_1 = Parámetro relativo del rodete y caja espiral (m).
- v_1 = Parámetro relativo del rodete y caja espiral (m).
- H_2 = Parámetro relativo del rodete y caja espiral (m).

En las ecuaciones (13) y (14) se aprecian las fórmulas para calcular los diámetros de holgura del rodete.

$$F_1 = \left(1.45 + \frac{72.17}{n}\right) D_M \quad (13)$$

$$G_1 = \left(1.29 + \frac{41.63}{n}\right) D_M \quad (14)$$

Donde:

- F_1 = Diámetro de holgura del rodete (m).
- G_1 = Diámetro de holgura del rodete (m).

En la ilustración 7 se aprecia la ubicación de los parámetros calculados con las ecuaciones anteriores dentro de la turbina y sus componentes.

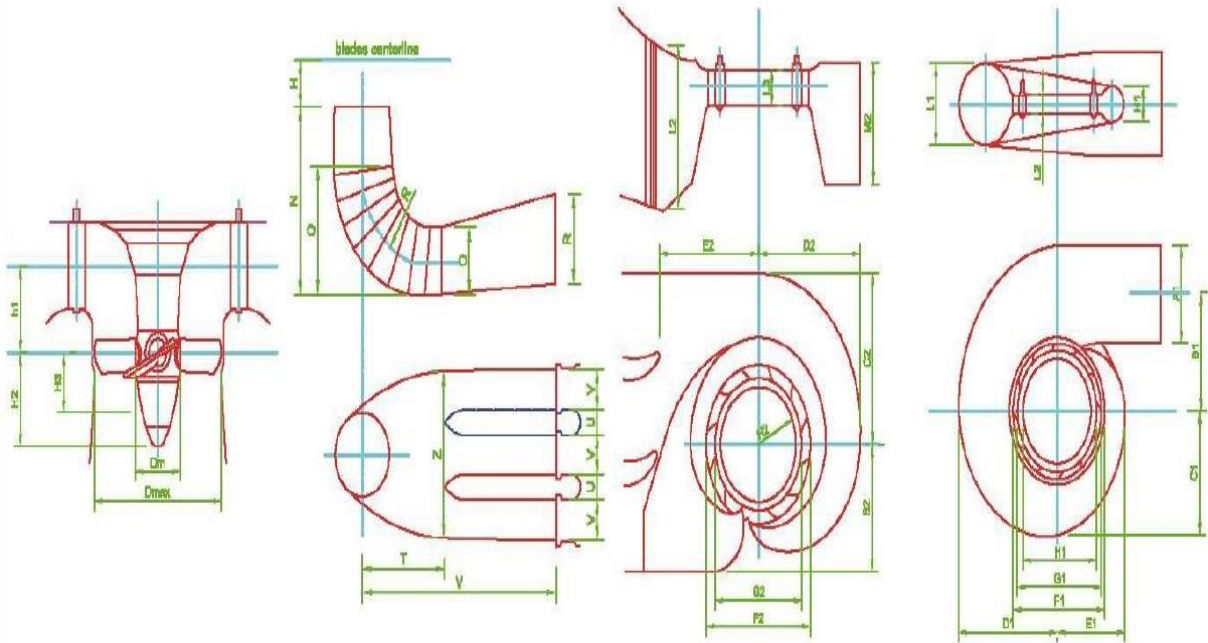


Ilustración 7. Dimensionamiento de turbinas Kaplan. (Zapico Gutiérrez, 2016)

2.2.6.2.- Diseño de los álabes.

Para el diseño de los álabes se usa un perfil aerodinámico de turbinas de avión de la familia 6306-6706 con su ángulo de ataque idóneo de la N.A.C.A. (National Advisory Committee for Aeronautics), estos perfiles con su ángulo de ataque asignado ya están validados mediante un túnel de viento. Los ángulos de ataque idóneos para cada perfil de esta familia son aplicables para turbinas hidroeléctricas debido a su mayor aplicación.

Solidez y número de palas.

En las ecuaciones (15) y (16) se observan los valores en los cual oscila la persiana de los álabes.

$$\left(\frac{l}{t}\right)_e = 1 \div 0.7 \quad (15)$$

$$\left(\frac{l}{t}\right)_i = 1.8 \div 3 \quad (16)$$

Donde:

- l = Cuerda del álabe (m).
- t = Separación entre álabes (m).

En la tabla 2 se aprecia el número de palas de una turbina “Kaplan” por medio del número específico de revoluciones “ n_s ”.

Tabla 2. Obtención del número de palas de la turbina.

ns	400-500	500-600	600-750	750-900	>900
Z	7 a 8	6	5	4	3
Hm (metros)	60	50	40	20	5
Relación de cubo	0.6	0.55	0.5	0.4	0.3

2.2.6.2.1.- Triángulos de velocidades.

Los triángulos de velocidades son una representación gráfica por medio de un polígono del intercambio de energía entre el fluido y la turbina.

En la ilustración 8 se observan los triángulos de velocidades para la turbina Kaplan.

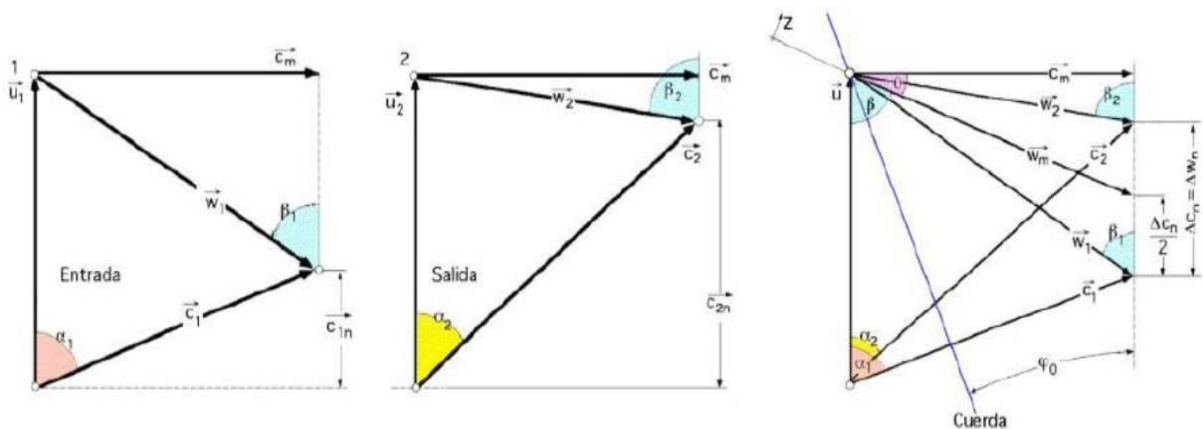


Ilustración 8. Representación de los triángulos de velocidades de una turbina Kaplan.

2.2.6.2.2.- Ángulo de ataque.

El ángulo de ataque define la fuerza con la cual el flujo impacta a los alabes de la turbina, en la ilustración 9 se observa la representación gráfica de los ángulos entre el alabe y el fluido en contacto.

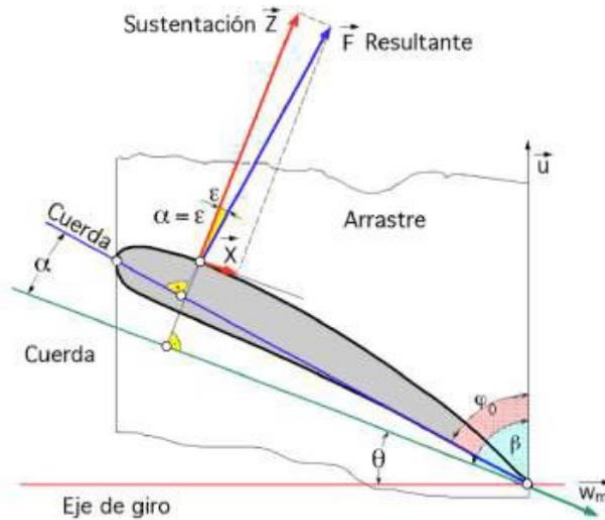


Ilustración 9. Representación del ángulo de ataque de las turbinas.

El ángulo de ataque es el formado entre la cuerda del alabe y la velocidad relativa del fluido " W_m ", la suma de los ángulos " θ ", " ϕ_0 " y " α " son 90° , que es el ángulo entre la velocidad relativa del fluido " W_m " y la velocidad lineal del rotor " u ".

Perfil del álabes.

El perfil del alabe es la silueta del corte transversal del alabe de la turbina, en el caso de una turbina Kaplan, el perfil se obtiene de la familia 6306-6706 de turbinas de aviones existentes en la N.A.C.A. (National Advisory Committee for Aeronautics, NACA).

En la ilustración 10 se aprecian las familias de perfiles de álabes aprobados para turbinas Kaplan.



Ilustración 10. Familia de perfiles usados para turbinas Kaplan.

2.3.- Influencia de la altura neta del afluente en la potencia eléctrica generada.

2.3.1.- Definición.

La altura neta del afluente se define como la distancia vertical comenzando con el lugar donde la turbina está instalada, hasta el punto más alto del afluente (por lo general este punto es el origen del afluente), restándole a esta distancia las pérdidas por tubería de todo el cauce, estas se consideran pérdidas, ya que, debido al cambio de área y material, genera una fricción que disminuye la velocidad del fluido a su paso por estas.

2.3.2.- Influencia en la potencia generada.

La manera en que la altura influye en la potencia eléctrica generada se puede observar en la ecuación de Bernoulli (ecuación), en donde la parte donde influye la altura como se puede observar es la parte de la energía potencial del fluido, que posteriormente se transformara en energía cinética, esta energía cinética del fluido se manifestara en la turbina hidráulica en forma de presión, qué es la fuerza por unidad de área del alabe aplicada por el fluido, como puede observar en la ecuación (17) y (18) la presión del fluido depende de la altura a la que se encuentre este, en este caso la altura neta.

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g h_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g h_2 \quad (17)$$

$$P = \rho g h \quad (18)$$

Dónde:

- P_1 = Presión en el primer tramo (Pa).
- P_2 = Presión en el segundo tramo (Pa).
- ρ = Densidad del fluido (kg/m³).
- v_1 = Velocidad en el primer tramo (m/s).
- v_2 = Velocidad en el segundo tramo (m/s).
- g = Aceleración gravitacional (m/s²).
- h_1 = altura neta en el primer tramo (m).
- h_2 = altura neta en el segundo tramo (m).

En el artículo: “THEORETICAL ANALYSIS OF A PICO-HYDRO POWER SYSTEM FOR ENERGY GENERATION IN RURAL OR ISOLATED AREA” se realizó un estudio en donde se evaluaron distintos caudales, con la misma eficiencia de la turbina y generador eléctrico, en la tabla 3 se aprecian los resultados de este estudio, en donde los parámetros de eficiencia y gravedad son los mismos. (Sturdivant, Stambaugh, Zahnd, & Chong, 2017)

Tabla 3. Resultados de variación del caudal en una central pico hidroeléctrica. (Sturdivant, Stambaugh, Zahnd, & Chong, 2017)

Altura neta 'hn' (m)	Caudal 'Q' (l/s)	Gravedad (m/s²)	Eficiencia 'η' (adimensional)	Potencia eléctrica generada 'Wn' (Watts)
1	0.03	9.8	50	0.1633
3	0.13	9.8	50	1.36
5	0.25	9.8	50	6.125
6	0.58	9.8	50	17.15
8	1	9.8	50	39.2
12	5	9.8	50	294
17	7.5	9.8	50	624.75
22	10	9.8	50	1078
26	13.13	9.8	50	1698.24
30	15	9.8	50	2205

En la ilustración 11 y 12 se observa que conforme se aumenta la altura neta ' h_n ' el caudal de entrada a la turbina y la potencia eléctrica generada aumentan exponencialmente.

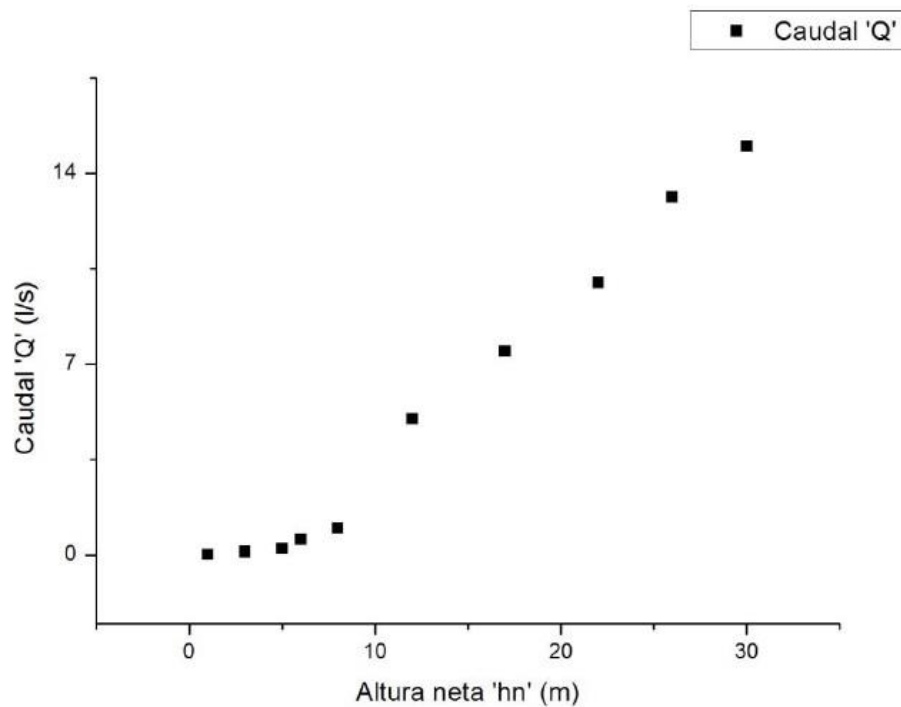


Ilustración 11. Influencia de la altura neta en el caudal. (Sturdivant, Stambaugh, Zahnd, & Chong, 2017)

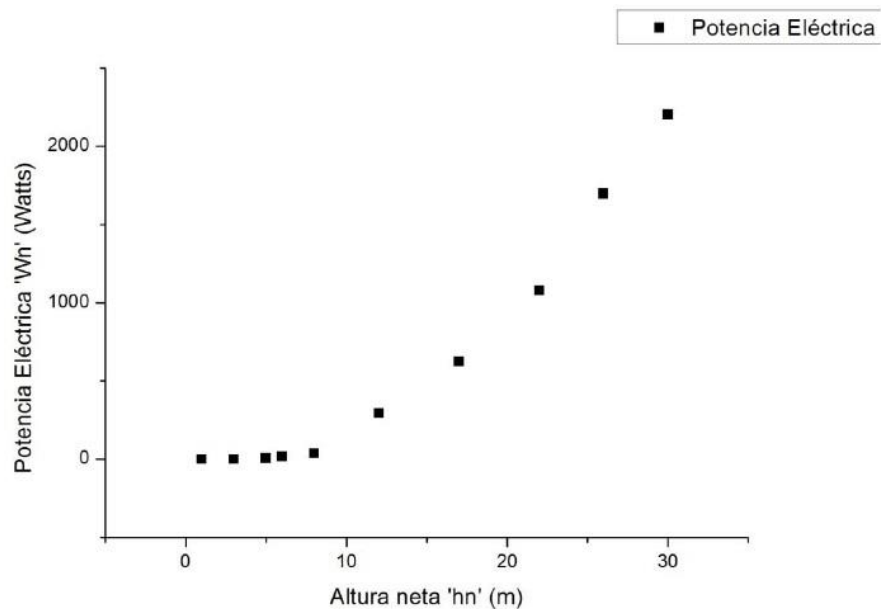


Ilustración 12. Influencia de la altura neta en la potencia generada. (Sturdivant, Stambaugh, Zahnd, & Chong, 2017)

CAPÍTULO 3.- INGENIERÍA CONCEPTUAL Y INGENIERÍA A DETALLE.

3.1.- Diseño de las turbinas a analizar.

Como se mencionó en los capítulos anteriores las centrales pico hidroeléctricas tienen un rango de potencia de 3.5-10 kW, una central pico hidroeléctrica cumple las necesidades energéticas de los habitantes de la región de estudio; nuestro trabajo se centrará en el estudio y mejora de uno de los elementos más importantes de la central: la turbina, para que esta sea estudiada, se debe seleccionar y diseñar las turbinas a las que se les lleve a cabo el análisis, para ello se necesitan medir los parámetros necesarios para la elección y posterior diseño de estas como primer paso en nuestra metodología .

3.1.1.- Fase 1. Medición de los parámetros de diseño de una turbina Kaplan.

La medición de los parámetros de diseño de la turbina elegida es el primer paso, ya que son necesarios para comenzar con los cálculos de las dimensiones de la turbina, se necesitan los siguientes parámetros: Caudal, Área de tubería, Altura Bruta y Altura Neta.

3.1.1.1.- Medición del caudal del afluente.

Para la realización de este punto, usamos el tanque de almacenamiento de agua presente en los beneficios de café de la región, el proceso es el siguiente:

1. Calcular el volumen del tanque.
2. Vaciar el tanque por completo y colocar el tapón en el orificio de vaciado del tanque.
3. Medir el tiempo de llenado por completo del tanque.
4. Dividir el volumen total del tanque entre el tiempo de llenado:

$$Caudal = \frac{\text{volumen de tanque (m)}^3}{\text{tiempo de llenado (s)}}$$

En la ilustración 13 se observa la medición del caudal del afluente descrito anteriormente.

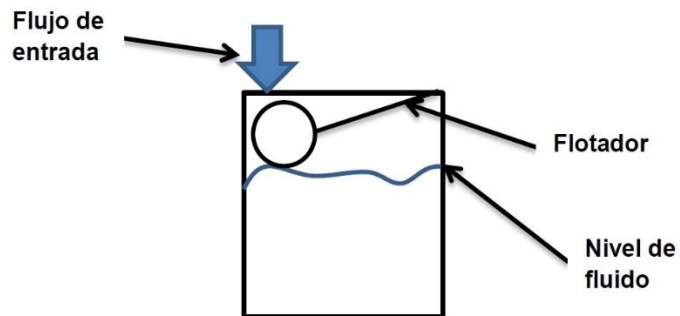


Ilustración 13. Representación de la medición del caudal del afluente.

El caudal medido es de $Q = 13 \frac{m^3}{s}$

3.1.1.2.- Medición del área de tubería.

El diámetro de la tubería fue medido con un vernier, en la ecuación (19) se observa la formula aplicada para calcular el área de la tubería.

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \quad (19)$$

Donde:

- A= Área de la tubería (m).
- π = Constante pi (adimensional).
- D= Diámetro de la tubería (m).

El resultado es: $A=0.02457 m^2$ la tubería tiene una longitud de 1 metro.

3.1.1.3.- Obtención de la velocidad del flujo.

La velocidad del flujo la obtuvimos despejando la velocidad “v” de la ecuación del caudal, en la ‘ecuación (20) se aprecia la fórmula de caudal.

$$Q = (v)(A) \quad (20)$$

Donde:

- Q = Caudal del afluente (m³/s).
- v = velocidad del fluido (m/s).

El resultado obtenido fue: $v = \frac{Q}{A} = 529.10 \frac{m}{s}$.

3.1.1.4.- Medición de la altura bruta.

La altura bruta se midió mediante dos reglas de madera, el proceso fue el siguiente:

1. Ubicar el punto en donde estará ubicada la central.
2. Ubicar dos reglas perpendicularmente tocando dos puntos de la tierra.
3. Medir y registrar la distancia vertical de la regla y registrar.
4. Repetir el procedimiento hasta alcanzar la altura máxima del afluente.
5. Sumar la cantidad de longitudes medidas.

El resultado obtenido fue $H=14 m$.

En la ilustración 14 se aprecia la representación del procedimiento de medición de la altura bruta descrito anteriormente.

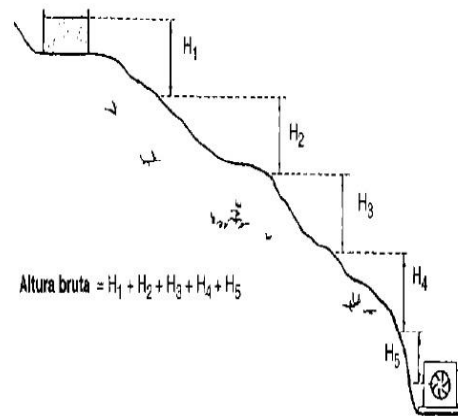
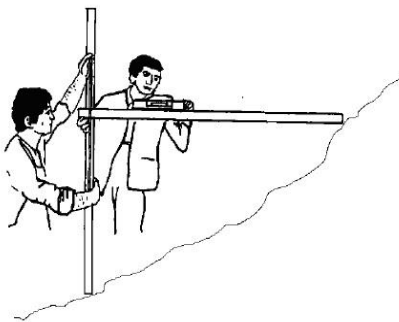


Ilustración 14. Procedimiento de medición de la altura bruta.

3.1.1.5.- Obtención de la altura neta.

La altura neta es el resultado de restar a la altura bruta 'H' las pérdidas de carga o fricción debido al rozamiento del agua, debido a que el tramo que cuenta con tubería es muy corto (1m), estas se desprecian y la altura neta es igual a: $H_n = 14 m$.

3.1.2.- Fase 2. Diseño de las turbinas a analizar en SOLIDWORKS.

3.1.2.1.- Elección de la turbina idónea para las condiciones iniciales anteriormente medidas.

La elección de la turbina idónea para las condiciones iniciales con las que contamos se obtuvo usando la altura bruta y el caudal obtenido, mediante las curvas características del comportamiento de las turbinas ilustración 5.

La turbina elegida fue una Kaplan, ya que se encuentra en la región de operación de mayor eficiencia de una turbina con los parámetros de la región anteriormente medidos.

3.1.2.1.1.- Cálculo de dimensiones del rodete de la turbina.

Para el cálculo del rodete se aplicaron las fórmulas descritas en el capítulo 2.2, nos basamos en el artículo de Zapico Gutiérrez, en donde realiza una metodología para el cálculo de las dimensiones del rodete de una turbina Kaplan.

En la tabla 4 se observan los resultados de la aplicación de las ecuaciones (4)-(14), para dimensionar el rodete de la turbina.

Tabla 4. Dimensiones del rodete de la turbina.

RESULTADOS	
N_s	665.65 (Adimensional)
D_M	1.335 m
D_m	0.523 m
H_m	0.264 m
H_1	0.553 m
v_1	0.222
H_2	0.553 m
F_1	0.560 m
G_1	0.565 m

3.1.2.1.2.- Análisis, elección y cálculo del perfil del álabe.

Para el análisis del perfil del alabe nos basamos el Libro de Pérez Fernández en el cual nos indica que debemos elegir un perfil aerodinámico de la N.A.C.A. de la nomenclatura 6306-6706, con su respectivo ángulo de ataque, ya que estas

nomenclaturas fueron estudiadas con turbinas hidroeléctricas, el propósito del presente trabajo es obtener el ángulo de ataque idóneo para una turbina Kaplan, diseñada a partir de las condiciones medidas en la fase 1; en la ilustración 15 se observa el perfil del álabe de la turbina.



Ilustración 15. Perfil del álabe elegido.

En la ilustración 16 se observan las curvas de rendimiento de una turbina Kaplan para una central hidroeléctrica, que nos indican cuales son los ángulos “ φ ” idóneos para una turbina Hidroeléctrica Kaplan, nos basaremos en estos ángulos para diseñar 5 turbinas con distintos ángulos φ y mediante simulación elegir el ángulo con el cual la turbina es más eficiente.

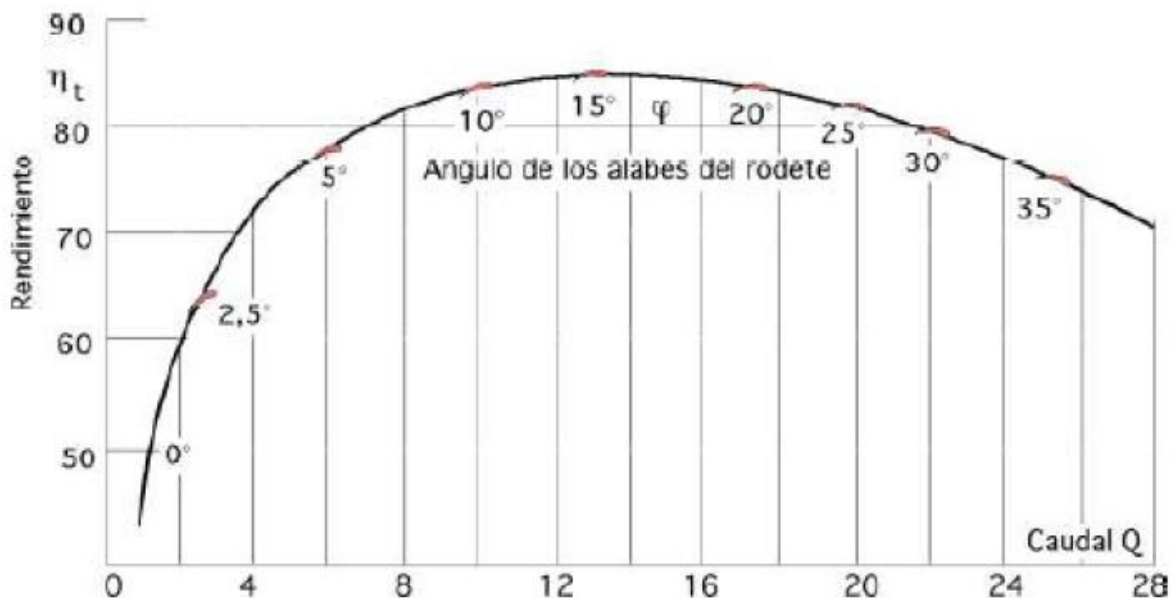


Ilustración 16. Curva de rendimiento de una turbina Kaplan. (Fernández Díez, 1987)

El número de palas se elige usando la tabla 2, con el número específico de revoluciones calculado anteriormente.

La longitud de la cuerda se calcula con la siguiente fórmula $\frac{t}{l} < 3$, tomamos el valor de 2.6, calculamos t dividiendo 360° entre el número de palas.

En la ecuación 21 se observa la fórmula del cálculo de la distancia radial de separación entre palas.

$$t = \frac{360}{Z} = 72^\circ \quad (21)$$

Donde:

- Z= Separación angular entre álabes.

En la ecuación 22 se observa la fórmula para el cálculo de la longitud de la cuerda de la pala.

$$l = \frac{t}{2.6} = 0.27 \text{ m} \quad (22)$$

Como aún no contamos con las velocidades a las que trabajara la turbina, tomamos como referencia el ángulo ϕ óptimo dadas las curvas de rendimiento en un rango de 5° - 25° con respecto a la vertical con incrementos angulares de 5° .

Para finalizar esta fase se diseñan las turbinas en SOLIDWORKS, usando las dimensiones calculadas anteriormente. En la ilustración 17 se muestran los diseños.

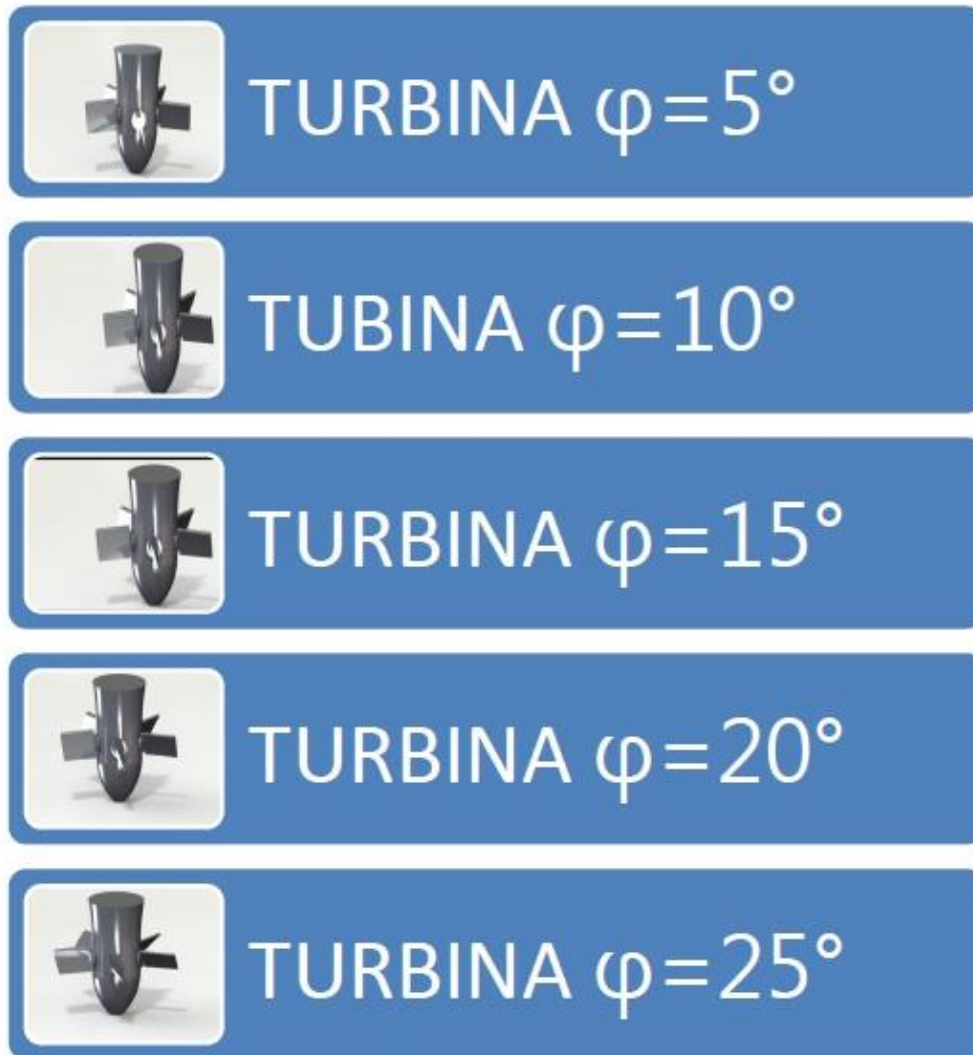


Ilustración 17. Turbinas diseñadas en el software SOLIDWORKS.

3.1.3.- Fase 3. Simulación.

- Simulación de las turbinas diseñadas en el paso anterior, insertando las condiciones iniciales de la región.

Comenzamos insertando una geometría de referencia en donde aplicaremos un flujo másico equivalente al caudal medido.

En la ilustración 18 se observa la geometría de referencia insertada, esta región es donde el flujo másico del agua comienza su trayectoria hacia la turbina.

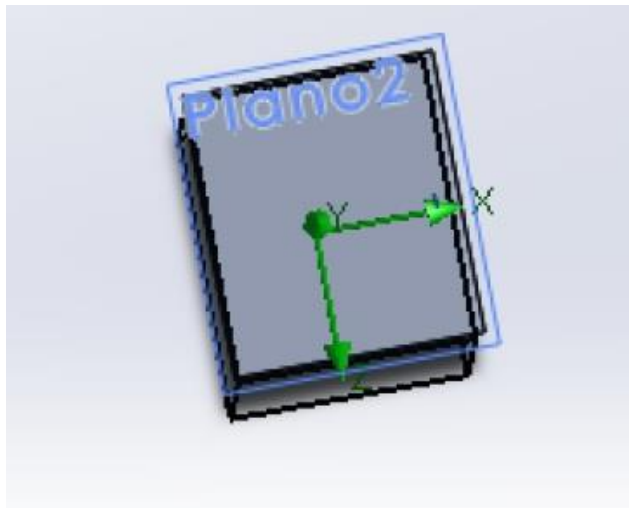


Ilustración 18. Geometría de referencia del estudio.

- Posteriormente delimitamos la región a analizar, en donde se hará el mallado.

En la ilustración 19 se muestra la delimitación del mallado de simulación de la pieza.

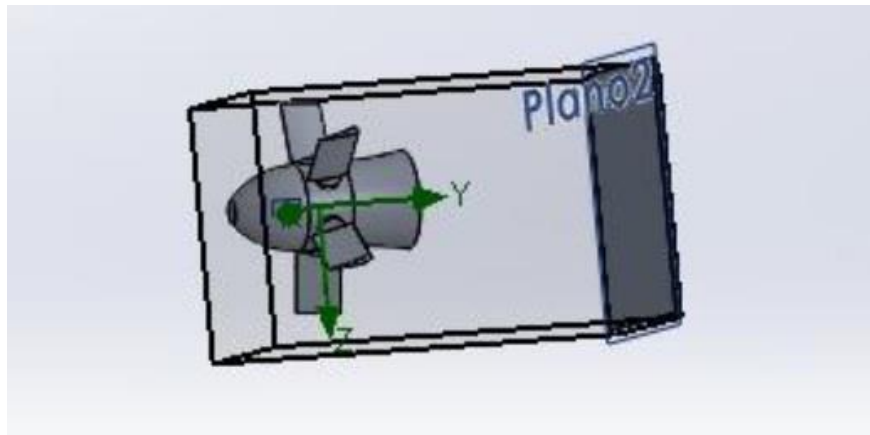


Ilustración 19. Volumen de la región a analizar.

- Configuramos el estudio, agregándole los grados de libertad y restricciones al elemento a analizar.
- Insertamos un sensor de velocidad que mida la velocidad angular del rodete durante la simulación.
- Corremos el estudio y verificamos la tabla de resultados en el reporte.

3.1.3.1.- Resultados de simulación.

Posteriormente a la simulación el software genera un reporte que contiene los resultados de los parámetros medidos de la pieza y el fluido insertado; en la tabla 5 se observan los resultados de la turbina con mayor eficiencia ($\varphi=15^\circ$).

Tabla 5. Resultados de simulación de fluidos de turbina $\varphi=15^\circ$.

Componente	Revolución 1
Velocidad angular	36.652 rad/s

- Posteriormente calculamos el torque de la turbina usando la ecuación (23).

$$T = I\alpha \quad (23)$$

Donde:

- T= Torque de la turbina (N).
 - I= Momento de inercia de la turbina ($kg.m^2$).
 - α = Aceleración angular de la turbina (kg/s^2).
-
- Y para finalizar calculamos la eficiencia de las turbinas diseñadas.

En la ecuación (24) se observa la fórmula de eficiencia de una turbina.

$$\varepsilon_T = \frac{W_f}{W_n} \quad (24)$$

Donde:

- W_f =potencia al freno de la turbina (W).
- W_n =potencia real de la turbina (W).

En la ecuación (25) se observa la fórmula de potencia al freno de la turbina, que es la potencia con incluyendo las pérdidas.

$$W_f = \left(\frac{2\pi(350)}{60} \right) (T) \quad (25)$$

En la ecuación (26) se aprecia la fórmula de potencia total de la turbina, que es la potencia excluyéndolas perdidas.

$$W_n = \rho g Q H_n \quad (26)$$

- Comparar los resultados de velocidad angular y torque de las turbinas simuladas.

En la tabla 6 se comparan los principales resultados de simulación de las 5 turbinas diseñadas.

Tabla 6. Tabla comparativa de resultados de simulación.

Turbina	Velocidad angular ($\frac{rad}{s^2}$)	Torque (N.m)
Turbina 5°	35.800	38980.000
Turbina 10°	35.856	40000.000
Turbina 15°	36.652	41894.114
Turbina 20°	36.000	41000.000
Turbina 25°	35.834	39080.000

En la ilustración 20 se observan los resultados de simulación de la velocidad angular de las turbinas diseñadas.

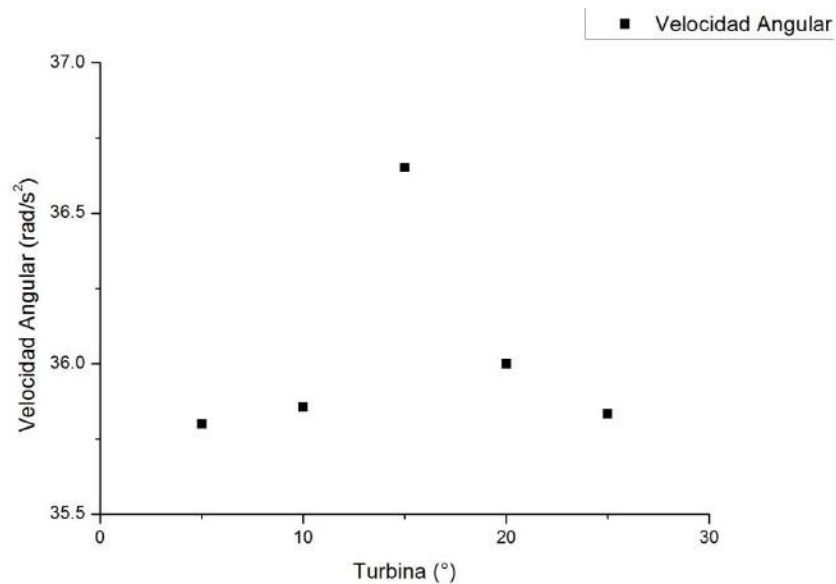


Ilustración 20. Velocidad angular de las turbinas simuladas.

En la ilustración 21 se observan los resultados de simulación del torque de las turbinas diseñadas.

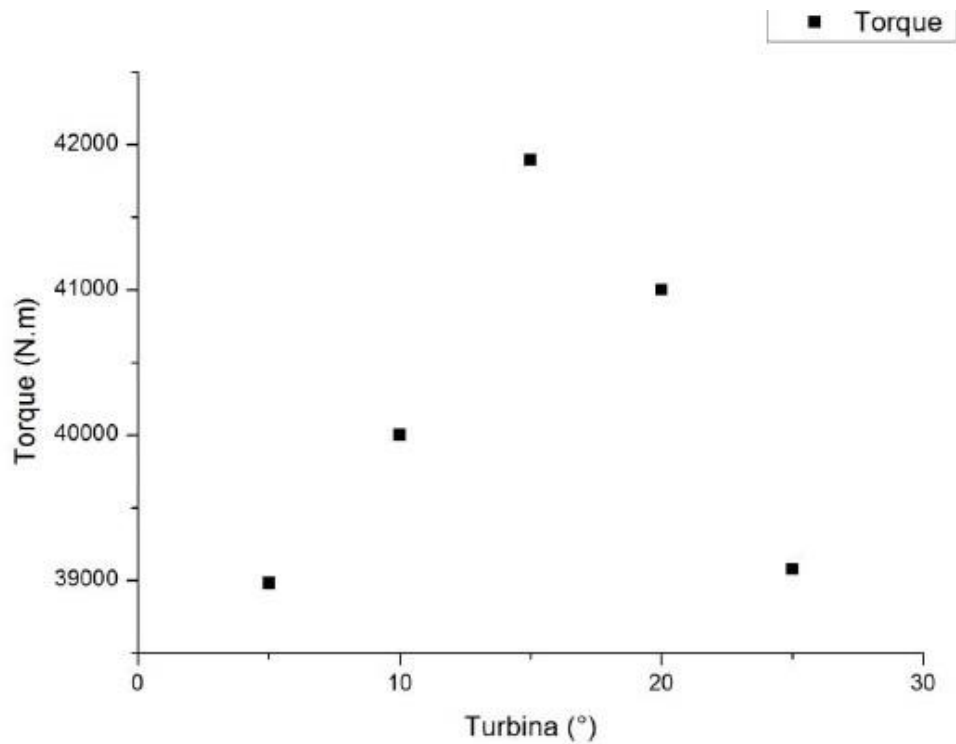


Ilustración 21. Torque de las turbinas simuladas.

- Elección de la turbina más eficiente.

Con los datos obtenidos anteriormente y aplicando la ecuación 22 se obtienen las eficiencias de las 5 turbinas, presentadas en la tabla 7.

Tabla 7. Tabla comparativa de eficiencias.

Turbina	Eficiencia (%)
Turbina 5°	78
Turbina 10°	80
Turbina 15°	86
Turbina 20°	82
Turbina 25°	78

En la tabla 8, se muestra una comparativa de los parámetros de salida de la turbina más eficiente diseñada y la turbina más eficiente encontrada en la literatura.

Tabla 8. Comparativa de datos de salida de turbina seleccionada y turbina de la literatura.

Turbina	Velocidad angular $\left(\frac{rad}{s^2}\right)$	Torque (N.m)	Eficiencia (%)
Diseñada $\phi=15^\circ$	36.652	41894.114	86%
Literatura	33.465	39000.80	84%

En la ilustración 22 se observa la eficiencia de cada una de las turbinas diseñadas, obtenidas mediante la ecuación 22.

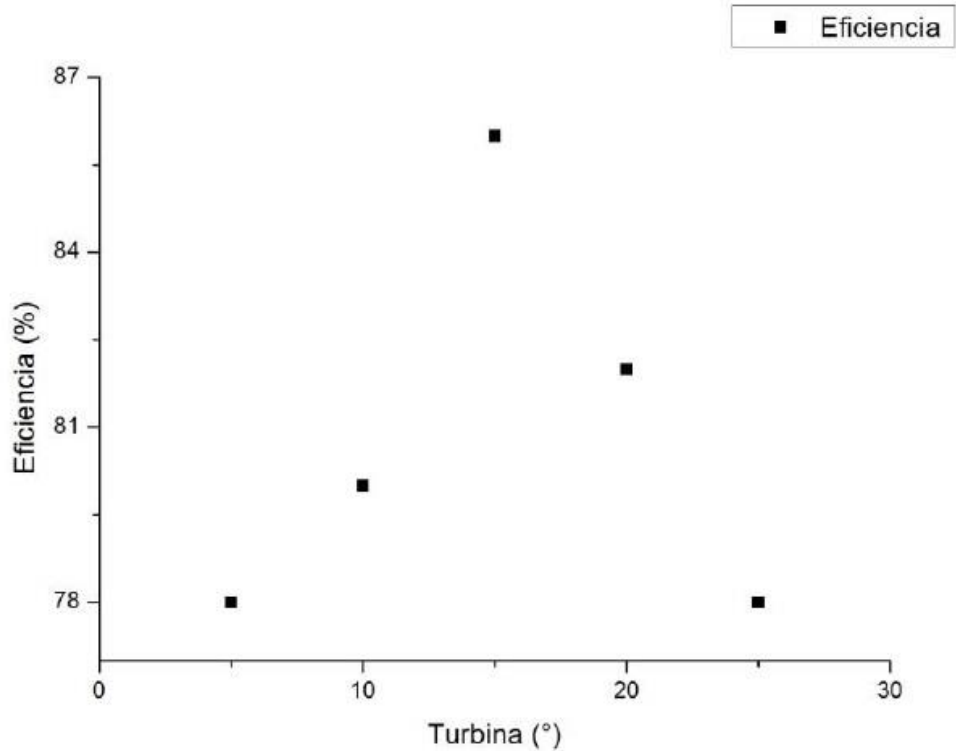


Ilustración 22. Eficiencia de las turbinas simuladas.

CAPÍTULO 4.- RESULTADOS.

Al analizar los resultados obtenidos concluimos que la hipótesis planteada se cumplió, ya que la turbina con un ángulo $\phi=15^\circ$ tiene una eficiencia del 86%, mayor a la eficiencia del 84% obtenida en el diseño más eficiente encontrado en la literatura de Lima y Villavicencio (Peralta, Darwin Giovanni, Lima Alulima, Villavicencio Erazo, & Juan, 2011). También concluimos que en un rango de 5° - 25° del ángulo del álabe (ϕ) podemos hacer eficiente las turbinas Kaplan usadas para centrales pico hidroeléctricas.

4.1.- Resultados de la simulación.

Resultados de simulación de fluidos de turbina de 25° ilustración 23 y tabla 9.

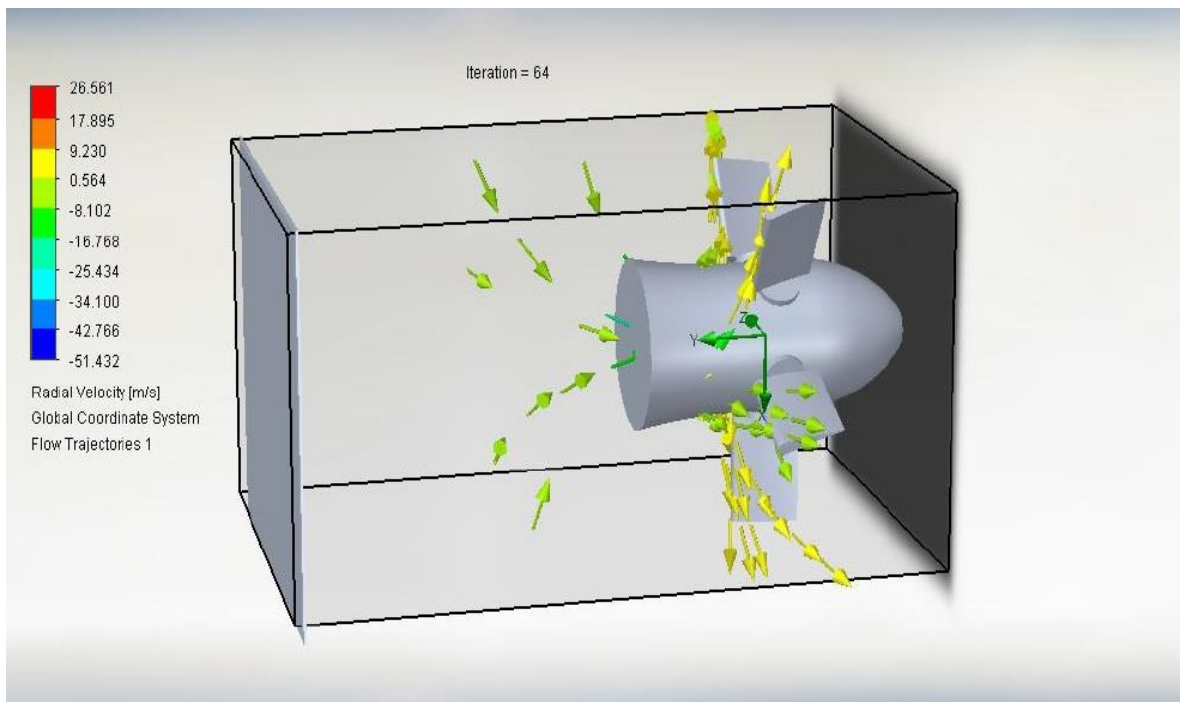


Ilustración 23. Simulación turbina 25° .

Tabla 9. Resultados simulación 25° .

Componente	Revolución 1
Velocidad angular	35.834 rad/s

Resultados de simulación de fluidos de turbina de 20° ilustración 24 y tabla 10.

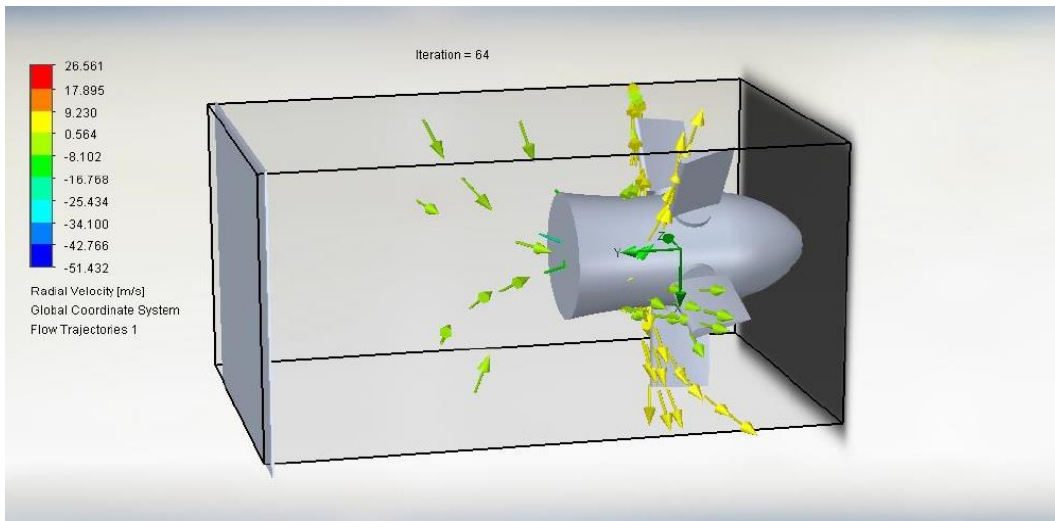


Ilustración 24. Simulación turbina 20°.

Tabla 10. Resultados simulación 20°.

Componente	Revolución 1
Velocidad angular	36.000 rad/s

Resultados de simulación de fluidos de turbina de 15° ilustración 25 y tabla 11.

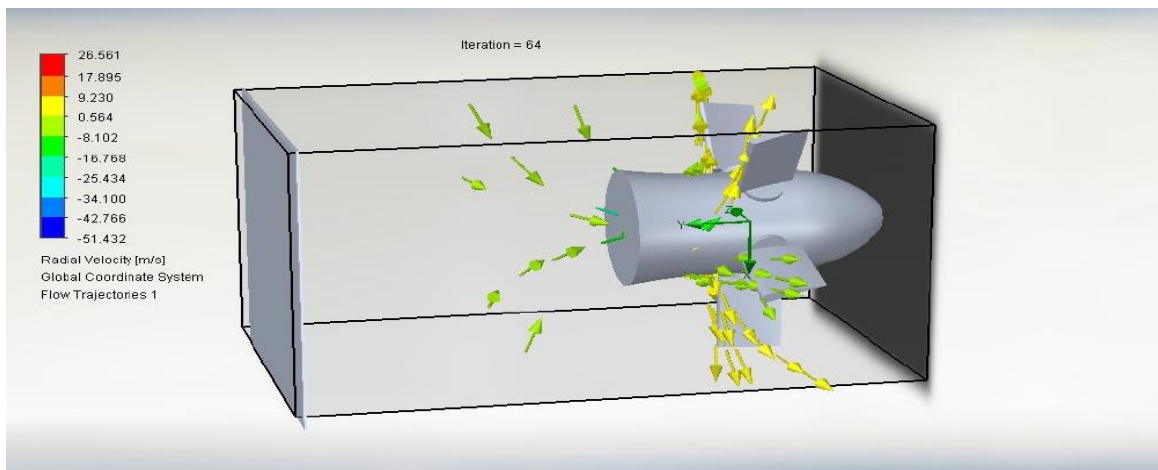


Ilustración 25. Simulación turbina 15°.

Tabla 11. Resultados simulación 15°.

Componente	Revolución 1
Velocidad angular	36.652 rad/s

Resultados de simulación de fluidos de turbina 10° ilustración 26 y tabla 12.

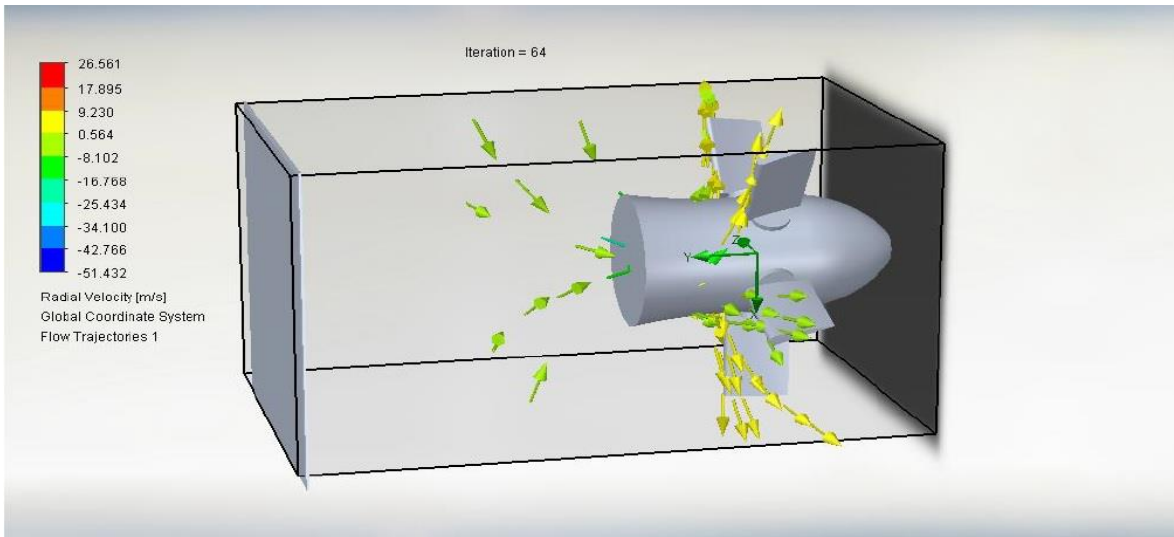


Ilustración 26. Simulación turbina 10°.

Tabla 12. Resultados simulación 10°.

Componente	Revolución 1
Velocidad angular	35.856 rad/s

Resultados de simulación de fluidos de turbina 5° ilustración 27 y tabla 13.

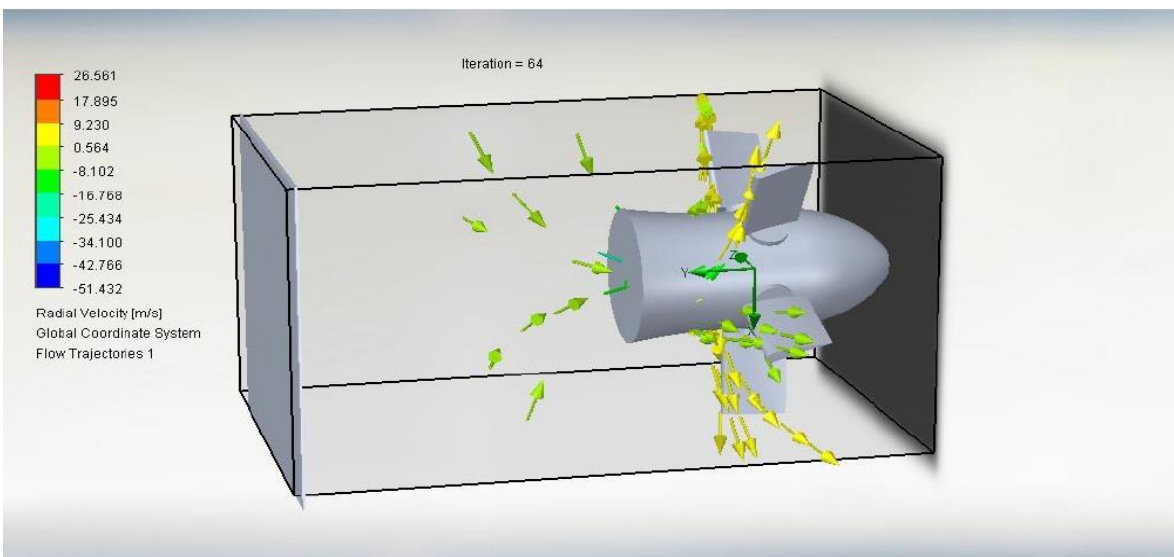


Ilustración 27. Simulación turbina 5°.

Tabla 13. Resultados simulación 5°.

Componente	Revolución 1
Velocidad angular	35.800 rad/s

FUENTES DE INFORMACIÓN.

- Bhusal, P., Zahnd, A., Eloholma, M., & Halonen, L. (2007). Energy-efficient Innovative Lighting and Energy Supply Solutions in Developing Countries. En P. Bhusal, A. Zahnd, M. Eloholma, & L. Halonen. International Review of Electrical Engineering (I.R.E.E.).*
- Desai, A., Mukhopadhyay, I., & Ray, A. (2015). Theoretical analysis of a Pico-hydro power system for energy generation in rural or isolated area. Power and Energy Engineering Conference (APPEEC).*
- Fernández Díez, P. (1987). Turbinas hidráulicas y bombas centrífugas. Cantabria.*
- Gaiser, K., Erickson, P., Stroeve, P., & Delplanque, J. P. (2016). An experimental investigation of design parameters for pico-hydro Turgo turbines using a response surface methodology. En K. Gaiser, P. Erickson, P. Stroeve, & J. P. Delplanque. Renewable Energy.*
- Mataix, C. (1986). Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas. Madrid: Ediciones del Castillo.*
- Mott, R. L. (1996). Mecánica de Fluidos Aplicada. Ohio: Pearson.*
- Nalubega, T., Da Silva, I., Okou, R., & Abbo, M. S. (2014). Analysis of induction generator controller techniques for Pico hydropower a case study of A 3kW Pico hydropower scheme in Kasese, Western Uganda. South Africa: IEEE.*
- Peralta, T., Darwin Giovanni, Lima Alulima, Villavicencio Erazo, M. W., & J. C. (2011). Diseño, construcción y análisis de la máxima eficiencia de un prototipo de pico central hidroeléctrica accionado por turbina tipo KAPLAN o de hélice. región sur de Ecuador.*
- Ronald, A. (1985). Model Research: The National Advisory Committee for Aeronautics. Madison: NASA SP.*
- Sturdivant, R., Stambaugh, M., Zahnd, A., & Chong, E. (2017). Pico-Hydro Electric Power In The Nepal Himalayas. Green Technologies Conference (GreenTech).*
- Vicéns, J. L., Zamora, B., & Kaiser, A. S. (2011). Flow Simulation in a Kaplan Turbine using Computational Fluid Dynamics: Development of a Teaching-Learning Method. En F. Universitaria, Flow Simulation in a Kaplan Turbine using*

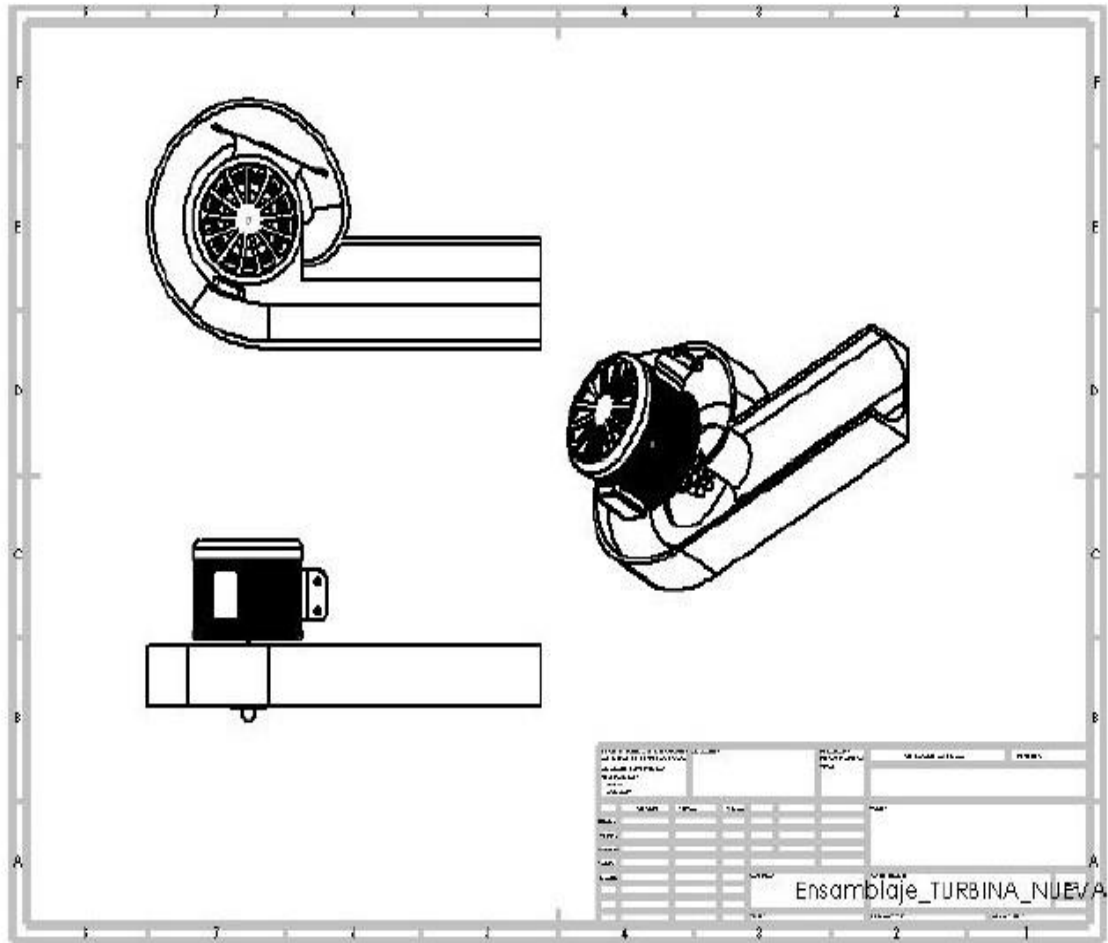
Computational Fluid Dynamics: Development of a Teaching-Learning Method (págs. 3-12).

Williamson, S. J., Stark, B. H., & Booker, J. D. (2014). Low head pico hydro turbine selection using a multi-criteria analysis. En S. J. Williamson, B. H. Stark, & J. D. Booker. Renewable Energy.

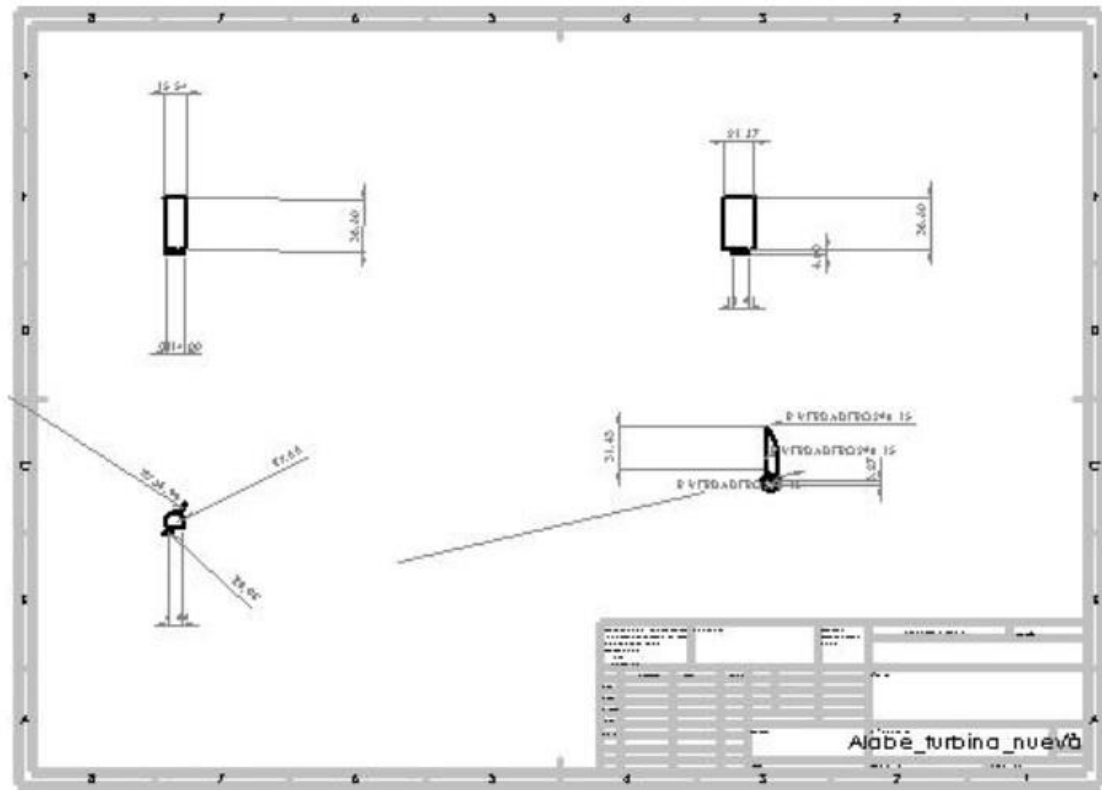
Zapico Gutiérrez, P. (2016). Pre-dimensioning Kaplan and Pelton turbines. En P. Zapico Gutiérrez. Técnica Industrial.

ANEXOS.

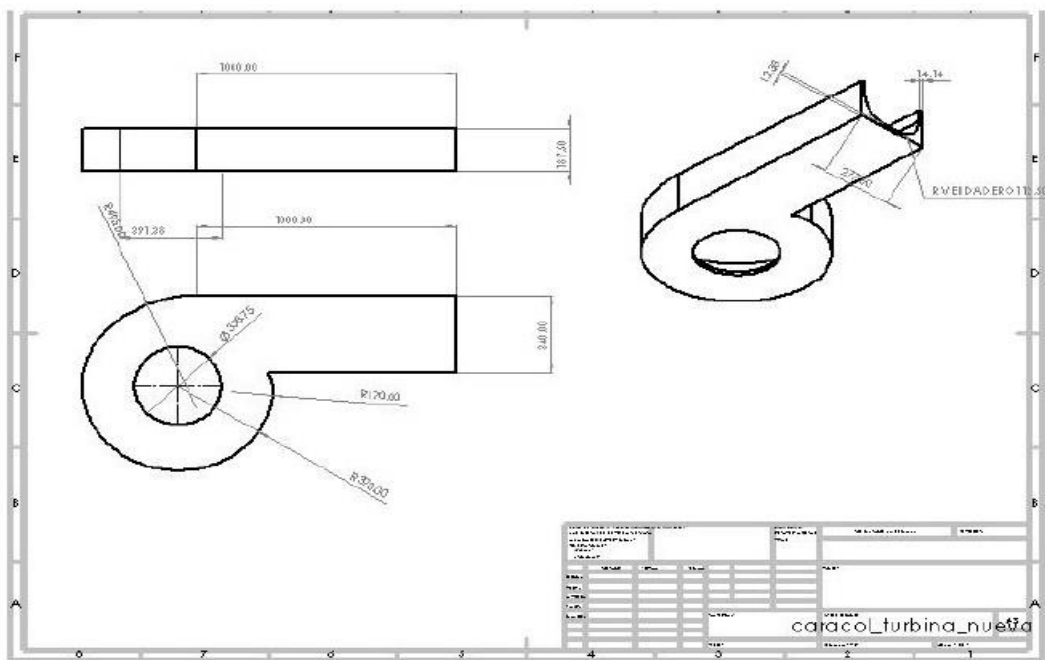
Planos de la central hidroeléctrica.



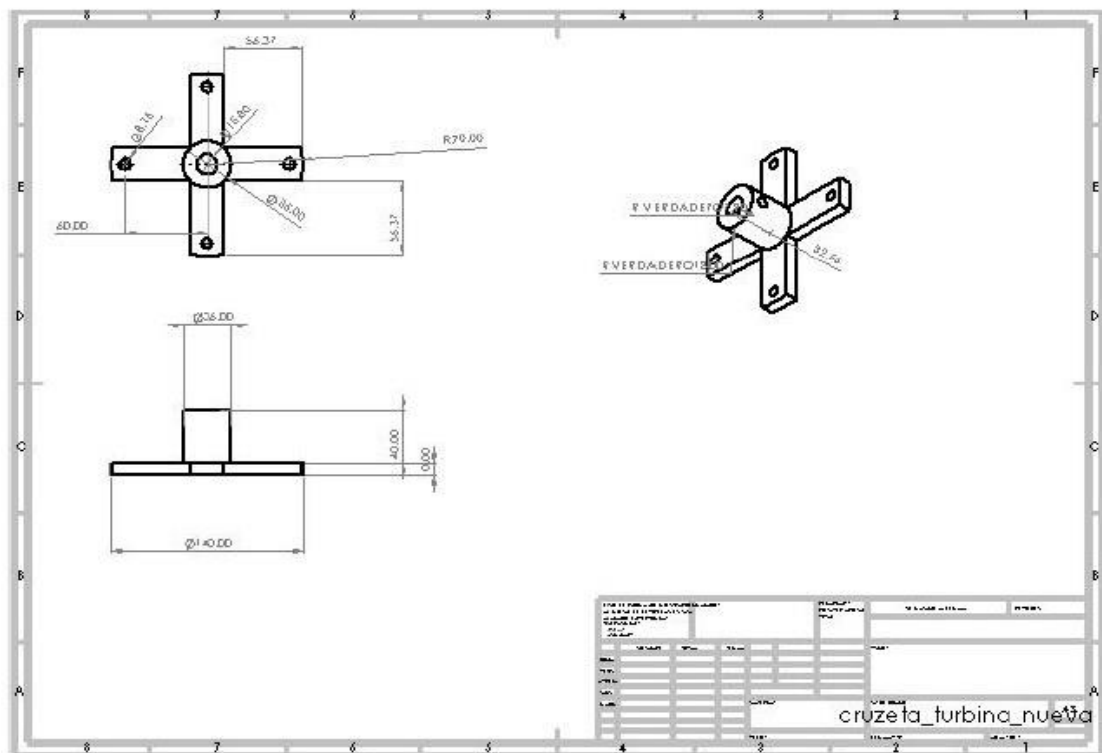
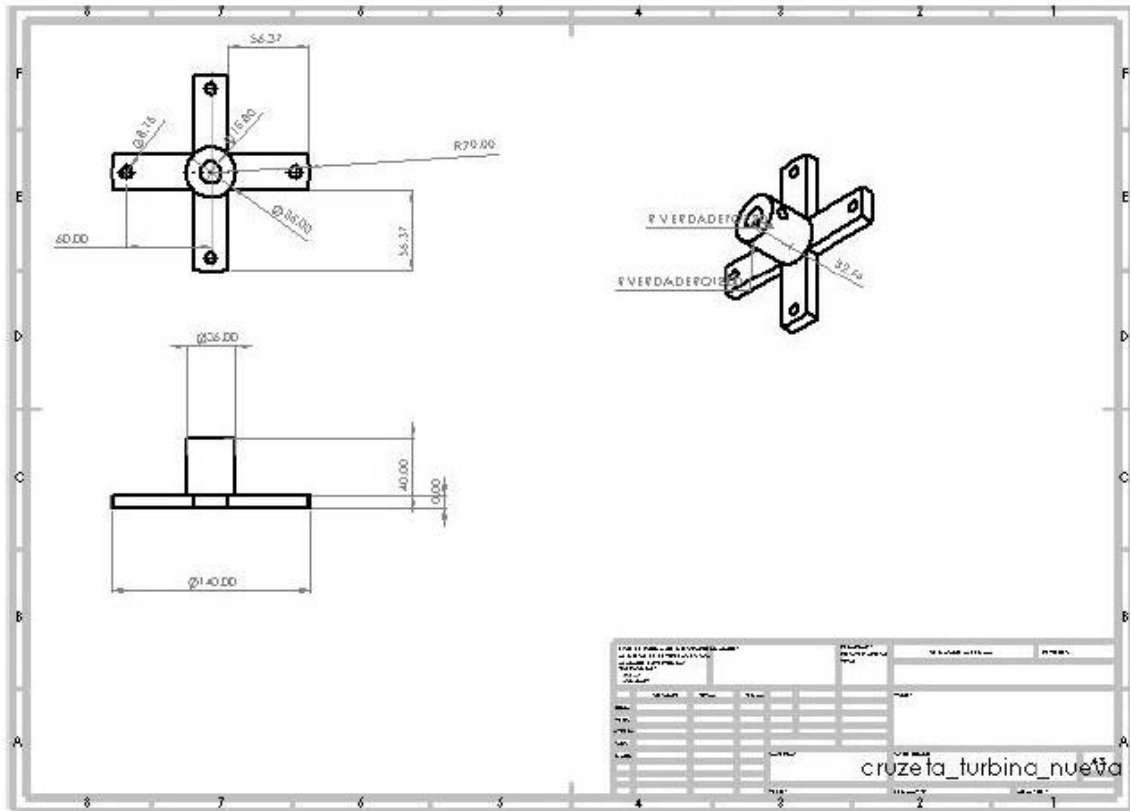
Planos del alabe de la turbina $\phi=15^\circ$



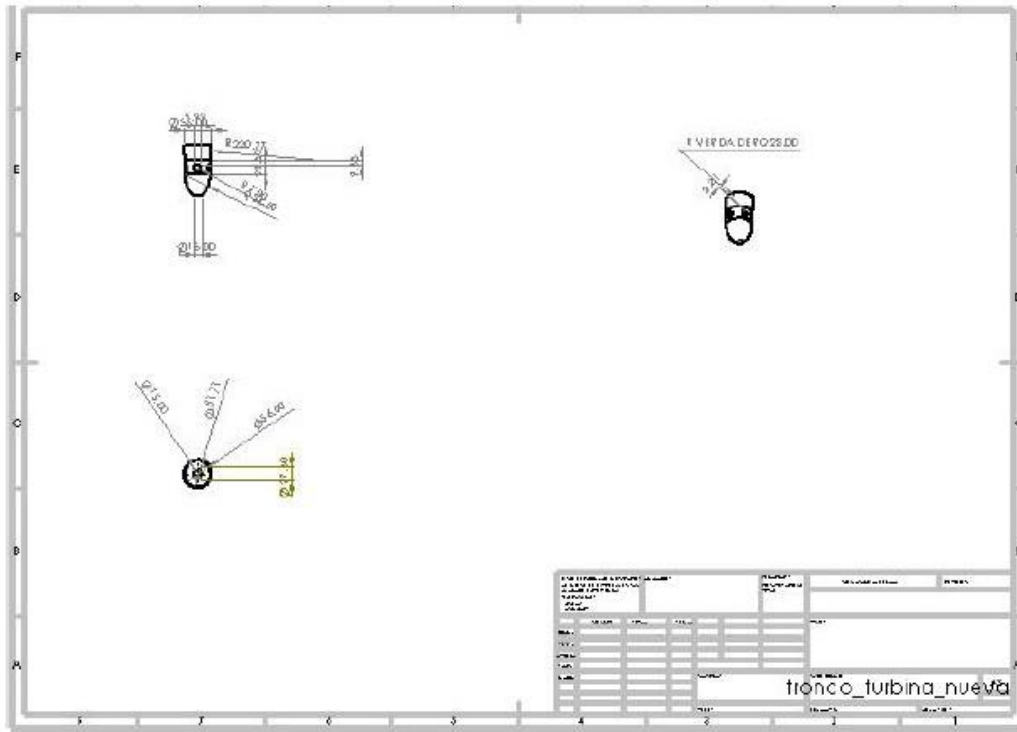
Planos del caracol.



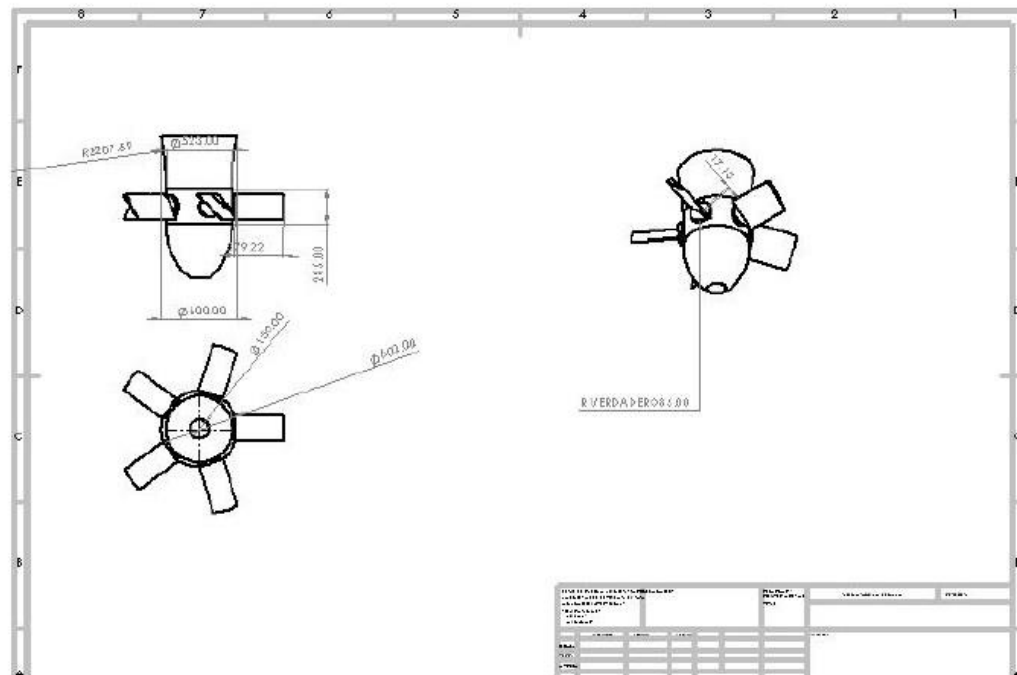
Planos de la cruzeta de sujeción



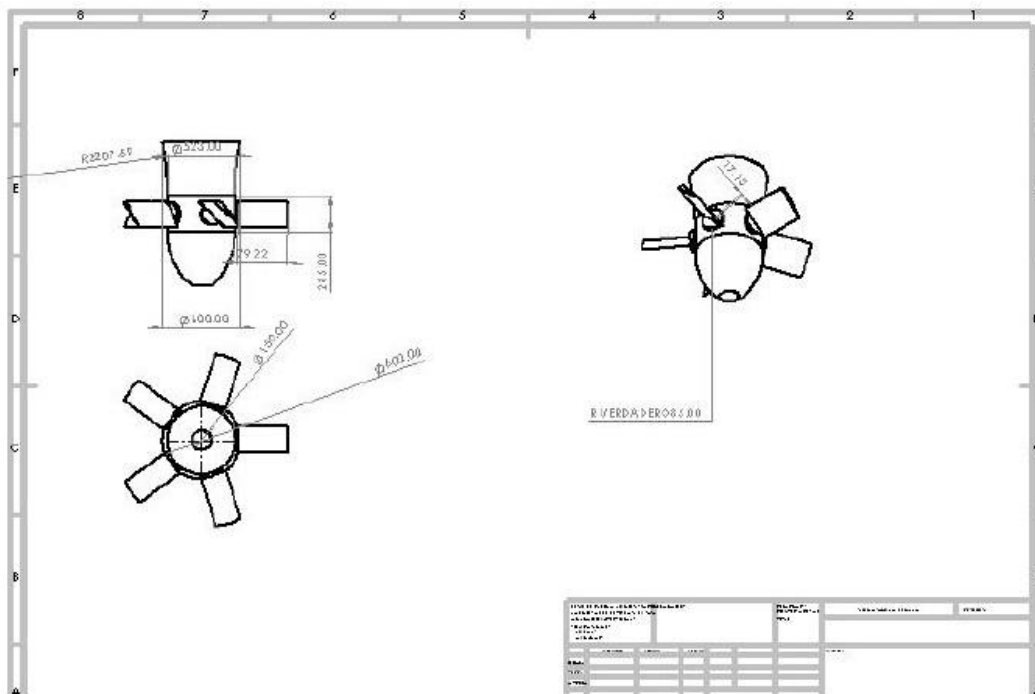
Planos del tornillo de sujeción.



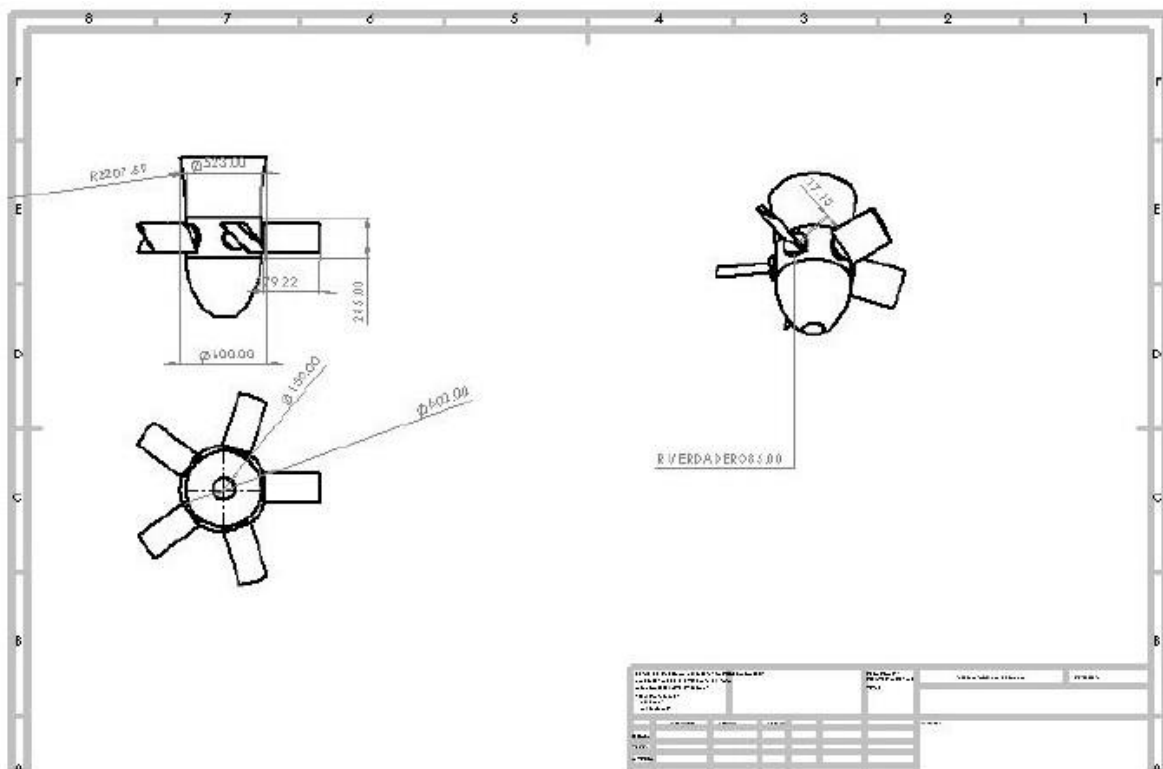
Planos de la turbina $\phi=10^\circ$



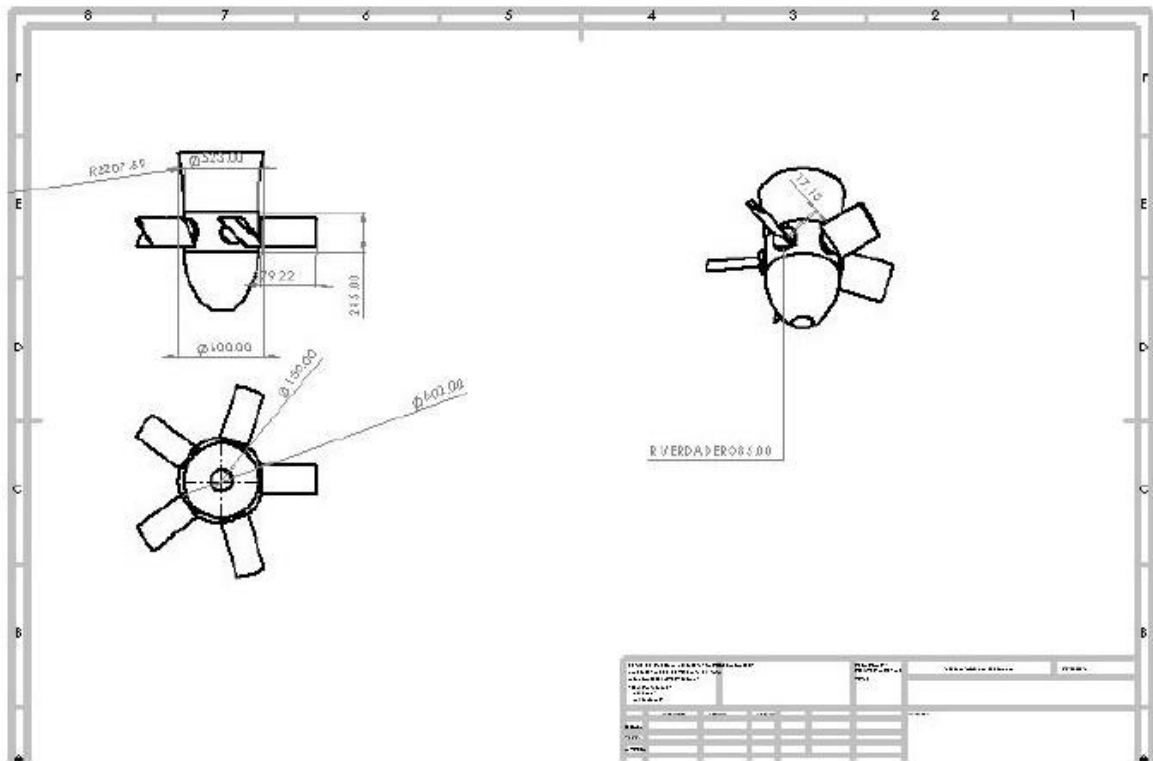
Planos de la turbina $\phi=15^\circ$



Planos turbina $\phi=20^\circ$



Planos de la turbina $\phi=25^\circ$



Planos de la turbina $\phi=30^\circ$

