

**TÍTULO DEL TRABAJO DE GRADO**

SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA BASADO EN LA  
TURBINA DE GORLOV PARA LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS  
RESIDUALES DE SAN SILVESTRE EN EL MUNICIPIO DE  
BARRANCABERMEJA

**AUTORES**

JAIME ESNEYDER DÍAZ ROLDAN - Código 1121816998

HARBAY ALBERTO SANCHEZ VARGAS - Código 13748938

UNIDADES TECNOLÓGICAS DE SANTANDER  
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES E INGENIERÍA  
PROGRAMA INGENIERIA ELECTROMECANICA  
BARRANCABERMEJA

Fecha de Presentación: (09/03/2020)



**TÍTULO DEL TRABAJO DE GRADO**  
SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA BASADO EN LA  
TURBINA DE GORLOV PARA LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS  
RESIDUALES DE SAN SILVESTRE EN EL MUNICIPIO DE  
BARRANCABERMEJA

**AUTORES**

JAIME ESNEYDER DÍAZ ROLDAN - Código 1121816998  
HARBEY ALBERTO SANCHEZ VARGAS - Código 13748938

**Trabajo de Grado para optar al título de**  
Ingeniero electromecánico

**DIRECTOR**

LUIS OMAR SARMIENTO ALVAREZ

GRUPO DE INVESTIGACIÓN – DIANOIA

UNIDADES TECNOLÓGICAS DE SANTANDER  
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES E INGENIERÍA  
PROGRAMA INGENIERIA ELECTROMECAÁNICA  
BARRANCABERMEJA

Fecha de Presentación: (09/03/2020)

## Nota de Aceptación

Trabajo de grado titulado: Sistema de generación de energía eléctrica basado en la turbina de Gorlov para la planta de tratamiento de aguas residuales de san silvestre en el municipio de Barrancabermeja.

Presentado por: JAIME ESNEYDER DÍAZ ROLDAN y HARBEY ALBERTO SANCHEZ VARGA Para optar el título de INGENIERO ELECTROMECAÁNICO.

---

---

---

---

Firma del jurado

---

Firma del Jurado

## DEDICATORIA

Desde mi posición tan humilde le otorgo la Gloria y Honra a Dios porque sin su voluntad llena de amor, mi logro no se hubiese culminado.

En esta etapa tan relevante de mi vida, ofrezco un sentido agradecimiento dedicando este triunfo, al esfuerzo inmarcesible realizado por mi madre - abuela Olinda Díaz, esa mujer siempre dispuesta a todo; fue mi cimiento y las columnas que sostuvieron con fortaleza y dedicación mi más añorado sueño que hoy veo plasmado como profesional. A mi padre Jaime Díaz y mi tía Nancy por su apoyo incondicional, económico y moral.

A mi esposa Zaida Yaneth Pérez y su psicología inversa que siempre desafié mi ego, pero ahora comprendo su altruismo, ese que solo buscaba mantener mi lado gladiador incólume, siempre dispuesta a dar lo mejor de sí, desafiando cualquier obstáculo que emergiera en el camino, gracias por tu entrega, por darme esas fuerzas cuando quería desistir, por ser esa constancia, mi cómplice, por estar ahí cada vez que te necesite, mi guerrera y luchadora en mi arduo caminar, te amo mi tonino.

Así mismo, retribuyo también el logro de este, a familiares y a cada uno de los que siempre participaron activamente en mi logro a través de la motivación, el apoyo, a quienes de la mano de Dios inspiró la efectiva culminación y termino de este proyecto.

**JAIME ESNEYDER DÍAZ ROLDAN**

Dedico esta tesis primeramente a Dios, que fue el que me permitió culminar con éxito esta hermosa etapa de mi vida, etapa en la cual pude entender y valorar cada una de las bendiciones con las cuales él me rodea

A mi madre, por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, sus valores, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien, pero más que nada, por infundir en mi la lucha y el deseo de superación, resaltando su apoyo en los momentos de duda, desesperación y felicidad. A mi padre, por los ejemplos de perseverancia y constancia que lo caracterizan y que me ha infundado siempre, por el valor mostrado para salir adelante y su apoyo incondicional

A mis hijos y esposa, que siempre han sido el motor funcional de mi existencia, por el apoyo y fortaleza en mi debilidad de abandonar lo iniciado, cada vez que los veía y sentía de cada uno su presencia me fortalecía en continuar y seguir avanzando en culminar mi carrera; por la paciencia y soportar mis largas ausencias cuando debía alejarme para entregarme a mis estudios, los amo, por ustedes valió la pena

A todas y cada una y de las personas que de una u otra forma apostaron a mi causa y nunca dudaron de mis capacidades, que con sus palabras de optimismo y ánimo me alimentaban para lograr mis objetivos, gracias por todo el amor y apoyo.

**HARBEY ALBERTO SANCHEZ VARGAS**

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios por permitirnos elaborar este proyecto, a nuestros padres por su compañía incondicional, familiares, amigos y todas aquellas personas que siempre han estado a nuestro lado apoyándonos en el transcurso de nuestra formación profesional.

A las Unidades Tecnológicas de Santander (UTS), regional Barrancabermeja, por abrirnos sus puertas y brindarnos espacios para la formación como ingenieros, dejando en nosotros las bases pertinentes para nuestra proyección profesional.

A nuestro Director de proyecto Luis Omar Sarmiento Álvarez, por la enseñanza y apoyo durante el desarrollo de esta tesis, muestra del compromiso y dedicación a la educación.

Finalmente agradecemos a quien lee este apartado de nuestra tesis, por reconocer nuestras experiencias, investigaciones y conocimiento, dentro de su repertorio de información mental.

**AUTORES**

## TABLA DE CONTENIDO

	pág.
1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN .....	17
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	17
1.2. JUSTIFICACIÓN.....	19
1.3. OBJETIVOS .....	20
1.3.1. Objetivo general .....	20
1.3.2. Objetivos específicos.....	20
1.4. ESTADO DEL ARTE / ANTECEDENTES .....	21
2. MARCOS REFERENCIALES .....	27
2.1. MARCO TEORICO .....	27
2.1.1. Máquinas Hidráulicas .....	27
2.1.2. Ruedas hidráulicas .....	29
2.1.3. Turbinas Hidráulicas .....	30
2.1.4. Descripción sumaria de algunos tipos de turbinas hidráulicas .....	34
2.1.5. Estudio general de las turbinas hidráulicas .....	36
2.1.6. Propiedades de los fluidos.....	39
2.1.7. Conversión hidro-cinética. ....	43
2.2. MARCO HISTORICO.....	46
2.3. MARCO CONCEPTUAL .....	50
2.3.1. La Turbina Hidrocinética tipo Gorlov.....	50
3. DESARROLLO DEL TRABAJO DE GRADO .....	59
3.1. DISEÑAR UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA AISLADO BASADO EN LA TURBINA DE GORLOV .....	59

3.1.1. Cálculos de diseño turbina tipo Gorlov .....	61
3.1.2. Análisis de eficiencia de acuerdo a la variación del ángulo en los alabes. ....	69
3.1.3. Modelado de la turbina Gorlov en SolidWorks .....	83
3.1.4. Planos mecánicos turbina Gorlov .....	86
3.1.5. Característica de materiales .....	86
3.2. EVALUAR EL MODELO ESTÁTICO DE LA TURBINA DE GORLOV MEDIANTE EL PROGRAMA SOLIDWORKS PARA CONOCER EL COMPORTAMIENTO DE LA PIEZA BAJO CONDICIONES DE CONTORNO PREVIAMENTE DEFINIDAS .....	90
3.2.1. Análisis estático de la tubería .....	90
3.2.2. Análisis estático de las aspas .....	94
3.3. ANALIZAR MEDIANTE FLOW SIMULATION EL MODELO DINÁMICO DE LA TURBINA DE GORLOV PARA DETERMINAR LA EFICIENCIA DEL SISTEMA. ....	102
3.3.1. Resultados de la simulación .....	102
3.4. REALIZAR UN ANÁLISIS TÉCNICO ECONÓMICO DEL SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA PARA LA PTAR SAN SILVESTRE .....	111
4. RESULTADOS .....	127
5. CONCLUSIONES .....	129
6. RECOMENDACIONES .....	132
7. BIBLIOGRAFÍA .....	133
8. ANEXOS .....	135

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Ruedas hidráulicas.....	30
Figura 2. Clasificación de las turbinas .....	32
Figura 3. Entrada del agua en las turbinas .....	33
Figura 4. Turbinas de acción y sus tipos .....	35
Figura 5. Turbinas de reacción y sus tipos .....	36
Figura 6. Turbinas de reacción de Michel o Banki .....	36
Figura 7. Estado del agua .....	38
Figura 8. Relación entre velocidades .....	46
Figura 9. Turbina helicoidal Gorlov horizontal .....	54
Figura 10. Turbina Helicoidal Gorlov Vertical .....	55
Figura 11. Viscosidad dinámica del agua a varias temperaturas .....	64
Figura 12. Alabes ángulo 0° .....	69
Figura 13. Alabes ángulo 45° .....	74
Figura 14. Alabes ángulo 90° .....	77
Figura 15. Modelo de la turbina Gorlov en Solidworks .....	85
Figura 16. Análisis esfuerzo deformación.....	89
Figura 17. Mallado de la tubería.....	91
Figura 18. Análisis estático de la tubería.....	94
Figura 19. Densidad del fluido relación de torque .....	103
Figura 20. Densidad del fluido relación de masa .....	103
Figura 21. Velocidad relación de torque .....	104
Figura 22. Velocidad a 48 interacciones.....	105
Figura 23. Presión.....	105
Figura 24. Temperatura del fluido .....	106
Figura 25. Distancia entre turbinas Gorlov .....	112

Figura 26. Sistema de generación.....	112
Figura 27. Diagrama sistema de control.....	113
Figura 28. Valor Actual Neto y TIR.....	126

## LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Análisis de investigaciones Turbina Tipo Gorlov .....	61
Tabla 2. Resumen cálculo de potencias.....	68
Tabla 3. Condiciones ambientales .....	70
Tabla 4. Volumen de entrada flujo.....	71
Tabla 5. Presión total .....	71
Tabla 6. Condiciones ambientales .....	75
Tabla 7. Volumen de entrada flujo.....	75
Tabla 8. Presión total .....	75
Tabla 9. Condiciones ambientales .....	78
Tabla 10. Volumen de entrada flujo.....	79
Tabla 11. Presión total .....	79
Tabla 12. Variación del ángulo de inclinación .....	81
Tabla 13. Datos de diseño Turbina tipo Gorlov .....	83
Tabla 14. Propiedades mecánicas material ABS - Alabes.....	87
Tabla 15. Propiedades físicas y térmicas .....	88
Tabla 16. Propiedades mecánicas .....	88
Tabla 17. Información de modelo .....	95
Tabla 18. Sistema de unidades .....	96
Tabla 19. Propiedades del material.....	96
Tabla 20. Cargas y sujeciones .....	96
Tabla 21. Información de malla .....	98
Tabla 22. Información de malla - Detalles .....	98
Tabla 23. Análisis Tensión de Von Mises .....	100
Tabla 24. Desplazamientos resultantes y deformación unitaria.....	101

Tabla 25. Condiciones ambientales .....	107
Tabla 26. Volumen de entrada flujo.....	108
Tabla 27. Presión total .....	108
Tabla 28. Cuadro de cargas.....	114
Tabla 29. Suministro de materiales .....	115
Tabla 30. Suministro de materiales cuarto de control.....	115
Tabla 31. Ingeniería e instalación.....	116
Tabla 32. Total, de inversión .....	117
Tabla 33. Costos operacionales .....	120
Tabla 34. Costos de inversión .....	121
Tabla 35. Otros costos de inversión asociados .....	121
Tabla 36. Costos de inversión mano de obra. ....	122
Tabla 37. Costo inicial y factores de operación .....	122
Tabla 38. Bases de cálculo para el valor de la energía proyectada por año .....	123
Tabla 39. Costo del gasto energético proyectado .....	124
Tabla 40. Flujo de caja proyectado .....	125
Tabla 41. Premisas de factibilidad financiera .....	125

**LISTA DE ANEXOS**

	pág.
Anexo 1. Turbina Gorlov	135
Anexo 2. Alabes con ángulo de 84°	136
Anexo 3. Tubería	137
Anexo 4. Tapa superior	138
Anexo 5. Engranaje	139
Anexo 6. Cobertura superior	140
Anexo 7. Acople	141
Anexo 8. Ficha técnica generador eléctrico	142

## RESUMEN EJECUTIVO

El presente proyecto trata sobre el diseño de un sistema de generación de energía eléctrica con turbinas tipo Gorlov ubicadas a la salida de una PTAR, donde se especificaron las características técnico-económicas del sistema, con el objetivo de satisfacer un cierto porcentaje de la demanda de energía.

El estudio del sistema se fundamentó en el modelo de las turbinas helicoidal de generación de energía eléctrica aislado basado específicamente en la de Gorlov, que permitió dimensionar los componentes ubicados en la línea de descarga de la PTAR; para luego evaluar el modelo estático de la turbina mediante el programa SolidWorks y de esta forma se prescribió el comportamiento de la pieza bajo condiciones de contorno previamente definidas.

Mediante el programa FlowSimulation se analizó el modelo dinámico de la turbina para determinar la eficiencia del sistema, desarrollando un análisis técnico económico del sistema de generación de energía que conlleva a generar un presupuesto general para la PTAR San Silvestre. Una vez finalizado dicho estudio, en específico se puede concluir que al final, se obtuvo un diseño destinado con una capacidad de 16 Kw de potencia eléctrica generada.

## INTRODUCCIÓN

La relación de la energía y el agua es transcendental para que las nuevas generaciones se vinculen y hagan parte en la contribución de un futuro sostenible, creando estudios que incluyan soluciones a la disminución del consumo energético en los sistemas de obtención, distribución y tratamiento de agua, en el desarrollo de políticas sectoriales, en el ámbito del agua y la energía, que permitan obtener múltiples beneficios y aprovechar oportunidades de ahorro, tanto de agua como de energía, y sumado a ello, las oportunidades de desarrollo económico y social que se traducen en una mejor calidad de vida.

El agua es uno de los compuestos más abundantes de la naturaleza y cubre aproximadamente las tres cuartas partes de la superficie terrestre. El agua hecha nube puede contener mucha energía eléctrica en forma de rayos. (Severiche, 2013) La energía se manifiesta de muchas formas: luminosa, calorífica, eólica, magnética, gravitatoria, nuclear, cinética, bioquímica, química, mecánica, eléctrica. Esta última, la eléctrica, ha brindado tal versatilidad en sus usos y aplicaciones que se ha vuelto fundamental en la sociedad moderna.

El presente proyecto tiene como propósito realizar un Sistema de Generación de Energía Eléctrica basado en la Turbina de Gorlov para la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de San Silvestre en el Municipio de Barrancabermeja del casco urbano, teniendo en cuenta la necesidad del municipio; ya que la entrega de estas aguas residuales se hace directamente a las zanjas naturales sin ningún tipo de tratamiento.

El trabajo intenta mostrar que estas plantas (PTAR) se pueden aprovechar, ya que producen energía, sumergiendo una turbina para generar electricidad y de paso,

obtener energía limpia en entornos de sostenibilidad, sirviéndose siempre de lo existente en la naturaleza y los recursos que ella nos brinda. De esta manera sustentar que se puede utilizar el agua para la generación de energía, a partir de los recursos hídricos. La fuerza de las corrientes de agua líquida se transforma, mediante turbinas, en energía mecánica que hace girar los generadores; o la presión del agua como vapor se controla para hacer girar turbinas.

En una planta de tratamiento de aguas residuales se optimizan los procesos físicos y bioquímicos así como los costos que ello implica, haciendo un uso intensivo del área y procurando conseguir la mayor eficiencia posible, a la vez que se respetan las restricciones o exigencias de la normativa con el objeto de proteger el cuerpo receptor (ecosistema) y no afectar los usos que el hombre realiza del mismo.(Abefase, 2012).

## **1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN**

### **1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

En la actualidad la sociedad moderna ha aumentado el incremento del consumo energético que en el pasado. Los hogares, las industrias y empresas, el transporte, son los sectores de mayor consumo de energía. Esto conlleva a que en un futuro no muy lejano la sociedad debe resolver el agotamiento de los recursos y la contaminación ambiental.

Como consecuencia de esta desfavorable situación, el municipio de Barrancabermeja no ha apostado en incluir programas que desarrollen nuevas alternativas de generar energía limpia, ya que esta es renovable y amigable con el medio ambiente. Realizándose un estudio de investigación, en la ciudad se está construyendo una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) en el casco urbano. Es aquí donde la falta de pocas tecnologías ha hecho que no se visiona al tomar posesión de las bondades que al contar con dicha planta el caudal cuya corriente podría permitir aprovechar de ella la generación de energía eléctrica.

Así la idea de utilizar todos los recursos que esta PTAR maneja, no es descabellada, se podría aprovechar entre ellos, el recurso hídrico y energético, ya que, al ser instalada esta turbina helicoidal de Gorlov, en la salida del agua, este proceso por diferencias de presión en el caudal, va generando energía potencial, y puede disminuir la carga hidráulica utilizando únicamente la energía producida por el flujo del agua.

Como resultado de un número creciente de investigaciones, se ha determinado que, en la actualidad, existe una creciente demanda por crear y desarrollar nuevas tecnologías para la generación de energía renovable y ecológica gracias a sus

grandes ventajas por provenir de fuentes naturales que se reponen relativamente en poco tiempo. Es así que, de acuerdo a esto, se plantea la siguiente pregunta de investigación: ¿Cómo se puede aprovechar por medio de un sistema de generación de energía eléctrica basado en la turbina de Gorlov extraer electricidad para la planta de tratamiento de aguas residuales de San Silvestre en el municipio de Barrancabermeja?

## 1.2. JUSTIFICACIÓN

Esta alternativa de tecnología que se quiere ofrecer para que se implemente en la PTAR de San Silvestre en Barrancabermeja, se realizaría por medio de una turbina basada en la GORLOV, cuyo propósito es la de generar energía eléctrica, son turbinas en corriente de agua que generan potencia mecánica independiente de la dirección del flujo de agua. Una solución que se planteó a esta problemática es la posibilidad de instalar y desarrollar este sistema de turbinas al entrar a la propia planta de tratamiento de agua residuales PTAR, y revertir este en la autogeneración de energía a partir de la misma, estimando que este proceso traerá grandes beneficios y de esta forma contribuya a disminuir el nivel de contaminación arrojados al medio ambiente y entre otra a la reducción de costos frente a otras formas convencionales de generar electricidad

El desarrollo de la investigación da una solución para mejorar la eficiencia eléctrica, aprovechando la salida del agua de la PTAR y de esta manera evaluar la posibilidad de generar energía en las conducciones de esta; con el propósito de minimizar los costos operacionales asociados con el consumo energético. De otra manera que contribuya a la reducción de las emisiones contaminantes a la atmosfera, que reduzca y ayude a disminuir el calentamiento global y que no tenga un fuerte impacto en la naturaleza, es de suma importancia ver esta opción como una potencia de fuente energética.

Sin duda se puede establecer que esta experiencia como estudiantes en la parte de la ingeniería ha abierto un camino de experiencias y conocimientos permitiendo con este proyecto la adquisición del título de Ingeniero Electromecánico y dejando como contribución esta guía para que los que continúan obtengan la mayor información y aprendizaje en lo que se está estudiando.

### **1.3. OBJETIVOS**

#### **1.3.1. Objetivo general**

Proponer un sistema de generación de energía eléctrica basado en la turbina de Gorlov para la planta de tratamiento de aguas residuales de San Silvestre en el municipio de Barrancabermeja

#### **1.3.2. Objetivos específicos**

- Diseñar un sistema de generación de energía eléctrica aislado basado en la turbina de Gorlov que permita el dimensionamiento de los componentes a ser ubicado en la línea de descarga de la PTAR.
- Evaluar el modelo estático de la turbina de Gorlov mediante el programa SolidWorks para conocer el comportamiento de la pieza bajo condiciones de contorno previamente definidas.
- Analizar mediante FlowSimulation el modelo dinámico de la turbina de Gorlov para determinar la eficiencia del sistema.
- Realizar un análisis técnico económico del sistema de generación de energía con el fin de generar un presupuesto general para la PTAR San Silvestre.

#### 1.4. ESTADO DEL ARTE / ANTECEDENTES

A nivel internacional se encontró un proyecto de investigación titulado Diseño del generador de una turbina hidrocínética de pequeña escaladela Pontificia Universidad Católica de Chile, de la ciudad Santiago de Chile (Arrau Soza, 2016), presenta el siguiente resumen: En esta tesis se diseñó, fabricó y testeó en laboratorio una turbina mareomotriz de eje horizontal para ser instalada en comunidades alejadas sin acceso a la red eléctrica. Se diseñaron las aspas usando Turbem (basado en BEM, blade element momentum) de tal manera de maximizar la potencia mecánica y minimizar el diámetro, para un canal de 2,3 m/s de velocidad promedio del agua y una generación de 5 kW. Conociendo la curva de potencia en función de la velocidad angular, se diseñó un generador de acoplamiento directo capaz de extraer la energía del aspa.

A nivel internacional se encontró un proyecto de investigación titulado Diseño y optimización por medio de análisis exegéticos de una turbina hidrocínética para generación de energía eléctrica a partir de fluidos de bajo caudal, de la Universidad Nacional Autónoma de México, de la ciudad de México D.(Martinez Camacho, 2014), presenta el siguiente resumen: A lo largo de este trabajo se desarrolla una técnica propuesta para el modelado del comportamiento de turbinas hidrocínética helicoidales, en base a datos experimentales. Dando un enfoque a los modelos propuestos se busca identificar parámetros de desempeño a través de coeficientes, los cuales agrupan a las pérdidas exergéticas por fricción en un solo valor, mientras que la transferencia de velocidad del agua a la máquina y su traducción al par se hace a través de un exponente y un coeficiente de transferencia de par.

Se hicieron pruebas experimentales a tres modelos a escala, con diferentes ángulos de torsión azimutal. Estos experimentos se hicieron en un canal de pruebas, con el fin de tener control sobre el gasto y la velocidad del agua de un experimento a otro. La correspondencia de los datos hizo posible una comparación directa entre cada máquina (Martinez Camacho, 2014). En primera instancia esta comparación se hizo con teoría de modelos. Los experimentos también fueron simulados a través de códigos de malla fina para identificar el esquema ideal de simulación, el cual a su vez puede ayudar a la optimización del diseño sin necesidad de más pruebas experimentales.

A nivel internacional se encontró un proyecto de investigación titulado Diseño de un banco de ensayos de turbina hidrocínética tipo Gorlov para el laboratorio de termo-fluidos del Instituto Universitario de Tecnología, de la ciudad bolívar presenta el siguiente resumen: La creciente búsqueda de energía renovable y ecológicas a partir de potencialidades hidráulicas ha influido en el desarrollo de turbinas hidrocínética. A partir de un modelo específico de turbina hidrocínética, la Gorlov, se ha planteado la necesidad de establecer su comportamiento fluidodinámico en la obtención de las potencialidades energéticas que está en capacidad de suministrar. Este estudio desarrolla el diseño de un banco de ensayos de la turbina Gorlov a fin de medir las variables de la velocidad de flujo, torque y rpm que permitan construir bajo condiciones controladas sus curvas características (Garcia y Toyce, 2014).

El banco de ensayos se emplea tanto para la obtención de datos importantes sobre la puesta a punto de prototipos como para la determinación de ciertos datos fundamentales, por ende, se hace necesario la construcción del mismo ya que este permitirá obtener los rangos de trabajo de la turbina Gorlov sin recurrir al campo de implementación (ríos y mares) validando a su vez, estudios de análisis

numérico propios del tema. Como añadido se desea estimar costos asociados a su construcción, instrumentales de medidas, accesorios y equipos hidráulicos.

A nivel internacional se encontró un proyecto de investigación titulado Simulación fluidodinámica de un modelo de turbinahidrocínética tipo Gorlov, de la Universidad Nacional Experimental politécnica del estado venezolano. De la ciudadPuerto Orduz(Marture Pérez, 2012). Presenta el siguiente resumen La necesidad de suministrar energías limpias a partir de potencialidades hidráulicasha influido en el desarrollo de turbinas hidrocínéticas. A partir de un modelo específico de turbina hidrocínética, la Gorlov, se ha planteado la necesidad de establecer su comportamiento fluidodinámico en la obtención de las potencialidades energéticas que está en capacidad de suministrar.

Ante la ausencia de un prototipo o en su defecto un modelo a escala, se recurre a métodos de análisis numéricos con la ayuda de software desimulación de la dinámica de fluidos computacional. El estudio desarrolla la modelación matemática de la turbina Gorlov y simula numéricamente mediante métodos de volúmenes finitos a fin de obtener el comportamiento de fluidodinámico y bidimensional del agua a su paso a través de turbina. Se logra un estudio de convergencia del que se obtiene un modelo de volúmenes finitos con un error de 0,5%. También se construyen las curvas características de la turbina determinándose como punto de mayor rendimiento para una condición de operación a velocidad de flujo de 5m/s cuando la turbina gira 10 RPM entrega una potencia de 55,5 W con una eficiencia hidráulica de 99%.

A nivel internacional se encontró un proyecto de investigación titulado modelación y simulación de la operación de generadores que emplean turbinas hidrocínéticas en ríos de bajo caudal” de la universidad Politécnica Salesiana de la ciudad de Quito presenta el siguiente resumen: Uno de los principales problemas de las

zonas no interconectadas es su ubicación remota lo que hace difícil el acceso a los grandes centros de consumo. A su vez, la falta de infraestructura y vías hacen que un plan de conexión sea poco viable; por esta razón se plantea una alternativa de generación local, dado que estas zonas generalmente presentan una gran riqueza natural y fuentes fluviales que pueden ser aprovechadas con turbinas hidrocínicas. Este trabajo hace énfasis en un sistema de acondicionamiento basado en máquinas y convertidores multifásicos, ya que bajo las condiciones ya mencionadas pueden representar una ventaja con respecto a los sistemas trifásicos tradicionales. En principio se hace una descripción de algunos aspectos físicos y mecánicos relacionados con el funcionamiento de las turbinas hidrocínicas y de cómo se clasifican.

Luego se plantea el modelo de la máquina, en este caso un PMSG de 6 fases propuesto en Matlab, que se diseñó a partir de las ecuaciones. Para el diseño del convertidor se tienen en cuenta dos modelos, el back-to-back y el convertidor de 3-ramas, en ambos casos se detalla cómo debe ser su topología y modulación para aplicaciones de seis fases; al igual que en la máquina se simula en Matlab (Rivadeneira Moya, 2015). Con los modelos ya definidos y simulados se procede a probar su funcionamiento por separado y en conjunto (máquina-convertidor). Se observa que entre más fases la corriente disminuye al igual que la capacitancia del DC-Link; entre los dos convertidores el que mejor reproduce la señal de salida (menor contenido armónico) es el back-to-back y el de 3-ramas menor magnitud de corriente por fase.

A nivel nacional se encontró un proyecto de investigación titulado Desarrollo de una turbina hidrocínica axial en el Grupo de Energía Alternativa de la Universidad de Antioquia de la ciudad de Medellín (Colciencias, 2016) presenta el siguiente resumen. En el caso de los grupos de investigación del sector

académico, se encuentra un prototipo de turbina hidrodinámica de eje horizontal como resultado de un proyecto de investigación financiado y una tesis de maestría con él.

A nivel nacional se encontró un proyecto de investigación titulado Diseño de una Pico central hidroeléctrica (PCH) impulsada por la potencia hidráulica del Río San Juan en la Vereda Salado (Medio San Juan, Chocó, Colombia). De la Universidad Distrital Francisco José de Caldas de la ciudad de Bogotá D.C. se diseñó una Pico-central hidroeléctrica impulsada por una turbina hidrocínética sobre el río San Juan, buscando alternativas para suministrar energía eléctrica a una región carente de la misma; en esta zona, por motivos de orden medioambiental, social y político ha sido difícil suplir esta necesidad y otras tantas. Los mega-proyectos eléctricos ejecutados y por ejecutarse en el país pese a parecer sobredimensionados según las críticas, no satisfacen la necesidad del país en cuanto a fluido eléctrico; tal es el caso del departamento del Chocó, en el que el suministro es precario, y en muchas poblaciones no existe. Por lo anterior, se diseñó una Pico-Central Hidroeléctrica o PCH en base a una turbina de río, la cual transforma la cantidad de movimiento de un afluente (caudal puro), en este caso el del río San Juan, en energía mecánica de rotación para producir 3000 W reales a través de un generador de imanes permanentes. La PCH consta de un fondeo con boya y muerto para estabilizar la turbina en el río; y tiene también un sistema eléctrico controlado para suministrar corriente regulada en la región. Mediante pruebas de laboratorio en un modelo simplificado a escala, y al hacer una estimación de costos del prototipo real, se comprueba que el sistema puede ser usado no sólo en la vereda Salao sino en otros sitios de Colombia que tengan ríos de gran caudal (Martínez y Mosquera, 2017).

A nivel nacional se encontró un proyecto de investigación titulado Estudio para suplir la demanda energética de la estación de bombeo del municipio de Cicuco a

través de la adopción de tecnologías hidrocínéticas. De la Universidad de la Costade la ciudad de Barranquilla. En el presente documento presenta la evaluación técnica y económica de diferentes tecnologías para su implementación en la propulsión del fluido de manera sostenible en una planta de tratamiento de agua, ubicada en una zona no interconectada con la red eléctrica Nacional (zonas aledañas al río Chicagua en el municipio de Cicuco). En este río se tomaron mediciones técnicas como la batimetría con el fin, de generar perfiles del cauce para profundidades de hasta 7 metros y mediciones de variables con sumo valor ingenieril, como: Las velocidades en el río de 0,7 m/s - 0,9 m/s, medidas por un correntómetro digital Hg950 en diferentes posiciones, y los datos de la potencia que demanda este sistema, otorgados por la empresa (Romero Bentez, 2016). Todo lo anteriormente escrito representa la primera etapa del proyecto enfocada a la recolección de los datos ingenieriles más importantes para dicha evaluación.

## **2. MARCOS REFERENCIALES**

### **2.1. MARCO TEORICO**

#### **2.1.1. Máquinas Hidráulicas**

Una máquina hidráulica es un dispositivo capaz de convertir energía hidráulica en energía mecánica; pueden ser motrices (turbinas), o generatrices (bombas), modificando la energía total de la vena fluida que las atraviesa. En el estudio de las turbo-máquinas hidráulicas no se tienen en cuenta efectos de tipo térmico, aunque a veces habrá necesidad de recurrir a determinados conceptos termodinámicos; todos los fenómenos que se estudian serán en régimen permanente, caracterizados por una velocidad de rotación de la máquina y un caudal, constantes. (Férrandez Díez, 2018, pág. 2)

En una máquina hidráulica, el agua intercambia energía con un dispositivo mecánico de revolución que gira alrededor de su eje de simetría; éste mecanismo lleva una o varias ruedas, (rodetes o rotores), provistas de álabes, de forma que entre ellos existen unos espacios libres o canales, por los que circula el agua. Los métodos utilizados para su estudio son, el analítico, el experimental y el análisis dimensional.

- El método analítico se fundamenta en el estudio del movimiento del fluido a través de los álabes, según los principios de la Mecánica de Fluidos.
- El método experimental, se fundamenta en la formulación empírica de la Hidráulica, y la experimentación.
- El análisis dimensional ofrece grupos de relaciones entre las variables que intervienen en el proceso, confirmando los coeficientes de funcionamiento de las turbo-máquinas, al igual que los diversos números adimensionales que proporcionan información sobre la influencia de las propiedades del fluido en movimiento a través de los órganos que las componen.

#### **2.1.1.1 Clasificación de las turbo-máquinas hidráulicas.**

Una primera clasificación de las turbo-máquinas hidráulicas, (de fluido incompresible), se puede hacer con arreglo a la función que desempeñan, en la forma siguiente:

a. Turbo-máquinas motrices: Recogen la energía cedida por el fluido que las atraviesa, y la transforman en mecánica, pudiendo ser de dos tipos:

- Dinámicas o cinéticas
- Turbinas y ruedas hidráulicas
- Estáticas o de presión
- Celulares (paletas), de engranajes, helicoidales, etc.

La turbina de Gorlov se encuentra clasificada en turbo-máquinas motrices helicoidales.

b. Turbo-máquinas: Generatrices, que aumentan la energía del fluido que las atraviesa bajo forma potencial, (aumento de presión), o cinética; la energía mecánica que consumen es suministrada por un motor, pudiendo ser:

- Bombas de álabes, entre las que se encuentran las bombas centrífugas y axiales.
- Hélices marinas, cuyo principio es diferente a las anteriores; proporcionan un empuje sobre la carena de un buque.

c. Turbo-máquinas reversibles: Tanto generatrices como motrices, que ejecutan una serie de funciones que quedan aseguradas, mediante un rotor específico, siendo las más importantes:

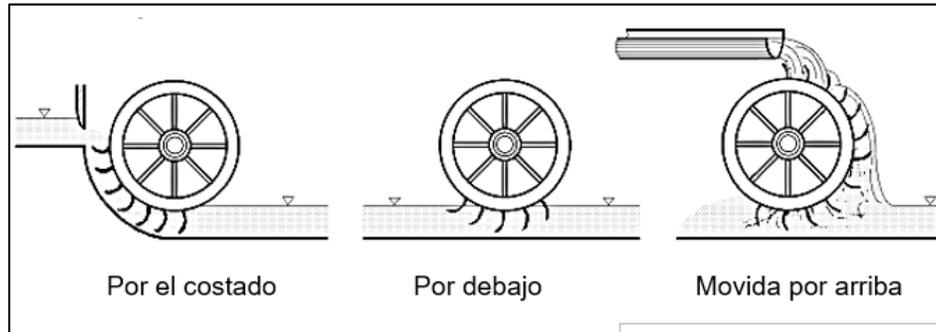
- Grupos turbina-bomba, utilizados en centrales eléctricas de acumulación por bombeo.
- Grupos Bulbo, utilizados en la explotación de pequeños saltos y centrales mareomotrices.

d. Grupos de transmisión o acoplamiento, que son una combinación de máquinas motrices y generatrices, es decir, un acoplamiento (bomba-turbina), alimentadas en circuito cerrado por un fluido, en general aceite; a este grupo pertenecen los cambiadores de par.

### **2.1.2. Ruedas hidráulicas**

Las ruedas hidráulicas son máquinas capaces de transformar la energía del agua, cinética o potencial, en energía mecánica de rotación (Férrandez Díez, 2018). En ellas, la energía potencial del agua se transforma en energía mecánica, o bien, su energía cinética se transforma en energía mecánica. Estas se clasifican en:

**Figura 1.**Ruedas hidráulicas



**Fuente:**Fernández Díez, Pedro (2016). Turbinas Hidráulicas. España. Editorial Universidad de Cantabria. Recuperado Noviembre 1 de 2018 de [http://www.ing.una.py/pdf\\_material\\_apoyo/turbinas-hidraulicas.pdf](http://www.ing.una.py/pdf_material_apoyo/turbinas-hidraulicas.pdf)

La Figura 1, describe las clases de ruedas hidráulicas que convierte la energía de un curso de agua en otras formas más útiles de energía.

- Ruedas movidas por el costado
- Ruedas movidas por debajo
- Ruedas movidas de arriba

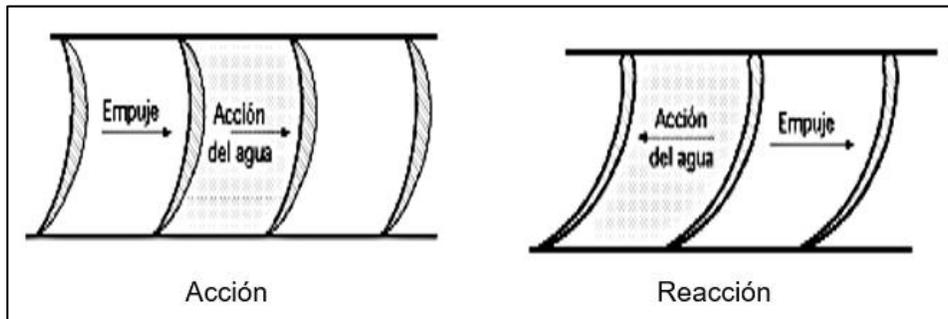
### 2.1.3. Turbinas Hidráulicas

Una turbo-máquina elemental o mono-celular tiene, básicamente, una serie de álabes fijos, (distribuidor), y otra de álabes móviles, (rueda, rodete, rotor). La asociación de un órgano fijo y una rueda móvil constituye una célula; una turbo-máquina mono-celular se compone de tres órganos diferentes que el fluido va atravesando sucesivamente, el distribuidor, el rodete y el difusor.

- a. El distribuidor y el difusor (tubo de aspiración), forman parte del estator de la máquina, es decir, son órganos fijos; así como el rodete está siempre presente, el distribuidor y el difusor pueden ser en determinadas turbinas, inexistentes.
- b. El distribuidor es un órgano fijo cuya misión es dirigir el agua, desde la sección de entrada de la máquina hacia la entrada en el rodete, distribuyéndola alrededor del mismo, (turbinas de admisión total), o a una parte, (turbinas de admisión parcial), es decir, permite regular el agua que entra en la turbina, desde cerrar el paso totalmente, caudal cero, hasta lograr el caudal máximo.
- c. (Férrandez Díez, 2018) refiere que también un órgano que transforma la energía de presión en energía de velocidad; en las turbinas helicocéntricas y en las axiales está precedido de una cámara espiral (voluta) que conduce el agua desde la sección de entrada, asegurando un reparto simétrico de la misma en la superficie de entrada del distribuidor.
- d. El rodete es el elemento esencial de la turbina, estando provisto de álabes en los que tiene lugar el intercambio de energía entre el agua y la máquina. Atendiendo a que la presión varíe o no en el rodete, las turbinas se clasifican en: turbinas de acción o impulsión, turbinas de reacción o sobrepresión.
  - Turbinas de acción o impulsión: el agua sale del distribuidor a la presión atmosférica, y llega al rodete con la misma presión; en estas turbinas, toda la energía potencial del salto se transmite al rodete en forma de energía cinética. El empuje y la acción del agua coinciden.

- Turbinas de reacción o sobrepresión: el agua sale del distribuidor con una cierta presión que va disminuyendo a medida que el agua atraviesa los álabes del rodete, de forma que, a la salida, la presión puede ser nula o incluso negativa; en estas turbinas el agua circula a presión en el distribuidor y en el rodete y, por lo tanto, la energía potencial del salto se transforma, una parte, en energía cinética, y la otra, en energía de presión(Férrnandez Díez, 2018).Como conclusión, el empuje y la acción del agua son opuestos.
- El difusor o tubo de aspiración: es un conducto por el que desagua el agua, generalmente con ensanchamiento progresivo, recto o acodado, que sale del rodete y la conduce hasta el canal de fuga, permitiendo recuperar parte de la energía cinética a la salida del rodete para lo cual debe ensancharse; si por razones de explotación el rodete está instalado a una cierta altura por encima del canal de fuga, un simple difusor cilíndrico permite su recuperación, que de otra forma se perdería.

**Figura 2.** Clasificación de las turbinas



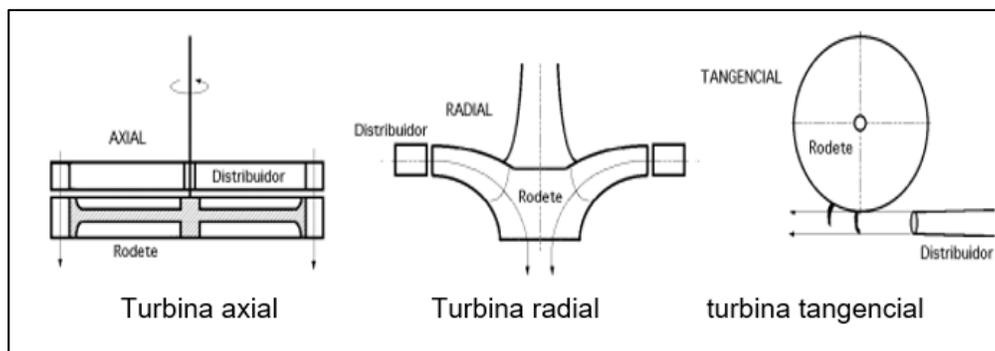
**Fuente:** Fernández Díez, Pedro (2016). Turbinas Hidráulicas. España. Editorial Universidad de Cantabria. Recuperado Noviembre 1 de 2018 de [http://www.ing.una.py/pdf\\_material\\_apoyo/turbinas-hidraulicas.pdf](http://www.ing.una.py/pdf_material_apoyo/turbinas-hidraulicas.pdf).

La Figura 2, muestra como el empuje es consecuencia de la diferencia de velocidades entre la entrada y la salida del agua en el rodete, según la proyección de la misma sobre la perpendicular al eje de giro.

Atendiendo a la dirección de entrada del agua en las turbinas, éstas pueden clasificarse en:

- Axiales: En las axiales, (Kaplan, hélice, Bulbo), el agua entra paralelamente
- Radiales: (centrípetas y centrífugas) el agua entra perpendicularmente al eje, siendo centrífugas cuando el agua vaya de dentro hacia afuera, y centrípetas, cuando el agua vaya de afuera hacia adentro, (Francis).
- Mixtas: Se tiene una combinación de las anteriores
- Tangenciales: El agua entra lateral o tangencialmente (Pelton) contra las palas, cangilones o cucharas de la rueda.

**Figura 3.** Entrada del agua en las turbinas



**Fuente:** Fernández Diez, Pedro (2016). Turbinas Hidráulicas. España. Editorial Universidad de Cantabria. Recuperado Noviembre 1 de 2018 de [http://www.ing.una.py/pdf\\_material\\_apoyo/turbinas-hidraulicas.pdf](http://www.ing.una.py/pdf_material_apoyo/turbinas-hidraulicas.pdf)

La Figura 3 precisa los tipos de turbinas en la dirección de entrada del agua en las según el modelo que se escoja.

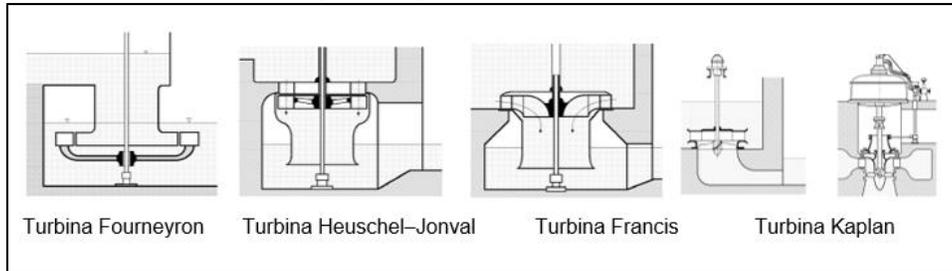
#### **2.1.4. Descripción sumaria de algunos tipos de turbinas hidráulicas**

Siendo la turbina helicoidal modelo Gorlov, en su descripción parte de las turbinas del grupo de hidráulicas de reacción

##### **2.1.4.1 Turbinas de reacción**

- Turbina Fourneyron (1833). Es una turbina radial centrífuga, lo que supone un gran diámetro de rodete; en la actualidad no se construye.
- Turbina Heuschel – Jonval. Axial, y con tubo de aspiración; el rodete es prácticamente inaccesible; (en la que el rodete se mueve dentro del agua.). En la actualidad no se construye.
- Turbina Francis (1849). Es radial centrípeta, con tubo de aspiración; el rodete es de fácil acceso, por lo que es muy práctica. (Férrandez Díez, 2018) dice es fácilmente regulable y funciona a un elevado número de revoluciones; es el tipo más empleado, y se utiliza en saltos variables, desde 0,5 m hasta 180 m; pueden ser, lentas, normales, rápidas y extrarápidas.
- Turbina Kaplan (1912). Las palas del rodete tienen forma de hélice; se emplea en saltos de pequeña altura, obteniéndose con ella elevados rendimientos, siendo las palas orientables lo que implica paso variable. Si las palas son fijas, se denominan turbinas hélice.

**Figura 4.** Turbinas de acción y sus tipos

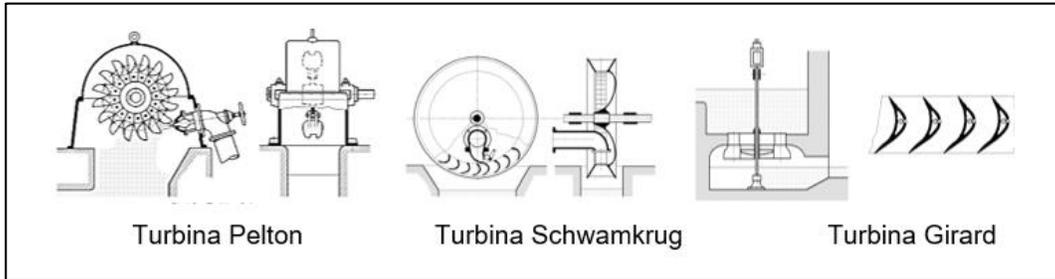


**Fuente:** Fernández Diez, Pedro (2016). Turbinas Hidráulicas. España. Editorial Universidad de Cantabria. Recuperado Noviembre 1 de 2018 de [http://www.ing\\_material\\_/turbinas-hidraulicas.pdf](http://www.ing_material_/turbinas-hidraulicas.pdf). La Figura 4, expresa la clasificación de la turbina de reacción y cada género perteneciente a ella, es la más determinista, y las diferencias sólo pueden ser de tamaño, ángulo de los álabes o cangilones, o de otras partes de la turbo-máquina distinta al rodete.

**2.1.4.2 Turbinas de acción. Estas turbinas se empezaron a utilizar antes que las de reacción; entre ellas se tienen:**

- Turbina Zuppinger (1846), con rueda tangencial de cucharas
- Turbina Pelton, es tangencial, y la más utilizada para grandes saltos
- Turbina Schwamkrug, (1850), radial y centrífuga
- Turbina Girard, (1863), axial, con el rodete fuera del agua; mientras el cauce no suba de nivel, trabaja como una de acción normal, mientras que si el nivel sube y el rodete quedaba sumergido, trabajaba como una de reacción, aunque no en las mejores condiciones; en la actualidad no se utiliza.
- Turbina Michel, o Banki, el agua pasa dos veces por los álabes del rodete, construido en forma de tambor; se utiliza para pequeños y grandes saltos.

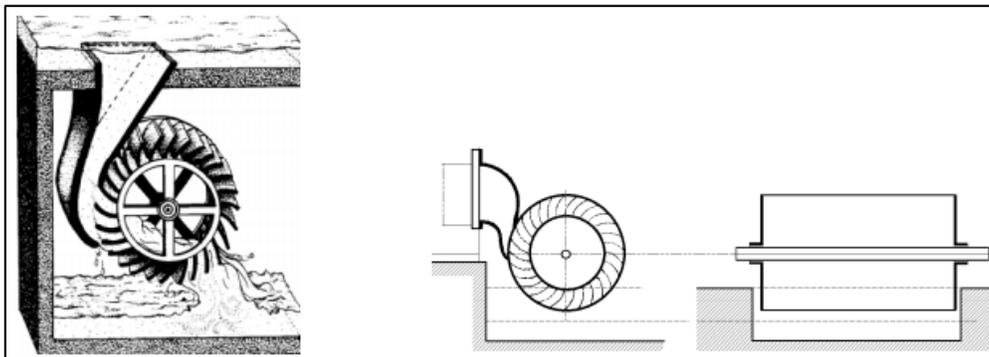
**Figura 5.** Turbinas de reacción y sus tipos



**Fuente.** Fernández Diez, Pedro (2016). Turbinas Hidráulicas. España. Editorial Universidad de Cantabria. Recuperado Noviembre 1 de 2018 de <http://www.ing.una.py/pdf/turbinas-hidraulicas.pdf>.

La Figura 5 detalla cómo está compuesta la turbina de reacción, siendo estas de admisión total y de fácil acceso del flujo de agua.

**Figura 6.** Turbinas de reacción de Michel o Banki



**Fuente:** Fernández Diez, Pedro (2016). Turbinas Hidráulicas. España. Editorial Universidad de Cantabria. Recuperado Noviembre 1 de 2018 de [http://www.ing.una.py/pdf\\_material\\_apoyo/turbinas-hidraulicas.pdf](http://www.ing.una.py/pdf_material_apoyo/turbinas-hidraulicas.pdf).

La Figura 6 detalla esta turbina que está en posición de entrada de agua de costado para ser usada en pequeños y grandes saltos.

### 2.1.5. Estudio general de las turbinas hidráulicas

### **2.1.5.1 Mecánica de fluidos**

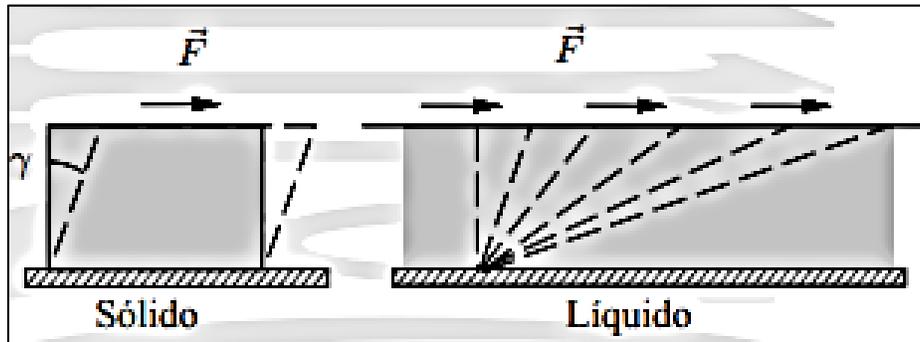
La Mecánica de Fluidos estudia las leyes del movimiento de los fluidos y sus procesos de interacción con los cuerpos sólidos. Al integrar en una única disciplina las experiencias de ambos colectivos, se evita la falta de generalidad derivada de un enfoque estrictamente empírico, válido únicamente para cada caso concreto, y al mismo tiempo se permite que los desarrollos analíticos matemáticos aprovechen adecuadamente la información experimental y eviten basarse en simplificaciones artificiales alejadas de la realidad. (Domingo, 1997, pág. 101).

### **2.1.5.2 La característica fundamental de los fluidos es la denominada fluidez.**

Un fluido cambia de forma de manera continua cuando está sometido a un esfuerzo cortante, por muy pequeño que sea éste, es decir, un fluido no es capaz de soportar un esfuerzo cortante sin moverse durante ningún intervalo de tiempo. Unos líquidos se moverán más lentamente que otros, pero ante un esfuerzo cortante se moverán siempre. Domingo(1997), afirma que la medida de la facilidad con que se mueve vendrá dada por la viscosidad que se trata más adelante, relacionada con la acción de fuerzas de rozamiento.

Por el contrario, en un sólido se produce un cambio fijo y para cada valor de la fuerza cortante aplicada. En realidad, algunos sólidos pueden presentar en cierto modo ambos comportamientos, cuando la tensión aplicada está por debajo de un cierto umbral presenta el comportamiento habitual, mientras que por encima de un cierto umbral el sólido puede plastificar, produciéndose una deformación más continua para una fuerza fija, de forma parecida a como ocurre en un fluido (Domingo, 1997).

**Figura 7.** Estado del agua



**Fuente:** Fernández Diez, Pedro (2016). Turbinas Hidráulicas. España. Editorial Universidad de Cantabria. Recuperado Noviembre 1 de 2018 de [http://www.ing.una.py/pdf\\_material\\_apoyo/turbinas-hidraulicas.pdf](http://www.ing.una.py/pdf_material_apoyo/turbinas-hidraulicas.pdf).

La Figura 7 detalla dos estados del agua sólido y gaseoso y sus desplazamientos bajo la acción de una fuerza cortante.

Así, mientras que un sólido experimenta un desplazamiento definido (o se rompe por completo) bajo la acción de una fuerza cortante, en los fluidos pequeñas fuerzas producen grandes deformaciones no elásticas (en general no se recupera la forma) a volumen constante, que se realizan de forma continua. Mientras que para un sólido bajo una fuerza cortante constante se alcanza un ángulo de deformación determinado y constante, en un fluido se debe hablar de una velocidad de deformación constante o no, ya que la deformación se produce de forma continua (Domingo, 1997). Dentro de los fluidos, la principal diferencia entre líquidos y gases estriba en las distintas compresibilidades de los mismos.

- Gases: Los gases presentan una gran compresibilidad, que influye sobre las características del flujo, ya que tanto el volumen como la densidad varían con facilidad. En el caso de los gases el movimiento térmico vence a las fuerzas atractivas y, por tanto, tienden a ocupar todo el volumen del recipiente que los contiene.

- Líquidos: En el caso de los líquidos, por el contrario, la compresibilidad es muy débil. Esto es debido a que las fuerzas atractivas entre las moléculas del líquido vencen al movimiento térmico de las mismas, colapsando las moléculas y formando el líquido. Domingo(1997), refiere que al contrario que en el caso de los gases, que tendrían a ocupar todo el volumen que los contiene, los líquidos tienden a formar una superficie libre.
- La noción de compresibilidad dada es la correspondiente a la estática de fluidos. En dinámica de fluidos, hay casos en los que la densidad no varía a lo largo del flujo, incluso en un fluido compresible, por lo que a ese flujo se le puede aplicar las leyes de los fluidos incompresibles. Tiene en este caso más sentido hablar de flujo compresible o incompresible. Los fluidos no conservan la forma. Al situarlos en un recipiente toman la forma del mismo (si lo llenan) o de parte del mismo.

## 2.1.6. Propiedades de los fluidos

### 2.1.6.1 Densidad ( $\rho$ ).

Domingo (1997) establece que se define como la masa por unidad de volumen. Sus unidades en el sistema internacional son [ $kg/m^3$ ]. Para un fluido homogéneo, la densidad no varía de un punto a otro y puede definirse mediante:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Por el contrario, para un fluido inhomogéneo, la densidad  $\rho$  varía de un punto a otro (Domingo, 1997). Por tanto, se tiene que definir la densidad en un punto como

la masa por unidad de volumen en un elemento diferencial de volumen<sup>+</sup> en torno a ese punto:

$$\rho = \rho(x, y, z, t) = \frac{dm}{dV}$$

Esto es posible gracias a la continuidad. En los líquidos, al tener baja compresibilidad, la densidad depende de la temperatura, pero apenas depende de la presión  $\rho = \rho(T)$ . (Domingo, 1997), dice que para los fluidos compresibles, la densidad depende en general tanto de la presión como de la temperatura  $\rho = \rho(p, T)$ .

Para el caso concreto de un gas ideal, con una ecuación de estado  $pV = nRT$ , la densidad tiene la forma concreta:

$$\rho(p, T) = \frac{\bar{M}p}{RT}$$

### 2.1.6.2 Peso específico ( $\gamma$ ).

El peso específico se define como el peso por unidad de volumen (Domingo, 1997). En el sistema internacional sus unidades son  $[N/m^3]$ . Para un fluido homogéneo  $\gamma = m/gV$ , que mientras para un inhomogéneo:

$$\gamma = \gamma(x, y, z, t) = g \frac{dm}{dV} = \rho g$$

Donde  $g$  es la aceleración de la gravedad.

### 2.1.6.3 Volumen específico ( $u$ ).

Se denomina volumen específico al volumen ocupado por la unidad de masa (Domingo, 1997). Para un fluido homogéneo se define como  $u = \frac{V}{m} = 1$ , mientras que en el caso general de un fluido inhomogéneo se tiene que hablar de su valor en un punto:

$$u = u(x, y, z, t) = \frac{dV}{dm} = \frac{1}{\rho}$$

En todos los casos,  $u = 1/\rho$ . Sus unidades en el Sistema Internacional son  $[m^3/kg]$ .

### 2.1.6.4 Viscosidad.

Como se ha dicho en la introducción, la viscosidad refleja la resistencia al movimiento del fluido y tiene un papel análogo al del rozamiento en el movimiento de los sólidos. La viscosidad está siempre presente en mayor o menor medida tanto en fluidos compresibles como incompresibles, pero no siempre es necesario tenerla en cuenta. Domingo(1997), alude en el caso de los fluidos perfectos o no viscosos su efecto es muy pequeño y no se tiene en cuenta, mientras que en el caso de los fluidos reales o viscosos su efecto es importante y no es posible despreciarlo. En el caso del agua a veces se habla del flujo del agua seca para el flujo no viscoso del agua y del flujo del agua mojada para el flujo viscosa.

### 2.1.6.5 Presión.

La presión en un punto se define como el valor absoluto de la fuerza por unidad de superficie a través de una pequeña superficie que pasa por ese punto y en el sistema internacional su unidad es el Pascal ( $1Pa = 1N/m^2$ ). Mientras que, en el

caso de los sólidos en reposo, las fuerzas sobre una superficie pueden tener cualquier dirección, en el caso de los fluidos en reposo la fuerza ejercida sobre una superficie debe ser siempre perpendicular a la superficie, ya que, si hubiera una componente tangencial, el fluido fluiría. En el caso de un fluido en movimiento, si éste es no viscoso tampoco aparecen componentes tangenciales de la fuerza, pero si se trata de un fluido viscoso sí que aparecen fuerzas tangenciales de rozamiento. Domingo(1997), menciona de este modo, un fluido en reposo a una presión  $p$  ejerce una fuerza  $-pd\vec{S}$  sobre cualquier superficie plana arbitraria en contacto con el fluido en el punto, definida por un vector unitario  $d\vec{S}$ , perpendicular a la superficie. En general, la presión en un fluido depende del punto,  $p = p(x, y, z)$ . Así, para un fluido en reposo la presión se define como la fuerza normal por unidad de superficie.

#### 2.1.6.6 Compresibilidad.

Se caracteriza por el coeficiente de compresibilidad,  $k$ , definido como:

$$k = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dp}$$

Que representa la disminución relativa del volumen por unidad de aumento de presión (Domingo, 1997). Sus unidades son de inversa de presión, en el Sistema S.I. [ $m^2/N$ ], su inversa:

$$K = \frac{1}{k}$$

Es el módulo de compresibilidad [ $N/m^2$ ]. Tanto  $k$  como  $K$  depende de la forma como se realiza el proceso.

### 2.1.6.7 Dilatación térmica.

Se caracteriza por el coeficiente de dilatación de volumen, que representa el aumento relativo del volumen producido por un aumento de la temperatura y está definida como:

$$\alpha v = \frac{1}{V} \frac{dV}{dT}$$

Donde  $V$  es el volumen inicial del líquido. Sus unidades son de inversa de grados  $[K^{-1}]$  o  $[^{\circ}C^{-1}]$  y depende de la forma en que realiza el proceso.

### 2.1.7. Conversión hidro-cinética.

Uno de los parámetros más importantes en el tratamiento de cualquier fuente energética es la potencia. En este caso, cuando se instala una turbina hidro-cinética, lo que se hace es interceptar una cierta cantidad de agua en un área de tamaño "A" que viene a ser el área proyectada del rotor, lo que se conoce como área de barrido por la máquina. Aragón Betancourt(2013) afirma que en dicha área se produce la transformación de la energía cinética del agua en potencia mecánica que es entregada a través del eje de la turbina. La potencia suministrada por una turbina hidro-cinética, depende en primera instancia de la superficie barrida por la hélice y, por tanto, de la longitud de las palas.

#### 2.1.7.1 La energía de corrientes de agua.

La energía cinética del agua, debida a la masa de agua en movimiento es:

$$E_c \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}\rho AV^3t$$

Dónde:

A = Área de barrido

$E_c$  = Energía cinética del agua interceptada J

m = masa del agua, kg

v = Velocidad instantánea del agua, m/s

t = tiempo (s)

Por tanto la potencia teórica o potencia disponible en el fluido ( $N_{teo}$ ) será:

$$N_{teo} = \frac{E_c}{t} = \frac{1}{2}\rho Av^3$$

Dónde:

$N_{teo}$  Potencia teórica o potencia disponible en el fluido  $W$ .

La densidad de potencia es un parámetro que caracteriza la potencia por unidad de área de la sección transversal al flujo (generalmente se da en kW/m<sup>2</sup>) y se determina por la siguiente ecuación (Aragón Betancourt, 2013).

$$\left[\frac{P}{A_f}\right]_{agua} = \frac{1}{2}\rho v^3 \left[\frac{W}{m^2}\right]$$

Potencia extraída por el rotor.

En la práctica no es posible extraer toda la potencia disponible en el fluido, lo cual puede ser analizado a partir de un balance de energía.

### 2.1.7.2 Potencia extraída por el rotor.

En la práctica no es posible extraer toda la potencia disponible en el fluido, lo cual puede ser analizado a partir de un balance de energía (Domingo, 1997).

$$N_{\text{entrada}} = N_u - N_{\text{fluido salida}} = \frac{1}{2} m (V_1^2 - V_2^2)$$

$$N_u = E_{\text{cinética entrada}} = \frac{1}{2} m V_1^2$$

$$N_{\text{fluido salida}} = E_{\text{cinética salida}} = \frac{1}{2} m V_2^2$$

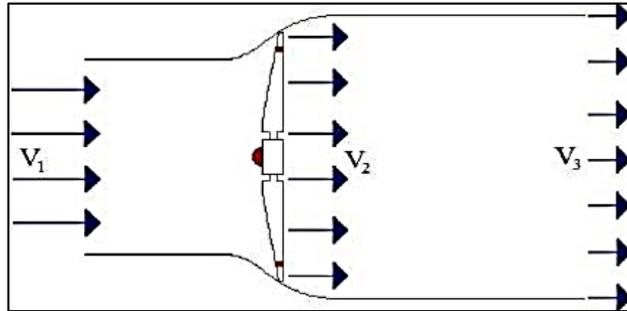
Dónde:

$N_{\text{extraída}}$ : Potencia extraída por el rotor

$N_u$ : Potencia a la entrada

$N_{\text{eflujo salida}}$ : Potencia a la salida

**Figura 8.** Relación entre velocidades



**Fuente:** Arangón Betancourd, Armando (2013). Criterios para la selección de parámetros característicos de turbinas hidrocinéticas de eje horizontal. Santa Clara. Editorial Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Recuperado Noviembre 1 de 2018 de [http://www.ing.una.py/pdf\\_material\\_apoyo/turbinas-hidraulicas.pdf](http://www.ing.una.py/pdf_material_apoyo/turbinas-hidraulicas.pdf).

La Figura 8 muestra cómo funciona la relación entre velocidades de la potencia extraída por el rotor.

## 2.2. MARCO HISTORICO

El tipo más antiguo y más simple de turbina hidráulica es la rueda hidráulica, utilizada por primera vez en Grecia y utilizada durante la antigüedad y la edad media para moler cereales. Consistía en un eje vertical con un conjunto de aspas o palas radiales situadas en una corriente de agua a gran velocidad, describe la potencia de la rueda era de unos 0,5 caballos de vapor (CV). La rueda hidráulica horizontal (o sea, un eje horizontal conectado a una rueda de palas vertical), descrita por primera vez por el arquitecto e ingeniero romano Vitrubio en el siglo I a.C., tenía el segmento inferior de la rueda de palas insertada en la corriente, y actuaba como una rueda hidráulica de empuje inferior. Hacia el siglo II d.C. se empezó a utilizar en las regiones montañosas la rueda hidráulica de empuje superior. En este caso, el agua se vertía sobre las palas desde arriba, y se obtenía energía adicional de la inercia del agua en su caída (Mora, 2018). En la edad

media la potencia máxima de la rueda, fabricada con madera, aumentó de 3 a 50 CV.

La transición de la rueda hidráulica a la turbina es sobre todo semántica. El primer intento de formular la base teórica para el diseño de ruedas hidráulicas en el siglo XVIII corresponde al ingeniero civil británico John Smeaton, que demostró que la rueda de empuje superior era más eficaz; sin embargo, el ingeniero militar francés Jean Víctor Poncelet diseñó una rueda de empuje inferior cuyas palas curvadas aumentaban el rendimiento casi un 70%. El uso de esta máquina se extendió rápidamente. Otro ingeniero militar francés, Claude Burdin, inventó el término turbina, como parte de un análisis teórico en que se daba una gran importancia a la velocidad de rotación. Benoit Fourneyron, un alumno de Burdin en la Escuela de Minería de Saint Étienne, diseñó y construyó ruedas que alcanzaban velocidades de rotación de 60 rpm (revoluciones por minuto) o más y que proporcionaban hasta 50 CV en las factorías metalúrgicas francesas (Mora, 2018). Por último, Fourneyron construyó turbinas que trabajaban a 2.300 rpm, desarrollando 60 CV y un rendimiento de más del 80%.

A pesar de esta eficiencia excepcional, la turbina de Fourneyron tenía algunos inconvenientes causados por el flujo centrífugo del agua que la atravesaba. Esto provocaba problemas si se reducía el flujo de agua o su carga. El ingeniero estadounidense nacido en Gran Bretaña James B. Francis diseñó una turbina en la que el flujo se producía hacia el interior. Mora(2018)explica la llamada turbina de reacción o turbina Francis se convirtió en la turbina hidráulica más utilizada con presiones de agua, o alturas de caída, equivalentes a una columna de agua de 10 a 100 m. Este tipo de turbina funciona debido a la expansión del agua mientras fluye a través de los espacios entre las palas, lo que produce una fuerza neta, o reacción, con un componente tangencial que pone la rueda en movimiento.

La rueda Pelton, cuyo nombre proviene del ingeniero estadounidense Lester Allen Pelton, se empezó a aplicar durante la segunda mitad del siglo XIX, en instalaciones donde la presión del agua era equivalente a una columna de agua de entre 90 y 900 m. En este tipo de turbinas el agua se conduce desde un depósito a gran altura a través de un canal o una conducción forzada hasta una boquilla eyectora que convierte la energía cinética del agua en un chorro a presión (Mora, 2018). Mora señala que el aumento de las necesidades de energía hidroeléctrica durante los albores del siglo XX puso de manifiesto la necesidad de turbinas que pudieran aprovechar caídas de agua de 3 a 9 m, que podrían utilizarse en muchos ríos construyendo pequeños embalses de agua. En 1913, el ingeniero austriaco Viktor Kaplan planteó por primera vez la turbina de hélice, que actúa al contrario que la hélice de un barco. Kaplan mejoró la turbina haciendo que las palas pudieran pivotar sobre su eje. Los distintos ángulos de las palas aumentaban el rendimiento ajustando el ángulo al volumen de la caída de agua.

### **Turbinas de vapor**

El éxito obtenido con las turbinas de agua condujo a utilizar el principio de la turbina para extraer energía del vapor de agua. Mientras que la máquina de vapor de vaivén desarrollada por Watt utilizaba la presión del vapor, la turbina consigue mejores rendimientos al utilizar también la energía cinética de éste. La turbina puede ser más pequeña, más ligera y más barata que una máquina de vapor de vaivén de la misma potencia, y puede ser de un tamaño mucho mayor que las máquinas de vapor convencionales. (Mora, 2018) Argumenta desde el punto de vista de la mecánica, tiene la ventaja de producir directamente un movimiento giratorio sin necesidad de una manivela o algún otro medio de convertir la energía de vaivén en energía rotatoria.

La turbina de vapor no fue inventada por una única persona, sino que fue el resultado del trabajo de un grupo de inventores a finales del siglo XIX. Algunos de los participantes más notables en este desarrollo fueron el británico Charles Algernon Parsons y el sueco Carl Gustaf Patrik de Laval. Parsons fue responsable del denominado principio de escalones, mediante el cual el vapor se expandía en varias fases, aprovechándose su energía en cada una de ellas. De Laval fue el primero en diseñar chorros y palas adecuados para el uso eficiente de la expansión del vapor.

### **Avances en el diseño de las turbinas**

Mora (2018) referencia que la tendencia en las turbinas hidráulicas modernas es utilizar caídas mayores y máquinas más grandes. Según el tamaño de la unidad, las turbinas Kaplan se utilizan en caídas de unos 60 m, y en el caso de las turbinas Francis de hasta 610 m. La instalación de caída más alta del mundo (1.770 m) se encuentra en Reisseck, en Austria, y las turbinas más grandes del mundo están en una planta generadora de la presa de Itaipú, entre Paraguay y Brasil, donde se utilizan 18 turbinas de tipo Francis de 700 MW de potencia cada una, que consiguen un total de 12.600 MW.

Se han diseñado turbinas que actúan como bombas cuando funcionan a la inversa, invirtiendo el generador eléctrico para que funcione como un motor (Mora, 2018). Dado que no es posible almacenar la energía eléctrica de forma económica, este tipo de bombas turbina se utiliza para bombear agua hacia los embalses, aprovechando la energía eléctrica generada por las centrales nucleares y térmicas durante las horas de poco consumo. El agua embalsada se emplea de nuevo para generar energía eléctrica durante las horas de consumo elevado. En

los últimos años se han desarrollado turbinas para caídas de hasta 600 m y con capacidades de más de 400 MW.

Las turbinas han evolucionado mucho desde que surgieron como unas simples ruedas, después empezaron a conectarse a otros aparatos para utilizarse con máquinas como las de un molino de papel (un claro ejemplo de molino de papel es el de Capellades) pero aquí no se detuvo su evolución y siguió evolucionando hasta las centrales (normalmente eléctricas) de hoy en día (Mora, 2018). Mediante las turbinas se han aprovechado diversas energías que no podrían haber sido aprovechadas de otra manera. Con éstas se pueden sacar provecho de muchos distintos tipos de energías como la nuclear o la térmica.

### **2.3. MARCO CONCEPTUAL**

Las turbinas hidrocínéticas permiten la generación de energía eléctrica a partir de una fuente renovable, utilizando la energía de las corrientes de agua, generalmente de ríos, mares y canales elaborados por el hombre, entre otros. Constituyen una tecnología que contribuye a la conservación del medio ambiente, al no requerir la construcción de represas, dado que su funcionamiento no está limitado a alturas o caídas de agua, siendo una de las principales características diferenciadoras con relación a las centrales hidroeléctricas convencionales, además de promover el uso de turbinas hidrocínéticas en el aprovechamiento de la energía disponible en los recursos hídricos de distintas zonas del mundo, que pueden ser empleadas en especial para suministrar energía eléctrica en zonas no interconectadas. Todo ello contribuirá a la mejora de la calidad de vida y sostenibilidad de las zonas donde se emplee.

#### **2.3.1. La Turbina Hidrocínética tipo Gorlov**

Fue desarrollada por el investigador y científico ruso Alexander Gorlov, consiste en unas hélices helicoidales dentro de una estructura, clasificada dentro de las turbinas verticales, eso sí con la condición de que su eje se puede ubicar de cualquier forma, pero siempre perpendicular a la corriente del flujo. Gracias a sus álabes de forma helicoidal aprovechan la energía cinética del agua en mayor proporción y eficiencia, alcanzando velocidades hasta 3600 rpm, con bajos niveles de agua (0.40-0.70m), resultando conveniente para generar electricidad en ríos de poca profundidad o en épocas de verano. (Bulla, 2018)

Este tipo de turbina es de diseño, construcción y compleja fabricación, sin embargo, ha demostrado ser un dispositivo eficiente en aerogeneradores. En el caso de implementarse en los ríos se pueden colocar seguidas para generar mayor potencia y aprovechamiento de la corriente, este proceso tiene un bajo nivel de impacto ambiental, ya que por el ángulo y distancia entre sus álabes es posible el paso de fauna marina.

La ejecución de trabajos con turbinas Gorlov y el análisis de los resultados discutidos han permitido su mejoramiento y evolución. Respecto a este tema, se puede encontrar algunos casos en particular. El primero es el trabajo realizado por Campos en el canal de riego Latacunga en la provincia de Cotopaxi – Ecuador. (Bulla, 2018), explica que allí se llevó a cabo un análisis técnico–económico de la utilización de un rotor Gorlov, de 0.6 m de alto por 0,45m de diámetro con un perfil NACA 0018 para una velocidad de flujo de 1,2 m/s. Se realizaron simulaciones para estudiar las fuerzas que intervienen en su funcionamiento y la determinación del rendimiento.

Por otra parte, está el trabajo realizado por Abril, en el cual se reportaron las pruebas realizadas en un canal de laboratorio de una turbina Gorlov diseñada de

acuerdo a las condiciones hidrológicas del río Vaupés en Mitú-Colombia, que genera 111,67 W a una velocidad de flujo de 1,348 m/s.

Bussett desarrolló una turbina Gorlov con una potencia nominal de 140 W que fue probada en un canal de práctica de remo de 1,5 m/s a 94 rpm. En el trabajo de Marturet. Se desarrolló la simulación computacional del comportamiento fluido dinámico de una turbina Gorlov. De acuerdo a los resultados obtenidos su máximo rendimiento con una velocidad de flujo de 5 m/s se consigue a 10 rpm y entregando una potencia de 55 W.

Wright y Hasen, trabajaron sobre la optimización del diseño de una turbina Gorlov. En esta investigación se evaluó la solidez y el número de álabes por medio de simulaciones computacionales y pruebas en laboratorio, una vez verificadas las configuraciones de diseño, se procedió a construir un modelo escala con un perfil NACA 0022 que se probó en un canal de agua para validar los resultados computacionales. Fue inventada entre 1993 y 1995 por Alexander Gorlov y fue desarrollada en la Northeastern University en Boston. Fue patentado el 19 de septiembre 1995 (Arrau Soza, 2016).

Las pruebas realizadas en los laboratorios de hidrodinámica marina en la Universidad de Michigan en 1998 y 1999 mostraron que la Turbina helicoidal Gorlov despegará en agua que se mueve tan despacio como dos nudos y puede capturar alrededor del 35 por ciento de la energía cinética de la corriente (Arrau Soza, 2016).

Soza (2016) señala que la primera cosa a entender es que esto no es la energía hidroeléctrica como la conocemos. Así como las turbinas de viento aprovechan la energía cinética del movimiento del aire, turbina Gorlov ha sido diseñado para

aprovechar la energía cinética del agua en movimiento, incluso las corrientes de movimiento lento sin la necesidad de las represas.

### **Características de las Turbinas Helicoidal de Gorlov**

- ✚ Se puede instalar horizontal o verticalmente, apilados en filas, como bobinas en una cuerda, y se coloca en agua tan baja como de tres pies. (La mayoría de las turbinas de flujo axial requieren ocho pies o más.)
- ✚ Las hojas de una turbina de flujo axial a su vez, sólo si se enfrentan a la corriente, mientras que la turbina de Gorlov funcionará independientemente de la dirección del flujo, ideal para las aguas de las mareas.
- ✚ La cantidad de energía que podría ser producido a partir de las corrientes oceánicas casi desafía la comprensión. Se inicia en movimiento casi instantáneamente y en segundos se volverá más rápido que la velocidad del agua golpeándola.

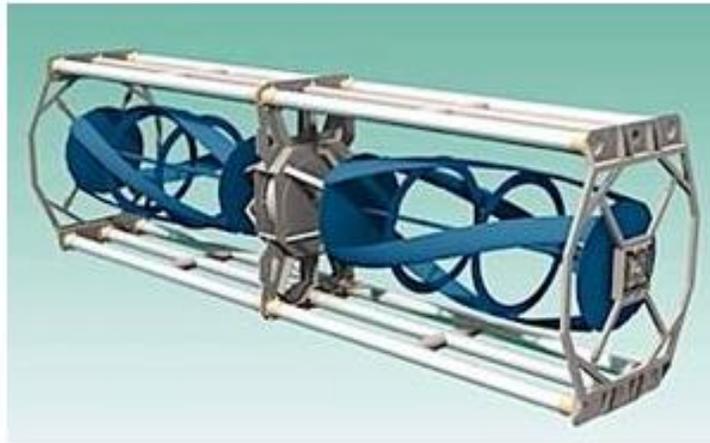
### **Tipos de Turbinas Helicoidal Gorlov (GHT)**

- **Turbina Helicoidal Gorlov Horizontal**

La aplicación de este tipo de turbina se presenta con mayor frecuencia en convertidores que utilizan las corrientes oceánicas para la generación. Desde el punto de vista conceptual y de diseño, son similares a las turbinas de generación eólica. (Empresarial, 2018), refiere el eje del rotor en este caso es paralelo a la corriente de agua. Las cuales a su vez se clasifican dependiendo de la velocidad que genera el mayor o menor número de álabes (rápidas de máximo 3 álabes o lentas de máximo 24 álabes). La estructura puede estar abierta o canalizada. Para

este tipo de turbina, los conductos tienen generalmente forma cónica condicionando el montaje para operación bajo flujo unidireccional.

**Figura 9.** Turbina helicoidal Gorlov horizontal



**Fuente.** (Salme Bautista, 2011)

La figura 9, describe el modelo de una Turbina Helicoidal de Gorlov en posición horizontal

- **Turbina Helicoidal Gorlov Vertical**

Su eje de rotación es perpendicular a la dirección del agua, disposición que facilita la colocación de los demás mecanismos requeridos para la generación de energía (el generador, la caja de engranajes, cojinetes) sobre el nivel del agua. (Empresarial, 2018) Expresa que tiene una mejor aplicación cuando la cabeza es baja en comparación con las de eje horizontal, por lo tanto, pueden ser económica para una amplia gama aplicaciones.

**Figura 10.** Turbina Helicoidal Gorlov Vertical



**Fuente.** (Salme Bautista, 2011)

La figura 10, describe el modelo de una Turbina Helicoidal de Gorlov en posición vertical.

### **Orientación del eje de la turbina**

La diferencia principal entre las turbinas helicoidales y las turbinas convencionales es la orientación del eje con relación a la corriente eléctrica. La GHT es una turbina del eje vertical el que significa que el eje se coloca perpendicular a la energía de corriente de agua, generalmente de ríos, canales, etc, mientras que las turbinas tradicionales son turbinas del eje horizontal el que significa que el eje se coloca paralelo al flujo de la corriente (Ramirez, 2010).

### **Desempeño de los fluidos**

El término "lámina" se utiliza para describir la forma de la sección transversal de la cuchilla en un punto dado, sin distinción para el tipo de fluido, (se refiere por lo

tanto a cualquiera de una "superficie de sustentación" o "hidroplano"). En el diseño helicoidal, la curva de cuchillas alrededor del eje, que tiene el efecto de distribuir uniformemente las secciones de papel de aluminio en todo el ciclo de rotación, por lo que siempre hay una sección de la lámina en cada posible ángulo de ataque. De esta manera, la suma de las fuerzas de sustentación y resistencia en cada hoja no cambian abruptamente con ángulo de rotación. La turbina genera una curva de par más suave, por lo que hay mucha menos vibración y el ruido. También minimiza las tensiones de pico en la estructura y materiales, y facilita la auto-arranque de la turbina. En entornos de prueba del GHT se ha observado que tienen una eficiencia de hasta un 35% en la captación de energía.(Zamora, 2016)

### **Superficie de sustentación-hidroplano**

El GHT opera bajo un ascensor conceptobasado en el plano aerodinámico. Las secciones de papel de aluminio en la GHT son simétricas, tanto de arriba a abajo y también desde el borde líder de salida. El GHT puede girar bien en cualquier dirección y se basa en el movimiento de las láminas con el fin de cambiar la dirección aparente del flujo con relación a las láminas, y por lo tanto cambiar el "ángulo de ataque" de la lámina.

### **Ventajas de las Turbinas Helicoidal de Gorlov**

Zamora (2016) señala que las ventajas de la turbina están basadas en:

- Estas turbinas asumen una forma helicoidal y tienen un mayor rendimiento estando siempre una paleta en posición de recibir el flujo del agua.
- Esta es una máquina que ocupa poco espacio, es fácil de manejar, presenta un costo bajo de fabricación y una pequeña vibración mecánica.
- Puede ser usada en posición vertical u horizontal

- La turbina Gorlov también puede ser denominada de turbina “ecológica” en función de su aspecto constructivo, o sea, dimensión, ángulo y distancia entre sus paletas, que permiten el paso de peces, no afectando el medio ambiente
- Gira al doble de la velocidad del flujo de la corriente.
- Gira en la misma dirección independientemente de la dirección del flujo de la corriente.
- Estas turbinas hidráulicas son especialmente ventajoso para los sistemas de energía de las mareas y las olas.

### **Operación de las Turbinas Helicoidal de Gorlov**

Por otro lado, Martínez (2014) indica que las operaciones de las turbinas se basan en:

- Estas turbinas asumen una forma helicoidal y tienen un mayor rendimiento estando siempre una paleta en posición de recibir el flujo del agua.
- Esta es una máquina que ocupa poco espacio, es fácil de manejar, presenta un costo bajo de fabricación y una pequeña vibración mecánica.
- Puede ser usada en posición vertical u horizontal
- La turbina Gorlov también puede ser denominada de turbina “ecológica” en función de su aspecto constructivo, o sea, dimensión, ángulo y distancia entre sus paletas, que permiten el paso de peces, no afectando el medio ambiente
- Gira al doble de la velocidad del flujo de la corriente.
- Gira en la misma dirección independientemente de la dirección del flujo de la corriente.

- Estas células tampoco necesitan refrigeración ni limpieza ya que la brisa del viento se encarga de eso, al mismo tiempo el diseño futurista permita que la turbina aproveche los vientos multidireccionales aumentando su eficacia a más de 50% frente a las turbinas de hélice convencional
- Otra gran ventaja de este diseño de turbinas helicoidales es que se pueden instalar en zonas residenciales ya que no presentan peligro a personas o animales, nulo impacto sonoro.

### **Eficiencia de las Turbinas Helicoidal de Gorlov**

- La turbina puede alcanzar velocidades de 1800 o 3600 rpm con niveles de agua de tan solo 40 o 70 centímetros, por lo que es conveniente para generar electricidad en ríos de poca profundidad (Férrandez Díez, 2018).
- Para producir electricidad, se utiliza un sistema que consiste de una turbina, que gira al contacto con el agua, que produce el movimiento giratorio del generador.
- En ambientes de prueba el GHT (por sus siglas en inglés, Turbinas Helicoidales de Gorlov), se ha observado para tener eficacia del hasta 42% en captura de la energía (Férrandez Díez, 2018).
- El conocimiento de los límites de eficiencia de la turbina permite perfeccionar el diseño de centrales hidroeléctricas.

### **3. DESARROLLO DEL TRABAJO DE GRADO**

Para el diseño de la turbina tipo Gorlov se tuvo en cuenta las fuerzas aplicadas al momento de su operación normal, por ende, se presentan esfuerzos que hace que el material pueda presentar algún tipo de fatiga. Es por ello que se debe tener en cuenta el tipo de material a utilizar, para mitigar cualquier posible fractura en un componente del sistema. Mediante el software SolidWorks se elaboró un análisis estático de la pieza, lo cual implicó la aplicación de cargas estáticas en diferentes posiciones ya sean verticales, laterales y longitudinales. Esto, dio cabida a la simulación de las fuerzas de reacción, desplazamientos, tensiones y deformaciones unitarias sufridas por el modelo tridimensional, con ello se brinda confiabilidad en los diseños.

#### **3.1. DISEÑAR UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA AISLADO BASADO EN LA TURBINA DE GORLOV**

Para dar cumplimiento al primer objetivo propuesto en este proyecto, se procedió a desarrollar el diseño en tercera dimensión, de la turbina Gorlov utilizando un programa CAD conocido como SolidWorks. Este Software permitió el modelado paramétrico del sólido en 3D, donde para comenzar, cada pieza nace de un boceto o croquis diseñado en 2D mediante líneas y/o curvas.

Además del modelo, SolidWorks facilita la simulación del mismo, aplicando diversos análisis como lo son el análisis de tensión o esfuerzos, estático y nodal, el análisis dinámico, para evaluar velocidad o movimiento, entre otros.

Se diseñaron los bocetos teniendo en cuenta las medidas adquiridas en la investigación del proyecto, donde se logra hacer un modelo a escala de todas las partes que componen la turbina Gorlov y su aspecto en un ambiente realista. Luego se procede a darle forma a cada elemento y por último se une cada componente en un ensamble que comprende toda la estructura de la turbina. Para culminar con la parte de diseño del presente trabajo, se elaboran los planos en una escala que permita su visualización en una hoja de formato A4, los mismos serán anexados al proyecto como soporte del desarrollo.

### 3.1.1. Cálculos de diseño turbina tipo Gorlov

Para el cálculo de diseño de la turbina tipo Gorlov se tuvieron en cuenta estudios realizados como:

**Tabla 1.** Análisis de investigaciones Turbina Tipo Gorlov

Descripción	Altura rotor turbina Gorlov	Diámetro rotor	Velocidad de flujo	Watt
Implementación de un rotor Gorlov en Canal de riego Latacunga provincia de Cotopaxi Ecuador	0.60 m	0.45 m perfil NACA 0018	1.2 m/s	111W
Pruebas realizadas en un canal de laboratorio de una turbina Gorlov diseñada de acuerdo a las condiciones hidrológicas del río Vaupés en Mitú-Colombia	1 m	0.38 m	1.34 m/s	11 W
Desarrollo de una turbina Gorlov experimentada en un Canal de practica	0.60 m	0.25 m	1.8 m/s	35 W
Gustavo Marturet desarrolló la simulación computacional del comportamiento fluido dinámico de una turbina Gorlov	0.60 m	0.45 m perfil 0020 tipo helicoidal	5 m/s	55 W

**Fuente:** COLINA, Guillermo. Diseño de un rotor hidrocinetico tipo Gorlov para el suministro de energía eléctrica a una vivienda ubicada en el departamento de Casanare, 2018. Bogotá: Universidad Santo Tomás

Los parámetros de diseño estuvieron basados en el análisis de cálculos analíticos e investigaciones nacionales e internaciones evidenciados en la Tabla 1, los cuales permitieron conocer parámetros altura, diámetro, velocidad, potencia, entre otros factores implicados en la generación de energía eléctrica a partir del uso de una turbina tipo Gorlov.

De acuerdo a informes de la PTAR (2017) las condiciones de descarga de la Planta de tratamiento de aguas residuales de san silvestre en el municipio de Barrancabermeja, Santander se caracterizan por:

CAUDAL DESCARGA	DIAMETRO TUBERIA DESCARGA	LONGITUD TUBERÍA DISTRIBUCIÓN
1000 lps = 1m³/s	30" = 0.76 m	1880 m

Fuente: PTAR. Plan de gestión y resultados planta de tratamiento de agua Barrancabermeja, 2017.

El caudal es de 1.000 litros por segundo distribuida mediante tubería con un diámetro de 30", con una longitud de 1880 m en material CCP (Tubería cilindro de acero con refuerzo de varilla y revestimientos de mortero de cemento)(PTAR, 2017). Partiendo del caudal de la línea de descarga de agua se utiliza para hallar las variables que determinan el diseño de la turbina Gorlov. Montero(2007) señala que para calcular el caudal se aplica la siguiente ecuación:

$$Q = V * A$$

Ecuación 1

Despejando velocidad se obtiene que:

$$V = \frac{Q}{A}$$

Donde;

Q= Caudal

A= Área sección transversal de tubería de descarga

V= Velocidad

$$A = \pi * r^2$$

$$A = \pi * (0.38 \text{ m})^2$$

$$A = 0.45 \text{ m}^2$$

$$V = \frac{1 \text{ m}^3/\text{s}}{0.45 \text{ m}^2}$$

$$V = 2.22 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Según Gorlov(2010), un componente importante para las turbinas en flujo libre es la relación de velocidad del agua, la cual suele estar en límites de 2.0 - 2.6 para evitar la posibilidad de cavitaciones. Por lo tanto, la velocidad de entrada obtenida como resultado es de **2.22 m/s**.

Para el Numero de Reynolds se tiene en cuenta que la temperatura promedio de agua de descarga oscila entre 25 °C y 30° C, por lo que se selecciona un valor medio de 27°C (PTAR, 2017).

$$R_e = \frac{\rho * D * V}{\mu} = \frac{V * D}{\nu} \text{ Ecuación 2}$$

Donde,

$\rho = \text{Densidad}$

$D = \text{Diámetro de la tubería}$

$V = \text{Velocidad del fluido}$

$\nu = \text{Viscosidad cinemática del fluido}$

$\mu = \text{Viscosidad dinámica del fluido}$

La viscosidad dinámica es una variable obtenida con relación a la temperatura la cual se logra observar en la siguiente imagen:

**Figura 11.** Viscosidad dinámica del agua a varias temperaturas

Temperatura °C	Viscosidad dinámica kg / (m·s)	Temperatura °C	Viscosidad dinámica kg / (m·s)
0	0,001792	34	0,000734
1	0,001731	35	0,000720
2	0,001674	36	0,000705
3	0,001620	37	0,000692
4	0,001569	38	0,000678
5	0,001520	39	0,000666
6	0,001473	40	0,000653
7	0,001429	41	0,000641
8	0,001386	42	0,000629
9	0,001346	43	0,000618
10	0,001308	44	0,000607
11	0,001271	45	0,000596
12	0,001236	46	0,000586
13	0,001202	47	0,000576
14	0,001170	48	0,000566
15	0,001139	49	0,000556
16	0,001109	50	0,000547
17	0,001081	51	0,000538
18	0,001054	52	0,000529
19	0,001028	53	0,000521
20	0,001003	54	0,000512
21	0,000979	55	0,000504
22	0,000955	56	0,000496
23	0,000933	57	0,000489
24	0,000911	58	0,000481
25	0,000891	59	0,000474
26	0,000871	60	0,000467
27	0,000852	61	0,000460
28	0,000833	62	0,000453
29	0,000815	63	0,000447
30	0,000798	64	0,000440

**Fuente:** MEJIA, Daniel. Viscosidad dinámica del agua a diferentes temperaturas, 2017.

Por lo tanto, al reemplazar la ecuación se obtiene que:

$$R_e = \frac{1000 \frac{Kg}{m^3} * 0.76 m * 2.22 \frac{m}{s}}{0.000852} = 1980281 \rightarrow \text{Flujo turbulento}$$

De acuerdo al número de Reynolds se logra conocer si el flujo sigue un modelo laminar o turbulento. “El flujo en una tubería circular se considera laminar para un rango  $Re < 2300$ , turbulento para  $Re > 4000$ ” (gado, 2018, pág. 9). Para el cálculo realizado se obtuvo un flujo mayor a 4000 por lo que se relaciona que este se encuentra en un estado turbulento.

Para calcular la fuerza requerida para el movimiento de la turbina se debe tener en cuenta el caudal de entrada del fluido, es por ello que se relaciona la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{\text{Volumen}}{\text{Tiempo}}$$

La masa del fluido que interactúa con la turbina es igual a:

$$\rho = \frac{m}{v} \text{Ecuación 3}$$

Donde,

$m = \text{Masa}$

$v = \text{Volumen}$

$\rho = \text{Densidad}$

Despejando masa se tiene que:

$$m = v * \rho$$

$$m = 1m^3 * 998 \frac{kg}{m^3}$$

$$m = 998 Kg$$

La fuerza al corte de la corriente es aproximadamente:

$$F = m * g$$

Ecuación 4

$$F = 998 Kg * 9.81 m/s^2$$

$$F = 9790.38 N$$

Para el cálculo del torque se tiene que:

$$T = F * r$$

Ecuación 5

Donde,

*F = Fuerza al corte*

*r = Radio de la tubería*

$$T = 9790.38 N * 0.38 m$$

$$T = 3720.34 N.m$$

Para hallar la potencia de la turbina se utiliza la ecuación que relaciona el producto del torque (T) por la velocidad angular (w).

$$P_{turbina} = T * w$$

Para calcular la velocidad angular se tiene que:

$$w = \frac{\text{Velocidad lineal}}{\text{Radio de la turbina}}$$

Ecuación 6

$$w = \frac{2.22 \text{ m/s}}{0.36 \text{ m}}$$

$$w = 6.12 \frac{\text{rad}}{\text{s}} = 58.38 \text{ Rpm}$$

Entonces,

$$P_{\text{turbina}} = 3720.34 \text{ N.m} * 6.12 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

$$P_{\text{turbina}} = 22.78 \text{ KW}$$

### **Coefficiente de potencia (Cp)**

Gorban, Gorlov y Silantyev publicaron una investigación sobre límites de eficiencia en turbinas de flujo libre, este estudio estableció un límite máximo del 35% de eficiencia para una turbina tipo Gorlov (Marturet, 2015). Por lo que se concluye que el coeficiente o eficiencia de una turbina vertical se encuentra alrededor de un rendimiento del 35%. El coeficiente de potencia es una relación entre la potencia que otorga una turbina en su flecha y la potencia que posee la corriente que pasa a través de ella (Pico, 2018).

$$Cp = \frac{P_{\text{turbina}}}{P_{\text{fluido}}}$$

Ecuación 7

$$P_{\text{fluido}} = \frac{P_{\text{turbina}}}{Cp}$$

$$P_{\text{fluido}} = \frac{22.78 \text{ kW}}{0.35} = 65.08 \text{ kW}$$

Esta es la potencia del fluido que ingresa a la turbina de la cual solo se aprovecha el 35% de su energía cinética.

La potencia eléctrica depende de la potencia mecánica entregada al generador la cual genera pérdidas dependiendo a su trabajo. Para un trabajo continuo de energía se obtiene un factor de seguridad de 1,4.

$$Pelectrica = \frac{Pturbina}{Factor\ de\ seguridad} \quad \text{Ecuación 8}$$

$$Pelectrica = \frac{22.78\ kW}{1.4} = 16\ kW$$

**Tabla 2.** Resumen cálculo de potencias

ITEM	POTENCIA	ECUACIÓN	Valor	
1	Torque	$T = F * r$	3720.34 N.m	
2	Velocidad angular	$w = \frac{Velocidad\ lineal}{Radio\ de\ la\ turbina}$	$6.12 \frac{rad}{s}$	58.38 Rpm
3	Coefficiente de potencia	0.35 ( Adimensional)		
4	Potencia turbina	$Pturbina = T * w$	22.78kW	30 Hp
5	Potencia del fluido	$P_{fluido} = \frac{Pturbina}{Cp}$	65.08 kW	87 Hp
6	Potencia eléctrica	$Pelectrica = \frac{Pturbina}{Factor\ de\ seguridad}$	15 kW	20 Hp

Fuente: Autor

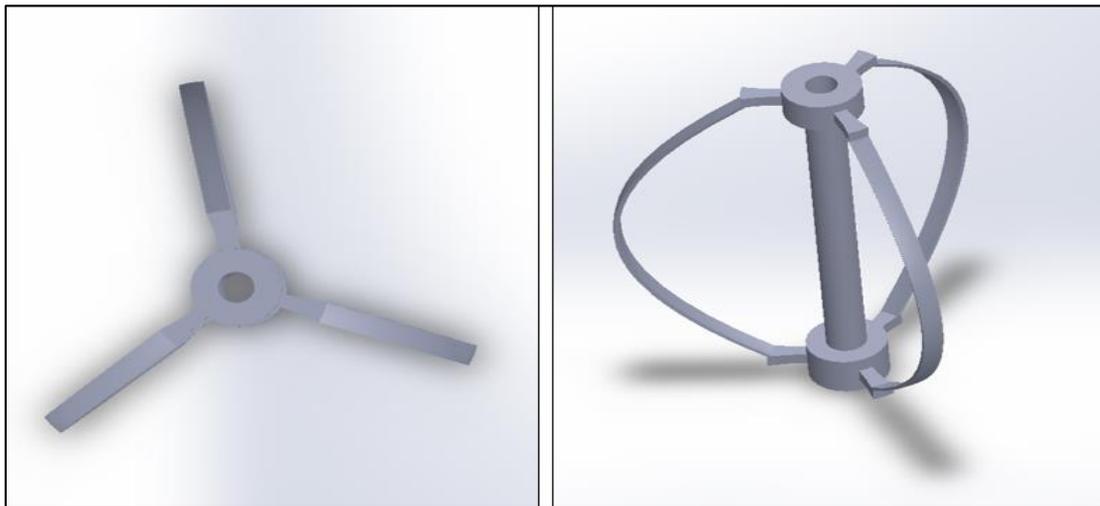
De acuerdo a la Tabla anterior, el items la potencia que lleva el fluido es equivalente a 22.78 kW, mientras que la extracción de energía realizada por la turbina se calcula a partir del resultado de la ecuación de potencia del fluido numeral 5, derivando un valor de 65.08 kW.

### 3.1.2. Análisis de eficiencia de acuerdo a la variación del ángulo en los alabes.

Según Gorlov (2010) los estudios experimentales para obtener una mayor eficiencia en la turbina están basados en la variación de ángulos de inclinación a 0°, 45° y 90°. Shiono (2002) demuestra que el cambio del ángulo de inclinación afecta directamente en el torque de la turbina. A continuación, se realiza un análisis comparativo con el propósito de conocer la eficiencia en función del Angulo de inclinación teniendo en cuenta los resultados derivados del informe de SolidWorks Flow Simulation.

#### 3.1.2.1 Variación de ángulo 0°

**Figura 12.** Alabes ángulo 0°



Fuente: Autor

### Sistema de unidad SI (m – Kg – s)

## Fluido Agua

- Dimensiones**

<b>X min</b>	-0.473 m
<b>X max</b>	0.445 m
<b>Y min</b>	-0.423 m
<b>Y max</b>	0.513 m
<b>Z min</b>	-0.519 m
<b>Z max</b>	1.023 m

Fuente: Informe Solidworks Fluid Simulation

- Dimensiones básicas de malla**

<b>Number of cells in X</b>	6
<b>Number of cells in Y</b>	6
<b>Number of cells in Z</b>	10

Fuente: Informe Solidworks Fluid Simulation

- Condiciones iniciales**

**Tabla 3.**Condiciones ambientales

<b>Parámetros termodinámicos</b>	Presión estática: 101325.00 Pa Temperatura: 20.05 °C
<b>Parámetros de velocidad</b>	Velocidad vector Velocidad in X dirección: 0 m/s Velocidad in Y dirección: 0 m/s Velocidad in Z dirección: 0 m/s

Fuente: Informe Solidworks Fluid Simulation

- **Condiciones de borde**

**Tabla 4.** Volumen de entrada flujo

<b>Tipo</b>	Volumen de entrada flujo
<b>Fases</b>	Pieza2^Gorlov-1/Saliente-Extruir1//Face
<b>Reference axis</b>	X
<b>Parámetros de flujo</b>	Dirección de vectores de flujo: Normal Caudal volumétrico: 4.0000 m <sup>3</sup> /s
<b>Parámetros termodinámicos</b>	Temperatura: 20.05 °C

Fuente: Informe Solidworks Fluid Simulation

**Tabla 5.** Presión total

<b>Tipo</b>	Total presión
<b>Fases</b>	Pieza3^Gorlov-1/Saliente-Extruir1//Face
<b>Sistema coordinado</b>	Sistema de coordenadas faciales
<b>Eje de referencia</b>	X
<b>Parámetros termodinámicos</b>	Total Presión: 101325.00 Pa Temperatura inicial: 20.05 °C

Fuente: Informe Solidworks Fluid Simulation

- **Resultados**

Nombre	Unid	Valor	Criterio	Delta
GG Av Static Presión	Pa	97423	12613.95	1453.22965
GG Av Total Presión	Pa	122233	11373.9959	1416.78164
Mass (Fluid)	kg	1000	12.6957398	8.605e-05
Flujo volumetrico	m <sup>3</sup> /s	1	0.9933654	0.999222
GG Velocid	m/s	2.217	0.130032364	0.011446
GG Normal Fuerza 1	N	28588	2104.92489	849.7762

GG Fuerza 1	N	9760.38	2149.67701	842.1463
GG Torque (X) 1	N*m	3720	1020.67875	903.51390

Fuente: Informe Solidworks Fluid Simulation

• **Análisis máximo y mínimo de variables simuladas**

Nombre	Mínimo	Máximo
Densidad del fluido [kg/m <sup>3</sup> ]	997.56	997.57
Presión [Pa]	-94960.96	138085.60
Temperatura [°C]	20.03	20.07
Velocidad [m/s]	0	22.697
Velocidad (X) [m/s]	-6.843	4.601
Velocidad (Y) [m/s]	-4.570	12.622
Velocidad (Z) [m/s]	-2.656	21.965
Velocidad RRF [m/s]	0	22.697
Velocidad RRF (X) [m/s]	-6.843	4.601
Velocidad RRF (Y) [m/s]	-4.570	12.622
Velocidad RRF (Z) [m/s]	-2.656	21.965
Vortice [1/s]	5.19e-43	652.13
Presión relativa [Pa]	-196285.96	36760.60
Esfuerzo cortante [Pa]	0	663.63
Número de cuello de botella	2.5862686e-30	1.0000000
Coefficiente de transferencia de calor [W/m <sup>2</sup> /K]	0	0
Número de atajo	0	1.0000000
Flujo de calor superficial [W/m <sup>2</sup> ]	-0	-0
Flujo de calor superficial (Convective) [W/m <sup>2</sup> ]	-2.713e+10	1.098e+10
Potencia acústica [W/m <sup>3</sup> ]	7.602e-173	2.014e-10
Nivel de potencia acústica [dB]	0	23.04

Fuente: Informe Solidworks Fluid Simulation



R-DC-95

## DOCENCIA

Sistema de generación de energía eléctrica basado en la turbina de Gorlov  
para la planta de tratamiento de aguas residuales de san silvestre en el  
municipio de Barrancabermeja

PÁGINA 73  
DE 142

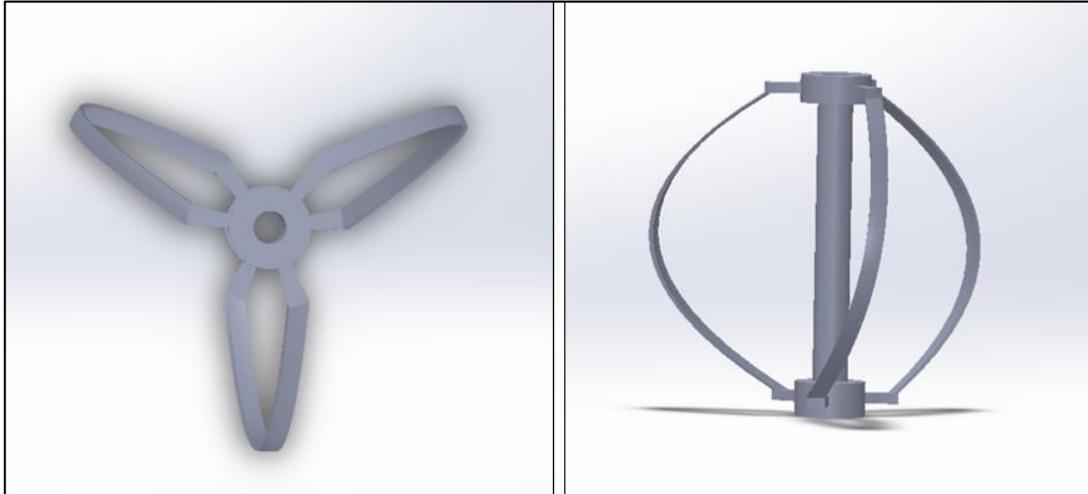
VERSIÓN: 01

ELABORADO POR:  
Oficina de Investigaciones

REVISADO POR:  
soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR : Asesor de planeación  
FECHA APROBACION:

**Figura 13.** Alabes ángulo 45°



Fuente: Autor

**Sistema de unidad SI (m – Kg – s)**

**Fluido:** Agua

• **Dimensiones**

<b>X min</b>	-0.472 m
<b>X max</b>	0.445 m
<b>Y min</b>	-0.420 m
<b>Y max</b>	0.507 m
<b>Z min</b>	-0.523 m
<b>Z max</b>	1.036 m

Fuente: Informe Solidworks Fluid Simulation

• **Dimensiones básicas de malla**

<b>Number of cells in X</b>	6
<b>Number of cells in Y</b>	6
<b>Number of cells in Z</b>	10

Fuente: Informe Solidworks Fluid Simulation

- **Condiciones iniciales**

**Tabla 6.** Condiciones ambientales

<b>Parámetros termodinámicos</b>	Presión estática: 101325.00 Pa Temperatura: 20.05 °C
<b>Parámetros de velocidad</b>	Velocidad vector Velocidad in X dirección: 0 m/s Velocidad in Y dirección: 0 m/s Velocidad in Z dirección: 0 m/s

Fuente: Informe Solidworks Fluid Simulation

- **Condiciones de borde**

**Tabla 7.** Volumen de entrada flujo

<b>Tipo</b>	Volumen de entrada flujo
<b>Parámetros de flujo</b>	Dirección de vectores de flujo: Normal Caudal volumétrico: 3.0000 m <sup>3</sup> /s Relativo al marco giratorio: No
<b>Parámetros termodinámicos</b>	Temperatura: 20.05 °C

Fuente: Informe Solidworks Fluid Simulation

**Tabla 8.** Presión total

<b>Tipo</b>	Total presión
<b>Fases</b>	Pieza3^Gorlov-1/Saliente-Extruir1//Face
<b>Parámetros termodinámicos</b>	Total Pressure: 101325.00 Pa Temperatura: 20.05 °C

Fuente: Informe Solidworks Fluid Simulation

• **Resultados**

Nombre	Unid	Valor	Criterio	Delta
GG Av Static Presión	Pa	97019.49	7923.6557	1244.85399
GG Av Total Presión	Pa	111436.10	7152.3818	909.646147
GG Masa (Fluid) 1	kg	1000	12.73299	7.25380039e-05
Flujo volumetrico	m3/s	1	0.98564	0.98548
GG Av Velocid 1	m/s	2.223	0.106455	0.0371276626
GG Av Velocid (X)	m/s	-0.012	0.002664	0.00206146134
GG Normal Fuerza	N	18593.975	1059.0877	920.998004
GG Fuerza 1	N	9760.38	1080.7613	918.201973
GG Torque (X) 1	N*m	3720	924.88523	886.180863

Fuente: Informe Solidworks Fluid Simulation

• **Análisis máximo y mínimo de variables simuladas**

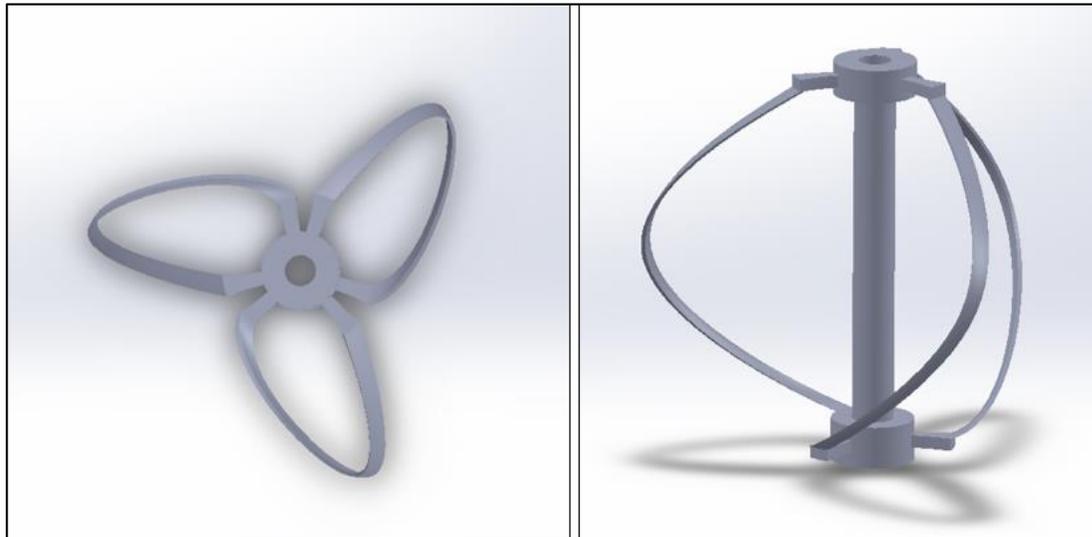
Nombre	Mínimo	Máximo
Densidad del fluido [kg/m <sup>3</sup> ]	997.56	997.56
Presión [Pa]	-28780.10	121084.85
Temperatura [°C]	20.04	20.06
Temperatura (Fluido) [°C]	20.04	20.06
Velocidad [m/s]	0	17.962
Velocidad (X) [m/s]	-3.823	3.445
Velocidad (Y) [m/s]	-4.512	12.663
Velocidad (Z) [m/s]	-2.129	17.347
Velocidad RRF [m/s]	0	17.962
Velocidad RRF (X) [m/s]	-3.823	3.445
Velocidad RRF (Y) [m/s]	-4.512	12.663
Velocidad RRF (Z) [m/s]	-2.129	17.347

Fuente: Informe Solidworks Fluid Simulation

Nombre	Mínimo	Máximo
Vortice [1/s]	3.67e-43	371.10
Presión relativa [Pa]	-130105.10	19759.85
Esfuerzo cortante [Pa]	0	443.65
Número de cuello de botella	9.1224718e-29	1.0000000
Coeficiente de transferencia de calor [W/m <sup>2</sup> /K]	0	0
Número de atajo	0	1.0000000
Flujo de calor superficial [W/m <sup>2</sup> ]	-0	-0
Flujo de calor superficial (Convective) [W/m <sup>2</sup> ]	-2.138e+10	8.237e+09
Potencia acústica [W/m <sup>3</sup> ]	7.698e-173	7.166e-10
Nivel de potencia acústica [dB]	0	28.55

Fuente: Informe Solidworks Fluid Simulation

Figura 14. Alabes ángulo 90°



Fuente: Autor

**Sistema de unidad SI (m – Kg – s)**

**Fluido:** Agua

- Dimensiones**

<b>X min</b>	-0.456 m
<b>X max</b>	0.437 m
<b>Y min</b>	-0.386 m
<b>Y max</b>	0.502 m
<b>Z min</b>	-0.510 m
<b>Z max</b>	1.030 m

Fuente: Informe Solidworks Fluid Simulation

- Dimensiones básicas de malla**

<b>Number of cells in X</b>	6
<b>Number of cells in Y</b>	6
<b>Number of cells in Z</b>	10

Fuente: Informe Solidworks Fluid Simulation

- Condiciones iniciales**

**Tabla 9.**Condiciones ambientales

<b>Parámetros termodinámicos</b>	Presión estática: 101325.00 Pa Temperatura: 20.05 °C
<b>Parámetros de velocidad</b>	Velocidad vector Velocidad en X dirección: 0 m/s Velocidad en Y dirección: 0 m/s Velocidad en Z dirección: 0 m/s

Fuente: Informe Solidworks Fluid Simulation

- **Condiciones de borde**

**Tabla 10.** Volumen de entrada flujo

<b>Tipo</b>	Volumen de entrada flujo
<b>Parámetros de flujo</b>	Dirección de vectores de flujo: Normal Caudal volumétrico: 2.0000 m <sup>3</sup> /s Relativo al marco giratorio: No
<b>Parámetros termodinámicos</b>	Temperatura: 20.05 °C

Fuente: Informe Solidworks Fluid Simulation

**Tabla 11.** Presión total

<b>Tipo</b>	Total presión
<b>Parámetros termodinámicos</b>	Total Pressure: 101325.00 Pa Temperature: 20.05 °C

Fuente: Informe Solidworks Fluid Simulation

- **Resultados**

Nombre	Unid	Valor	Criterio	Delta
GG Av Total Presión	Pa	107418.93	3057.7773	343.317267
GG Av Temperatura (Fluid)	°C	20.05	0.000151708	0.00011305
GG Masa (Fluid)	Kg/s	1000	11.6887807	3.3620224e-05
Flujo volumetrico	m <sup>3</sup> /s	1	0.99992544	0.99887455
GG Av Velocidad	m/s	2.231	0.06269891	0.0131483973
GG Fuerza	N	9760.38	490.417376	323.465625
GG Torque (X)	N*m	3720	343.692948	299.961782

Fuente: Informe Solidworks Fluid Simulation

• **Análisis máximo y mínimo de variables simuladas**

Nombre	Mínimo	Máximo
Densidad del fluido [kg/m <sup>3</sup> ]	997.56	997.56
Presión [Pa]	50192.37	109317.91
Temperatura [°C]	20.04	20.05
Temperatura (Fluido) [°C]	20.04	20.05
Velocidad [m/s]	0	11.493
Velocidad (X) [m/s]	-2.052	2.913
Velocidad (Y) [m/s]	-1.659	7.101
Velocidad (Z) [m/s]	-0.575	11.065
Velocidad RRF [m/s]	0	11.493
Velocidad RRF (X) [m/s]	-2.052	2.913
Velocidad RRF (Y) [m/s]	-1.659	7.101
Velocidad RRF (Z) [m/s]	-0.575	11.065
Vortice [1/s]	0	463.51
Presión relativa [Pa]	-51132.63	7992.91
Esfuerzo cortante [Pa]	0	195.85
Número de cuello de botella	0	1.0000000
Coefficiente de transferencia de calor [W/m <sup>2</sup> /K]	0	0
Número de atajo	0	1.0000000
Flujo de calor superficial [W/m <sup>2</sup> ]	-0	-0
Flujo de calor superficial (Convective) [W/m <sup>2</sup> ]	-1.365e+10	5.450e+09
Potencia acústica [W/m <sup>3</sup> ]	8.025e-173	1.257e-12
Nivel de potencia acústica [dB]	0	0.99

Fuente: Informe Solidworks Fluid Simulation

Con el propósito de conocer el efecto que genera la inclinación de los álabes sobre el desempeño dinámico de la turbina, se efectuó la variación de los ángulos entre 0, 45 y 90 grados. Los resultados arrojados son resumidos en la siguiente tabla:

Angulo de inclinación alabe	Presión (Pa)	Masa (kg/s)	Flujo volumétrico	Velocidad (m/s)	Fuerza (N)	Torque (N*m)
0°	106816.90	1000	1 m <sup>3</sup> /s	2.217	9760.38 N	3720 Nm
45°	111436.10	1000	1 m <sup>3</sup> /s	2.223	9760.38 N	3720 Nm
90°	107418.93	1000	1 m <sup>3</sup> /s	2.231	9760.38 N	3720 Nm

**Tabla 12.** Variación del ángulo de inclinación

**Fuente:** Autor

El análisis para el diseño de los alabes a 0°, 45° y 90° permite concluir que a mayor inclinación se obtiene un torque más alto. Es decir que entre más cercano sea el ángulo a 90°, la posición del alabe adquiere una mayor distancia del eje extremo inferior del cuerpo lo que genera un mayor brazo de palanca y por lo tanto el torque de salida sobre el eje principal de rotación(Carrillo, 2018).

A partir de lo anterior se procedió a realizar el cálculo de diseño de los alabes obtenido con base a la siguiente ecuación:

- **Angulo de paso**

El número de álabes fue dado teniendo en cuenta el nivel de eficiencia del equipo, lo cual fue definido a partir de lo señalado en el artículo escrito por Alexander Gorlov (2010), titulado “Helical Turbine And Fish Safety” donde señala que las mayores eficiencias se presentan en sistemas conformados por tres álabes (valor cercano al 35%), siendo esta la principal referencia para el diseño de la pieza.

El ángulo de inclinación de los álabes se forma entre la superficie inferior y la superficie superior de la estructura. Para el cálculo del ángulo que forman los álabes con respecto al vector de movimiento del fluido al eje longitudinal del rotor se establece que:

$$\alpha = \text{Tan}^{-1} \left( \frac{n h}{\pi \theta} \right)$$

Donde,

n= Numero de alabes

$\theta$  = Diámetro del rotor

h= Altura del rotor

Remplazando las variables se obtiene que:

$$\alpha = \text{Tan}^{-1} \left( \frac{3 * 0.579 \text{ m}}{\pi * 0.058 \text{ m}} \right)$$

$\alpha = 84^\circ$  Angulo de diseño seleccionado

De acuerdo a los cálculos anteriores se consideraron los siguientes datos (Tabla 13) utilizados para el diseño de la turbina Gorlov en el programa Solidworks:

**Tabla 13.** Datos de diseño Turbina tipo Gorlov

ITEMS	DESCRIPCIÓN	VALOR
1	Diámetro interno tubo	0.76 m
2	Área tubo	0.45 m <sup>2</sup>
3	Diámetro de rotor	0.01 m
4	Altura rotor	0.58 m
5	Caudal de entrada	1 m <sup>3</sup> /s
6	Velocidad	2.22 m/s
7	Longitud tubería distribución	1880 m
8	Angulo de paso de los alabes	84°
9	Coeficiente de potencia	0.35

Fuente: Autor

### 3.1.3. Modelado de la turbina Gorlov en SolidWorks

Se identificaron los componentes principales y características de diseño, para conformar la turbina tipo Gorlov. El modelo estático se realizó en el software SolidWorks con base a diagramas y planos recopilados de la investigación previa, los cuales permitieron tener una guía de referencia para las dimensiones que se le proporcionan a cada pieza dentro del ensamble final desarrollado.

A partir de lo anterior, se logró detallar claramente las medidas nominales, como aporte importante para el proyecto, presentando un documento con el diseño estructurado de un sistema de generación de energía eléctrica aislado basado en

la turbina tipo Gorlov permitiendo el dimensionamiento de los componentes a ser ubicado en la línea de descarga de la PTAR.

- **Descripción de los componentes de la turbina Gorlov**

La turbina Gorlov consiste en una hélice helicoidal cubierta por una estructura, su eje es horizontal o vertical, perpendicular al fluido que lo atraviesa. Posee una gran ventaja y es que sus aspas al ser helicoidales, se posicionan de forma perpendicular a la dirección del flujo, por lo que la energía cinética puede ser aprovechada de forma más eficiente (Gorlov, 2010). Los componentes que conforman la turbina Gorlov los cuales cumplen la función de:

### **Alabes**

Los alabes en las turbinas son fundamentales debido a que permiten convertir el movimiento del fluido en potencia mecánica. El ángulo de inclinación ( $\psi$ ) representa la posición de la punta inferior de la hélice con respecto a la punta superior.

### **Eje central**

Dicha base que permite el giro de la estructura, el cual cuenta con dos soportes localizados en la parte superior e inferior del equipo para anclar los alabes. Este componente se encarga de soportar las cargas transmitidas por los alabes al estar sometidas a flexión con carga dinámica como la consecuencia de la acción distribuida del fluido que atraviesa el sistema.

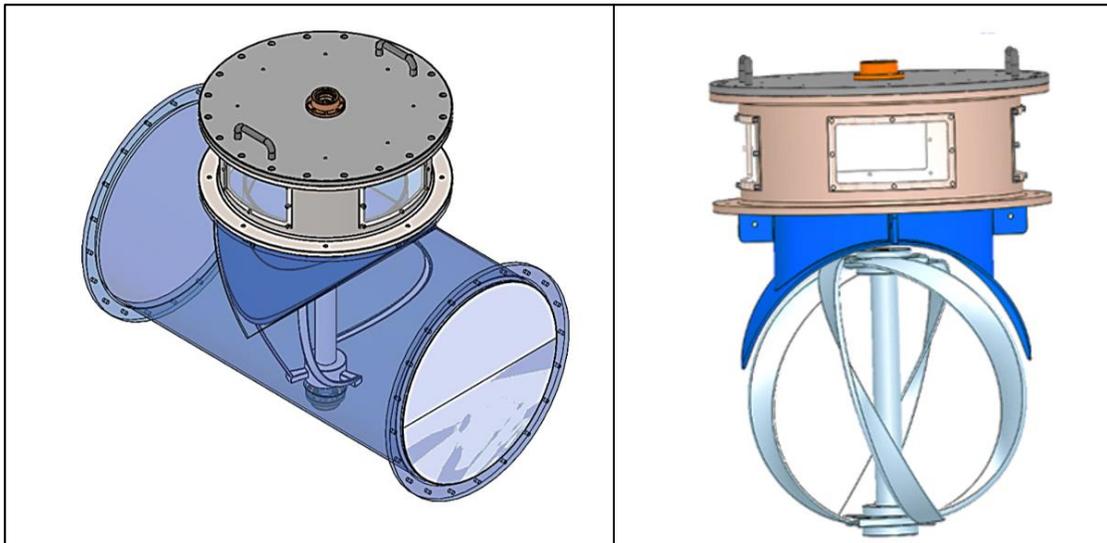
### Tubería

Actúa como recubrimiento de la turbina Gorlov. Por medio de la tubería fluye el líquido que atraviesa los alabes para la posterior generación de energía mecánica.

### Engrane

Diseño mecánico por medio de un eje vertical que se une a un sistema de transmisión los cuales ocupan menos espacio y brindan una mayor potencia.

**Figura 15.**Modelo de la turbina Gorlov en Solidworks



**Fuente:** Autor

En la Figura 15 se muestra el diseño realizado en el programa Solidworks, el cual permite elaborar modelos en tercera dimensión con el fin de visualizar su aspecto y a la vez, evaluar su comportamiento y diferentes acciones. Para el diseño un sistema de generación de energía eléctrica aislado basado en la turbina de Gorlov,

se elaboraron diferentes piezas que en conjunto conforman el ensamble visualizado. Se elabora el modelo de los alabes, se procede con el diseño del eje principal y más adelante se llevó a cabo la selección del rodamiento.

#### **3.1.4. Planos mecánicos turbina Gorlov**

Los planos mecánicos derivados del software Solidworks de la turbina Gorlov (Evidenciados a partir del anexo 1), permiten identificar las dimensiones reales medidas en milímetros de cada pieza como lo son los alabes, tubería, tapa superior, engranaje, cobertura entre otros.

#### **3.1.5. Característica de materiales**

De acuerdo al modelo realizado se establece a continuación la descripción de los materiales utilizados los cuales son concebidos teniendo en cuenta la evaluación de parámetros de diseño, operación y de fácil acceso comercial.

- **Alabes**

En primer lugar, para el diseño de los álabes se da de acuerdo al perfil NACA 0021, ya que estos son los encargados de convertir el movimiento de un fluido en energía mecánica, en el caso de la geometría del alabe de la turbina Gorlov. Se determinó el tipo de material, lo cual dio cabida a la selección del acrilonitrilo butadieno estireno o ABS, el cual es un plástico con mayor dureza, resistencia al impacto, menor flexibilidad y es utilizado especialmente en la industria.

**Tabla 14.** Propiedades mecánicas material ABS - Alabes

1	Módulo de elasticidad a la tracción	2030 MPa
2	Esfuerzo de tracción a la deformación	43,6 MPa
3	Resistencia a la prueba de impacto Charpy (a 23 °C)	58 kJ/m2
4	Alargamiento a la deformación	4,8 %
5	Absorción del agua	0.3%
6	Temperatura de fusión	225-245 °C
7	Temperatura de reblandecimiento Vicat a 10 N	97 °C
8	Índice de fluidez (MFR)	41 g/10 min
9	Conductividad térmica	0.17 W/KM

**Fuente:** ABS ULTIMAKER. Ficha de datos técnicos ABS.

La Tabla 14 permite conocer las propiedades mecánicas y térmicas del material ABS el cual es aplicado a los alabes. De igual forma, se considera una densidad de 1.0-1.05 g/cm<sup>3</sup> con una Temperatura de uso máximo (Max Cont. Use Tem): 80-95 °C y una fuerza tensil entre 40 a 50 Mpa.

- **Eje del rotor**

Ortiz (2018) señala que las cargas transmitidas desde los rodamientos al eje deben estar soportadas en dos puntos y el eje apoyado en la estructura; se considera el eje como una viga que se encuentra apoyado, la fuerza del agua se considera como una carga distribuida a lo largo de la longitud que está en la profundidad donde se encuentra el roto.

**Tabla 15.** Propiedades físicas y térmicas

1	Densidad ( g cm <sup>-3</sup> )	7,93
2	Punto de Fusión ( C )	1400-1455
3	Coeficiente de Expansión Térmica @20-100C ( x10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> )	18,0
4	Conductividad Térmica a 23C ( W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	16,3

**Fuente:**DIPAC PRODUCTOS DE ACERO. Eje AISI 304 Inoxidable, 2017.

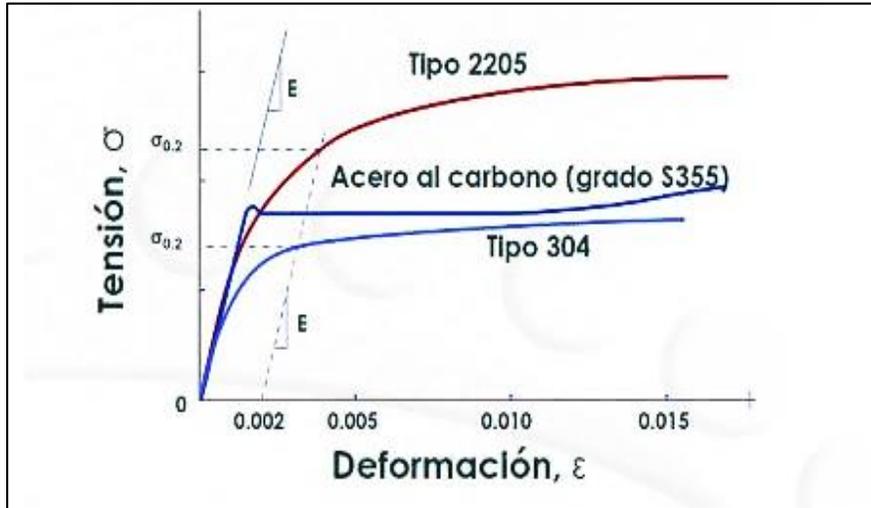
**Tabla 16.** Propiedades mecánicas

1	Alargamiento ( % )	<60
2	Dureza Brinell	160-190
3	Módulo de Elasticidad ( GPa )	190-210
4	Resistencia a la Tracción ( MPa )	460-1100
5	Elasticidad recocido / con deformación en frío	210 / 230
6	Elongación (A5 ) Min (%)	> 45
7	Resistencia mecánica (N/mm <sup>2</sup> )	520
8	Punto de fluencia (N/mm <sup>2</sup> )	220

**Fuente:**DIPAC PRODUCTOS DE ACERO. Eje AISI 304 Inoxidable, 2017.

Según la empresa DIPAC (2017) los aceros inoxidable son aleaciones de hierro con un mínimo de un 10,5% de cromo. Sus características se obtienen mediante la formación de una película adherente e invisible de óxido de cromo. La aleación 304 es un acero inoxidable de uso general con una estructura cúbica de caras centradas. Es esencialmente no magnético en estado recocido y sólo puede endurecerse en frío. Su bajo contenido en carbono otorga una mejor resistencia a la corrosión en estructuras soldadas.

**Figura 16.** Análisis esfuerzo deformación



**Fuente:**DIPAC PRODUCTOS DE ACERO. Eje AISI 304 Inoxidable, 2017.

Para la pieza del eje se utilizó acero Inoxidable AISI 304 con diámetros promedio entre 50 y 60 mm.

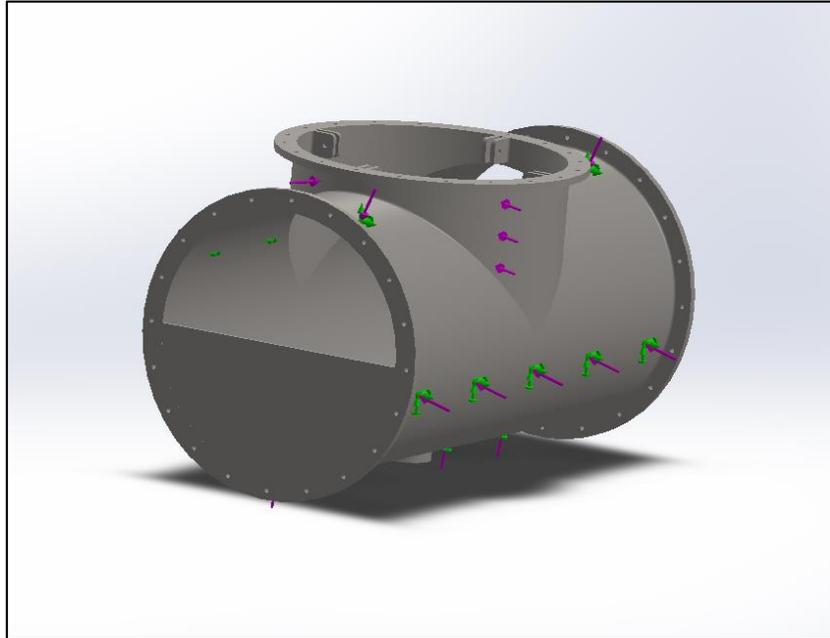
## **3.2. EVALUAREL MODELO ESTÁTICO DE LA TURBINA DE GORLOV MEDIANTE EL PROGRAMA SOLIDWORKS PARA CONOCER EL COMPORTAMIENTO DE LA PIEZA BAJO CONDICIONES DE CONTORNO PREVIAMENTE DEFINIDAS**

En el análisis operacional de una turbina tipo Gorlov, se caracteriza a partir de distintos factores operacionales, de los cuales se obtienen resultados con valores como la eficiencia, el torque, temperatura, presión, velocidad, entre otros. La simulación dada en el software SolidWorks se efectúa con el objetivo principal de calcular estos parámetros anteriormente mencionados, parámetros que intervienen en cada elemento diseñado, consolidando así la turbina Gorlov.

### **3.2.1. Análisis estático de la tubería**

Para el análisis estático se realiza el proceso de creación de un nuevo estudio. A partir de ello se aplica el tipo de material a utilizar y se seleccionan los diferentes perfiles de la pieza con el propósito de establecer las sujeciones y cargas externas del modelo. Seguidamente se refleja como resultado la creación de una malla y finalmente la teoría de Von Mises o distorsión mínima la cual indica los diferentes puntos donde el material comienza a ser flexible cuando supera el límite elástico.

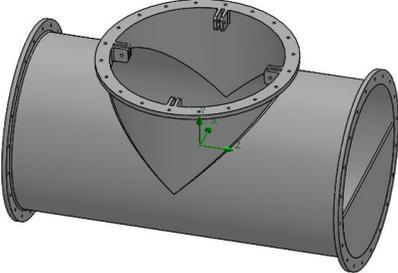
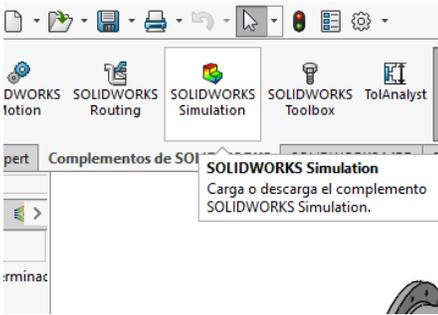
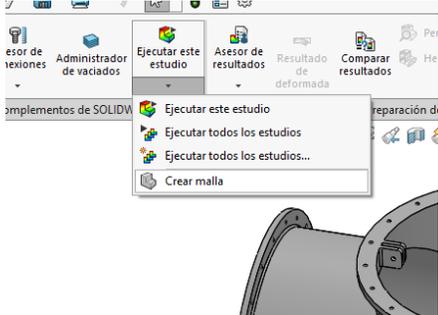
**Figura 17.**Mallado de la tubería

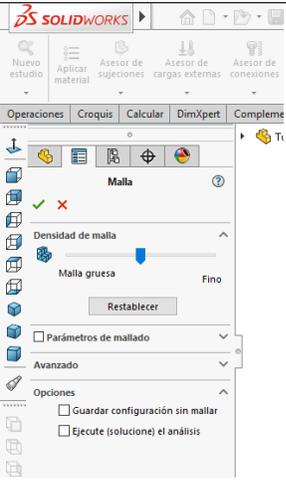


**Fuente:** Autor

Para realizar el análisis estático de la tubería, se llevó a cabo el mallado de la pieza, con el cual el programa analiza punto por punto del material, ejecutando los cálculos necesarios para su resolución. En el análisis del diseño, es fundamental el proceso de mallado, debido a que de él se obtiene la solución de variables que se ingresan al programa, y su porcentaje de error o precisión, depende de la afinidad de la malla, entre más delgada, mayor es la precisión.

A continuación, se describe como se realiza la ejecución del mallado de una pieza diseñada en el software.

items	Función	Descripción	imagen
1	Pieza	Modelado del dibujo 3D a intervenir en el estudio estático	
2	Simulación estática	Activación del complemento “simulación estática” y ejecución del inicio del estudio, mediante el cual, se ejecutan acciones pertinentes para el estudio a realizar	
3	Mallado	Luego de accionar el estudio de análisis estático, se realiza la operación de mallado, a través de la opción “crear malla” quien se encuentra la para parte superior, en la barra de operaciones, donde se selecciona y se siguen los pasos con el fin de realizar su correcto mallado	

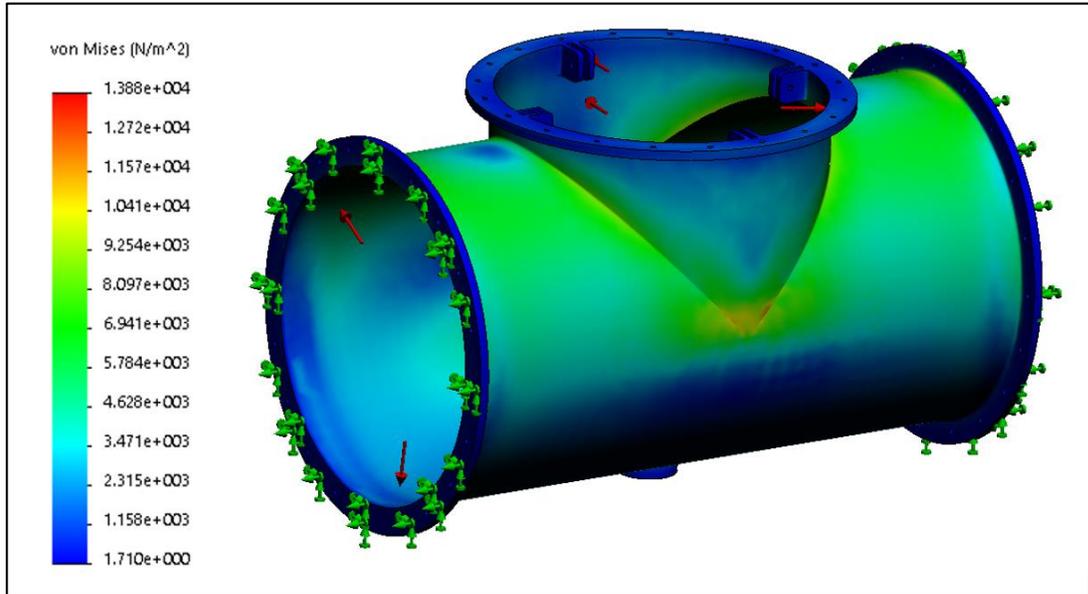
<p>4</p>	<p>Opciones de mallado</p>	<p>Una vez seleccionada la opción de crear malla, se abre una ventana, por lo general al costado izquierdo de la pantalla, donde se puede ver las opciones del tipo de mallado a realizar</p>	
----------	----------------------------	---	---

Fuente: Autor

Asimismo, se usa para determinar la geometría del objeto a simular, y el volumen del material mediante la unión de nodos que se conectan entre sí, formando elementos finitos. De esta forma se puede predecir cómo reaccionará el modelo que se simula, en base a criterios que se pueden aplicar en un entorno real.

Para la ejecución del análisis estático de la tubería se debe tener en cuenta, que el mallado se halla realizada de forma apropiada, es decir, sin errores de diseño e interferencia; posteriormente se debe seleccionar el material perteneciente al diseño establecido, luego se selecciona la opción “asesor de sujeciones” la cual, me va a determinar el punto o la cara donde va a estar el punto fijo; seguido a esto se selecciona la opción “asesor de cargas externas”, en esta se agrega la dirección de la gravedad y la carga de fuerza establecida para el diseño.

**Figura 18.** Análisis estático de la tubería



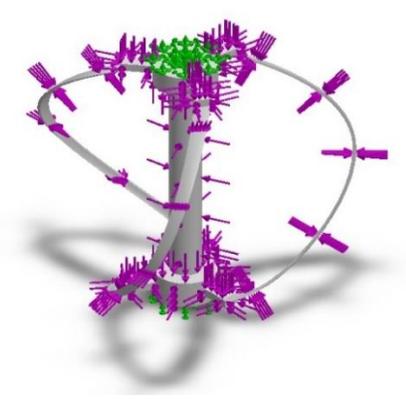
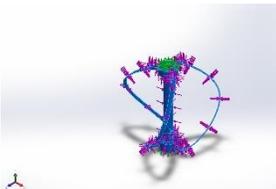
Fuente: Autor

Una vez aplicada las fuerzas en las diferentes secciones de la estructura se realiza un análisis en Solidworks. Este programa de modelado en tercera dimensión, permite predecir el comportamiento de los objetos, al ser sometidos a cargas o eventos similares en la vida real, empleando el método de elementos finitos. En la Figura 18 se muestra el resultado estático, medido a través de una paleta de colores donde el rojo representa mayores fallas que se pueden presentar en la pieza.

### 3.2.2. Análisis estático de las aspas

El proceso para el análisis estático es el mismo para cualquier diseño, no obstante, en la ejecución del análisis estático ejecutado en el diseño de las aspas, se precisan los mismos parámetros a encontrar, y para ello se debe aplicar los procedimientos, tales como los mencionados en las imágenes siguientes.

**Tabla 17.** Información de modelo

		
Sólidos		
Nombre de documento y referencia	Tratado como	Propiedades volumétricas
Sólido importado1 	Sólido	<b>Masa:3.44904 kg</b> <b>Volumen:0.00338142 m<sup>3</sup></b> <b>Densidad:1020 kg/m<sup>3</sup></b> <b>Peso:33.8006 N</b>

Fuente: Autor

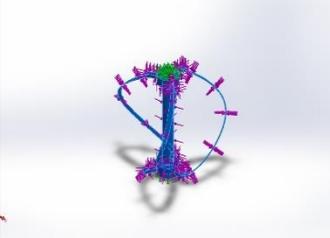
En la imagen anterior, se evidencia la cara establecida para la aplicación de la fuerza externa, si se observa, las flechas de color morado indican que en esas áreas se estará aplicando dicha fuerza y las flechas verdes establecen las zonas de sujeción de la pieza, en el cual, simulara el área fija del diseño.

**Tabla 18.** Sistema de unidades

<b>Sistema de unidades:</b>	Métrico (MKS)
<b>Longitud/Desplazamiento</b>	mm
<b>Temperatura</b>	Kelvin
<b>Velocidad angular</b>	Rad/seg
<b>Presión/Tensión</b>	N/m <sup>2</sup>

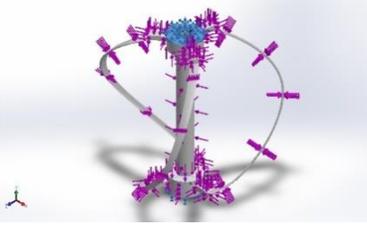
Fuente: Autor

**Tabla 19.** Propiedades del material

Referencia de modelo	Propiedades	Componentes
	<p><b>Nombre:</b> ABS</p> <p><b>Tipo de modelo:</b> Isotrópico elástico lineal</p> <p><b>Criterio de error predeterminado:</b> Desconocido</p> <p><b>Límite de tracción:</b> 3e+007 N/m<sup>2</sup></p> <p><b>Módulo elástico:</b> 2e+009 N/m<sup>2</sup></p> <p><b>Coefficiente de Poisson:</b> 0.394</p> <p><b>Densidad:</b> 1020 kg/m<sup>3</sup></p> <p><b>Módulo cortante:</b> 3.189e+008 N/m<sup>2</sup></p>	<p>Sólido 1(Sólido importado1)</p>

Fuente: Autor

**Tabla 20.**Cargasy sujeciones

Nombre de sujeción	Imagen de sujeción	Detalles de sujeción			
Fijo-1		<p><b>Entidades:</b> 2 cara(s) <b>Tipo:</b> Geometría fija</p>			
Fuerzas resultantes					
Componentes	X	Y	Z	Resultante	
Fuerza de reacción(N)	-3.8472e-005	6.00247	7.51605e-005	6.00247	
Momento de reacción(N.m)	0	0	0	0	

Nombre de carga	Cargar imagen	Detalles de carga	
Fuerza-1		<p><b>Entidades:</b> 35 cara(s) <b>Tipo:</b> Aplicar fuerza normal <b>Valor:</b> 9810 N</p>	

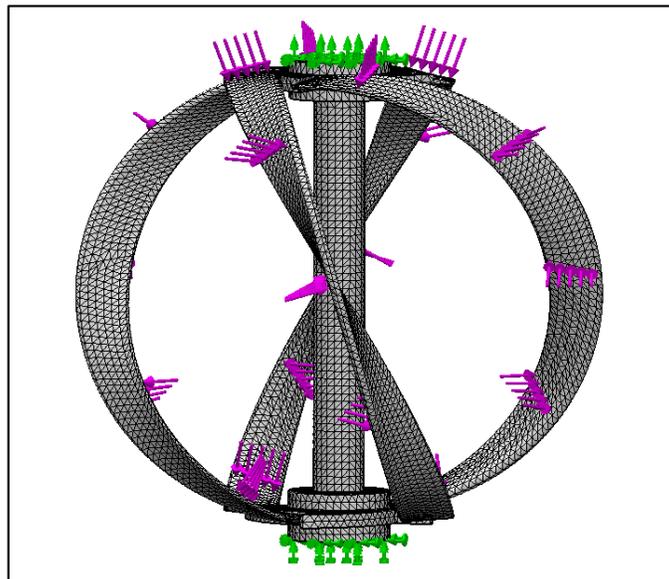
Fuente: Autor

**Tabla 21.** Información de malla

<b>Tipo de malla</b>	Malla sólida
<b>Transición automática</b>	Desactivar
<b>Incluir bucles automáticos de malla</b>	Desactivar
<b>Puntos jacobianos</b>	4 Puntos
<b>Tamaño de elementos</b>	15.4688 mm
<b>Tolerancia</b>	0.773442 mm
<b>Calidad de malla</b>	Elementos cuadráticos de alto orden

**Tabla 22.** Información de malla - Detalles

<b>Número total de nodos</b>	20372
<b>Número total de elementos</b>	10463
<b>Cociente máximo de aspecto</b>	141.89
<b>% de elementos cuyo cociente de aspecto es &lt; 3</b>	81.3
<b>% de elementos cuyo cociente de aspecto es &gt; 10</b>	0.984
<b>Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss):</b>	00:00:03



Fuente: Autor

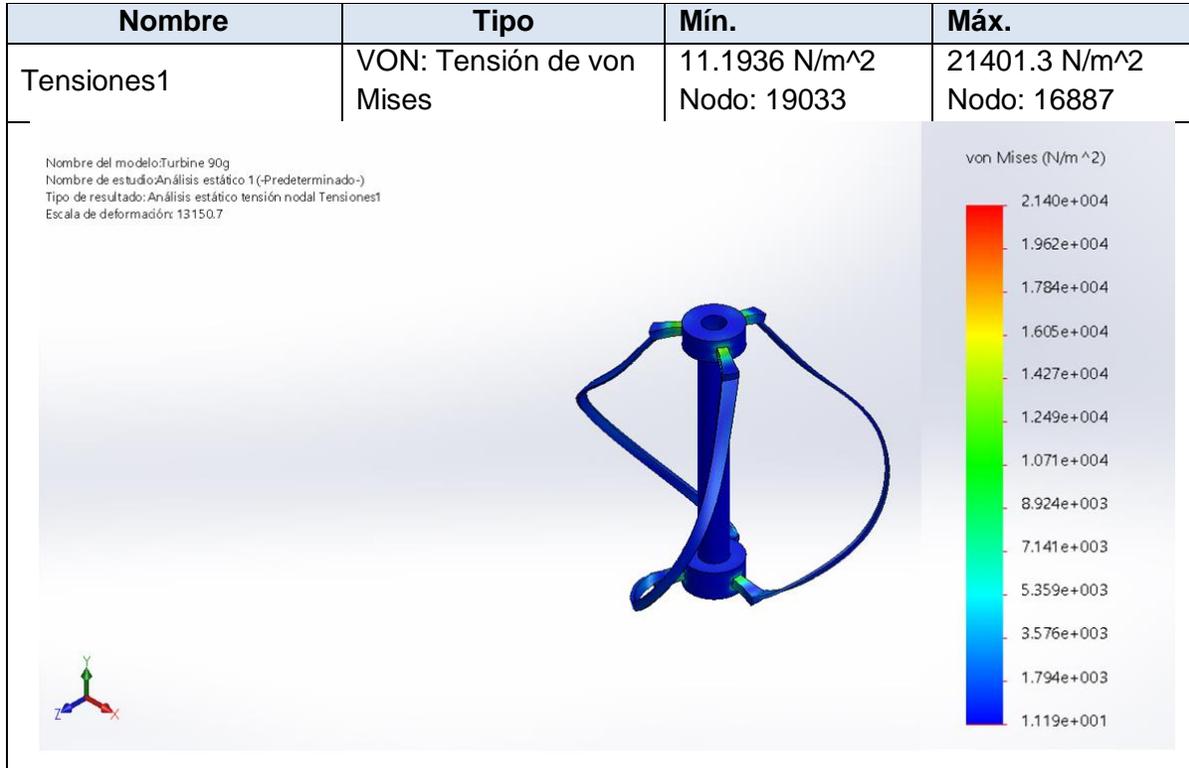
En la Tabla 21 se evidencia la operación de mallado aplicada a las aspas de la turbina, esto se realiza para poder efectuar el método analítico que se implementa en el estudio de la pieza y de esta manera encontrar los resultados obtenidos. Para la correcta aplicación del estudio, se realiza la aplicación de sujeciones y fuerzas en la pieza, con el fin de evidenciar las partes neurálgicas de este y cuál es el máximo permisible.

- **Fuerzas de reacción**

Conjunto de selecciones	Unidad	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultante
Todo el modelo	N	-3.8472e-005	6.00247	7.51605e-005	6.00247

Fuente: Autor

**Tabla 23.** Análisis Tensión de Von Mises



Fuente: Autor

Se procede a efectuar un análisis de tensión Von Mises como se ilustra en la Tabla 23, en el que se representan las fuerzas y sujeciones aplicadas a los alabes, de igual forma se logra observar el rango de concentración de esfuerzo máximo y mínimo. Con base a los datos adquiridos se evalúan los elementos de apoyo, resistencia y comportamiento que toma cada sección de la pieza al ser expuesta a constantes variaciones de esfuerzos con el objetivo de analizar los efectos que generan al ser expuestos a diferentes esfuerzos. El análisis arrojado permite conocer que la mínima tensión se va a presentar en el nodo 19033 con un valor de 11.1936 N/m<sup>2</sup>. Mientras que en el nodo 16887 se va a sufrir una tensión máxima de 21401.3 N/m<sup>2</sup>.

**Tabla 24.** Desplazamientos resultantes y deformación unitaria

Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Desplazamientos1	URES:Desplazamientos resultantes	0 mm Nodo: 1	0.0062792 mm Nodo: 1214
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 60%;"> <p>Nombre del modelo:Turbine 90g Nombre de estudio:Análisis estático 1 (-Predeterminado-) Tipo de resultado: Desplazamiento estático Desplazamientos1 Escala de deformación: 13150.7</p> </div> <div style="width: 35%;"> <p>URES (mm)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>6.279e-003</li> <li>5.756e-003</li> <li>5.233e-003</li> <li>4.709e-003</li> <li>4.186e-003</li> <li>3.663e-003</li> <li>3.140e-003</li> <li>2.616e-003</li> <li>2.093e-003</li> <li>1.570e-003</li> <li>1.047e-003</li> <li>5.233e-004</li> <li>1.000e-030</li> </ul> </div> </div>			
Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Deformaciones unitarias1	ESTRN: Deformación unitaria equivalente	5.97467e-009 Elemento: 5762	6.41143e-006 Elemento: 1128
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 60%;"> <p>Nombre del modelo:Turbine 90g Nombre de estudio:Análisis estático 1 (-Predeterminado-) Tipo de resultado: Deformación unitaria estática Deformaciones unitarias1 Escala de deformación: 13150.7</p> </div> <div style="width: 35%;"> <p>ESTRN</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>6.411e-006</li> <li>5.878e-006</li> <li>5.344e-006</li> <li>4.810e-006</li> <li>4.276e-006</li> <li>3.742e-006</li> <li>3.209e-006</li> <li>2.675e-006</li> <li>2.141e-006</li> <li>1.607e-006</li> <li>1.074e-006</li> <li>5.398e-007</li> <li>5.975e-009</li> </ul> </div> </div>			

Fuente: Autor

En la información se representa una paleta de colores que caracteriza los diferentes valores de deformación y desplazamiento que toma la pieza al recibir una fuerza de 9810 N. Los datos arrojados permiten conocer que el desplazamiento máximo sufrido por los alabes es en el nodo 1214 con una resultante de 0.0062792 mm. Mientras que ante el incremento de la fuerza la deformación unitaria podía presentarse en un nivel mínimo de  $5.97467e-009$  y un máximo de  $6.41143e-006$ .

### **3.3. ANALIZAR MEDIANTE FLOW SIMULATION EL MODELO DINÁMICO DE LA TURBINA DE GORLOV PARA DETERMINAR LA EFICIENCIA DEL SISTEMA.**

La simulación dinámica contribuye una relación al desempeño nominal de la turbina Gorlov ya que se indica un volumen de control cilíndrico que abarca la estructura, reflejando una velocidad angular al dominio con el propósito de producir un contacto rotatorio con la geometría de los álabes y establecer valores de torque dinámico (Pico, 2018). Con la finalidad de mejorar los valores derivados de la simulación se establecen datos de rugosidad en el material, ofreciendo así una idea general de las pérdidas de energía dadas por la fricción de los álabes con el fluido.

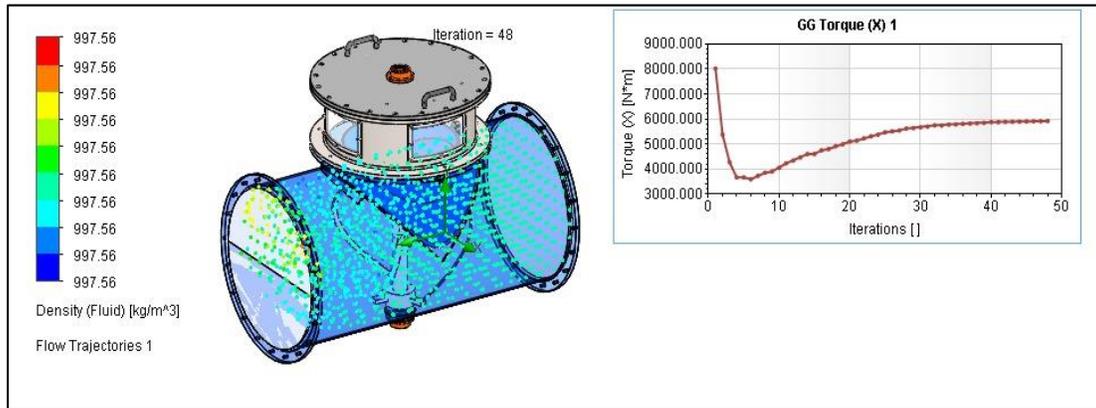
#### **3.3.1. Resultados de la simulación**

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de la simulación mediante el complemento Flow simulación, el cual, consta de valores resultantes de las variables de diseño empleadas en la pieza completa llamada “turbina Gorlov”.

Teniendo en cuenta el método constructivo de las piezas para la creación de dicha turbina, el software recopila esa información en conjunto con parámetros como lo son el fluido que intervendrá, la gravedad del sistema, la presión atmosférica,

temperatura entre otros, estos parámetros serán fundamentales para la obtención de resultados de simulación reales, dentro de los cuales se encuentran las distintas imágenes con cada uno de los criterios de estudio esperados.

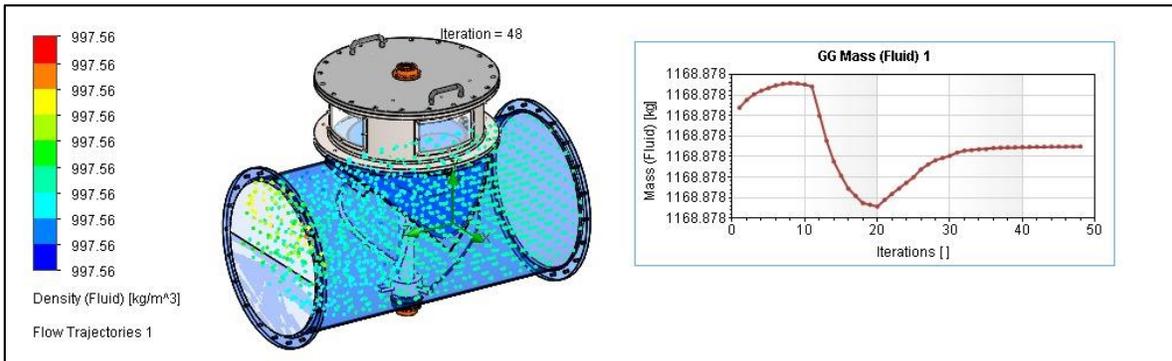
**Figura 19.** Densidad del fluido relación de torque



Fuente: Autor

En la imagen anterior, se observa dos tablas que relacionan distintos resultados, para este caso, se presenta una tabla de colores la cual representa la densidad del fluido, esta tabla va ligada a la simulación vista en la tubería y el comportamiento de este; se encuentra también una tabla donde se grafica el valor del torque que se genera en esta turbina mostrando la variación en cada interacción realizada por el software.

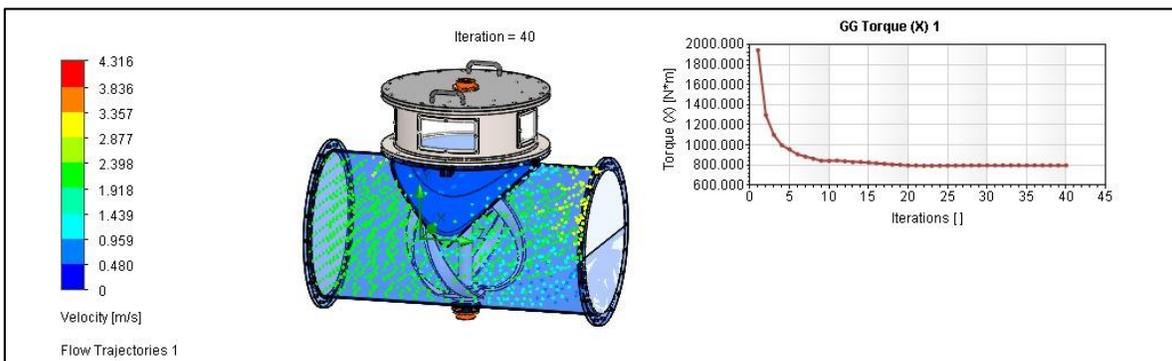
**Figura 20.** Densidad del fluido relación de masa



Fuente: Autor

La ilustración anteriormente presentada, nos muestra la relación entre la densidad del fluido y la masa del fluido, para esto se presenta la tabla de colores discriminando el valor de la densidad, a su vez, se muestra la gráfica de variación de la masa del fluido presentada en cada interacción registrada por el software, dejando ver el comportamiento de este fluido.

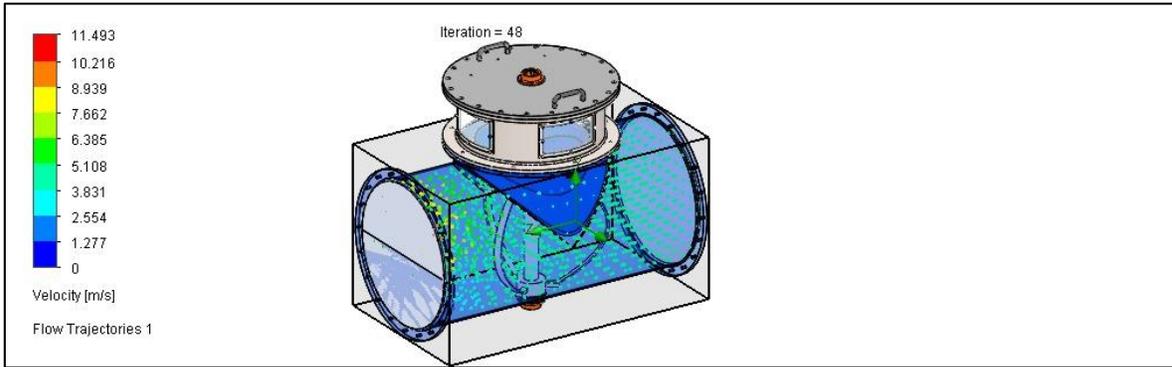
Figura 21. Velocidad relación de torque



Fuente: Autor

Se puede evidenciar en la imagen anterior, la variación de velocidad y torque, esta se registra mostrando los resultados de cada uno, donde en la velocidad se presenta por medio de la tabla de colores a la par con la simulación en la tubería, se muestra también la gráfica del torque generado en cada interacción con respecto a la velocidad del fluido.

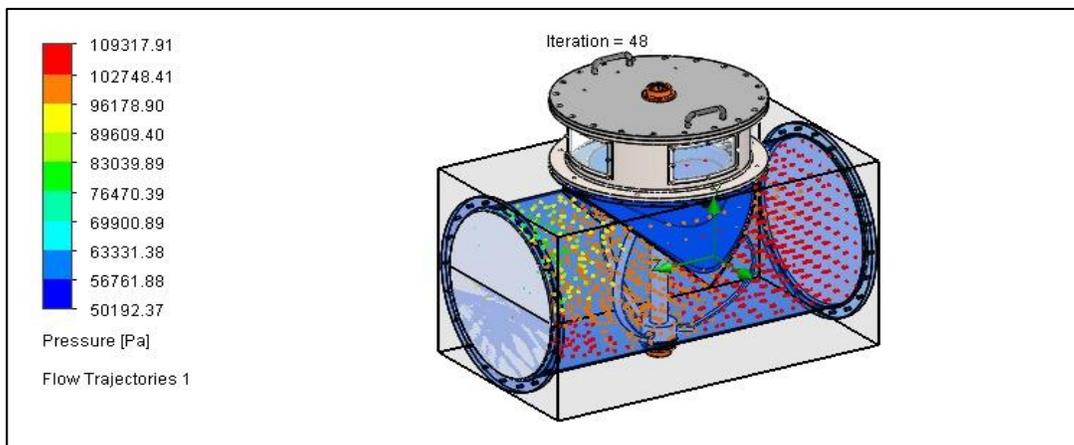
**Figura 22.** Velocidad a 48 interacciones



Fuente: Autor

La ilustración anterior nos presenta la simulación de la turbina Gorlov, en esta se observa la dinámica del fluido mostrando el valor resultante de la velocidad, en esta turbina, el software hace la relación a las interacciones ejecutadas para hallar el resultado mostrado en la gráfica.

**Figura 23.** Presión

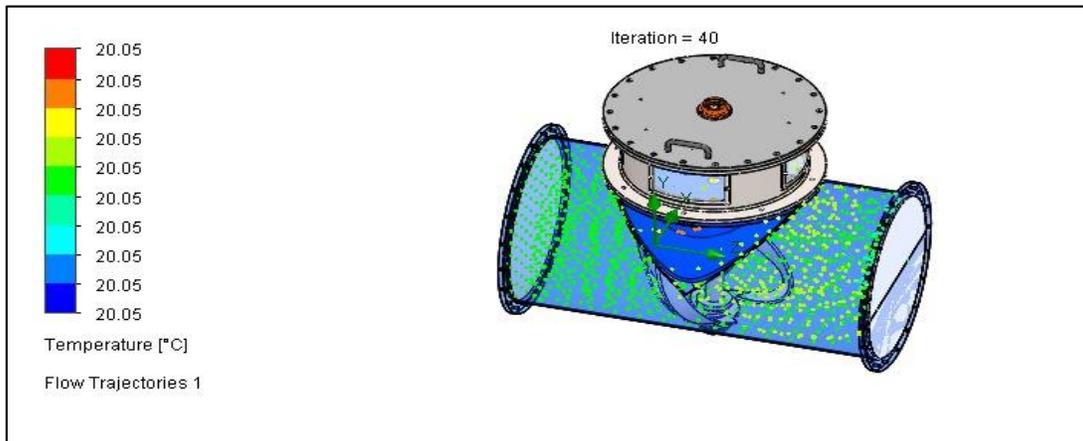


Fuente: Autor

En la simulación de la turbina Gorlov, se hace relevante cada resultado arrojado por el software, dentro de estos se encuentra la presión del fluido al pasar por esta turbina, esto genera una variación en los valores aportados, debido a las interacciones generadas y en cada sección donde el programa toma el fluido.

Como se observa en la ilustración anterior, para la variación de la presión en el sistema, se denota un rango de presión entre 50192 Pa y 109317 Pa, entendiendo así, que estos serian los resultados de acuerdo a la simulación presentada la cual se grafica por medio de puntos dentro de la tubería.

**Figura 24.** Temperatura del fluido



**Fuente:** Autor

En la anterior gráfica, se muestra la turbina gorlov con la simulación realizada, obteniendo valores de temperatura del sistema en ese instante, dejando ver, que para este parámetro se mantiene una temperatura constante en el momento que el fluido transcurre por la tubería de la turbina. Como en los anteriores resultados este valor de temperatura se demuestra en la tabla de colores, donde se maneja un solo dato en cada punto, este valor es el resultado que arroja el software luego de la ejecución en la simulación.

**Sistema de unidad SI (m – Kg – s)**

**Fluido Agua**

- Dimensiones**

<b>X min</b>	-0.456 m
<b>X max</b>	0.437 m
<b>Y min</b>	-0.386 m
<b>Y max</b>	0.502 m
<b>Z min</b>	-0.510 m
<b>Z max</b>	1.030 m

Fuente: Informe Solidworks Fluid Simulation

- Dimensiones básicas de malla**

<b>Number of cells in X</b>	6
<b>Number of cells in Y</b>	6
<b>Number of cells in Z</b>	10

Fuente: Informe Solidworks Fluid Simulation

- Condiciones iniciales**

**Tabla 25.**Condiciones ambientales

<b>Parámetros termodinámicos</b>	Presión estática: 101325.00 Pa Temperatura: 20.05 °C
<b>Parámetros de velocidad</b>	Velocidad vector Velocidad in X dirección: 0 m/s Velocidad in Y dirección: 0 m/s Velocidad in Z dirección: 0 m/s

Fuente: Informe Solidworks Fluid Simulation

- **Condiciones de borde**

**Tabla 26.** Volumen de entrada flujo

<b>Tipo</b>	Inlet Volume Flow
<b>Fases</b>	Pieza2^Gorlov-1/Saliente- Extruir1//Face
<b>Parámetros de flujo</b>	Dirección de vectores de flujo: Normal Caudal volumétrico: 2.0000 m <sup>3</sup> /s Relativo al marco giratorio: No
<b>Parámetros termodinámicos</b>	Temperatura: 20.05 °C

Fuente: Informe Solidworks Fluid Simulation

**Tabla 27.** Presión total

<b>Tipo</b>	Total presión
<b>Fases</b>	Pieza3^Gorlov-1/Saliente- Extruir1//Face
<b>Sistema coordinado</b>	Sistema de coordenadas faciales
<b>Eje de referencia</b>	X
<b>Parámetros termodinámicos</b>	Total Presión: 101325.00 Pa Temperatura inicial: 20.05 °C

Fuente: Informe Solidworks Fluid Simulation

• **Resultados**

Nombre	Unid	Valor	Criterio	Delta
GG Av Total Presión 1	Pa	107418.9	3057.7773	343.317267
GG Av Temperatura (Fluid) 1	°C	20.05	0.00015178	0.00011305
GG Masa (Fluid) 1	kg	1000	11.6887807	3.3620224e-05
GG Av Velocidad 1	m/s	2.10	0.06269891	0.01314839
GG Fuerza 1	N	7583.83	490.417376	323.465625
GG Torque (X) 1	N*m	3720	343.692948	299.961782
Eficiencia	%	34	0.92845	0.94547

Fuente: Informe Solidworks Fluid Simulation

• **Análisis máximo y mínimo de variables simuladas**

Nombre	Mínimo	Máximo
Densidad del fluido [kg/m <sup>3</sup> ]	997.56	997.56
Presión [Pa]	50192.37	109317.91
Temperatura [°C]	20.04	20.05
Temperatura del fluido [°C]	20.04	20.05
Velocidad [m/s]	0	11.493
Velocidad (X) [m/s]	-2.052	2.913
Velocidad (Y) [m/s]	-1.659	7.101

Nombre	Mínimo	Máximo
Velocidad (Z) [m/s]	-0.575	11.065
Velocidad RRF [m/s]	0	11.493
Velocidad RRF (X) [m/s]	-2.052	2.913
Velocidad RRF (Y) [m/s]	-1.659	7.101
Velocidad RRF (Z) [m/s]	-0.575	11.065
Vortice [1/s]	0	463.51
Presión relativa [Pa]	-51132.63	7992.91
Esfuerzo cortante [Pa]	0	195.85
Número de cuello de botella	0	1.0000000
Coefficiente de transferencia de calor [W/m <sup>2</sup> /K]	0	0
Número de atajo	0	1.0000000
Flujo de calor superficial [W/m <sup>2</sup> ]	-0	-0
Flujo de calor superficial (Convective) [W/m <sup>2</sup> ]	-1.365e+10	5.450e+09
Potencia acústica [W/m <sup>3</sup> ]	8.025e-173	1.257e-12
Nivel de potencia acústica [dB]	0	0.99

Fuente: Informe Solidworks Fluid Simulation

### **3.4 REALIZAR UN ANÁLISIS TÉCNICO ECONÓMICO DEL SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA PARA LA PTAR SAN SILVESTRE**

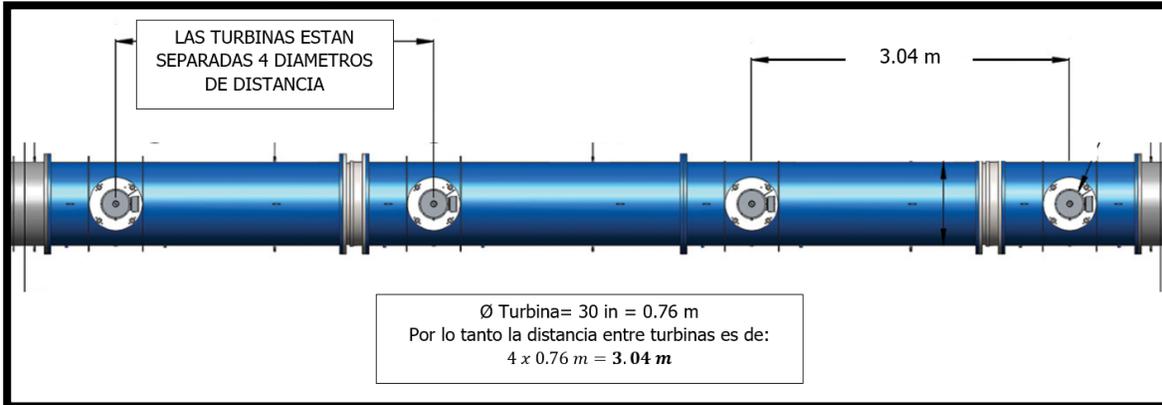
Las agencias de agua hoy enfrentan desafíos financieros cada vez mayores. El alto costo de la energía, junto con los mandatos de eficiencia energética y la necesidad de reparar o reemplazar la infraestructura antigua, requieren soluciones creativas para mantener las operaciones sostenibles(LucidEnergy, 2014).

Al usar sus tuberías de agua para generar energía renovable a partir de una fuente de energía sin explotar, el sistema de energía producida a través de una turbina Gorlov puede ser parte de la solución. Las reparaciones e instalaciones de tuberías brindan oportunidades para implementar el sistema a gran escala, produciendo megavatios de energía renovable que pueda ser utilizada como apoyo a la generación eléctrica para la alimentación en la planta de tratamiento de aguas residuales del municipio de Barrancabermeja.

El objetivo abarca el desarrollo de un estudio técnico económico a partir de la implementación de una turbina tipo Gorlov como herramienta a la generación de energía eléctrica. Esta etapa contempla la identificación de los equipos de control e inversión económica requerida para el suministro e instalación del sistema, entre otras, dicho estudio de evaluación financiera busca determinar la viabilidad técnica de la elaboración del proyecto a ejecutar.

Como primer capítulo se establece un estudio técnico caracterizado por la descripción del sistema, cuánto va a generar, frecuencia, nivel de tensión, distancia entre varias turbinas, equipos de interconexión, tableros, equipos de medida, entre otros.

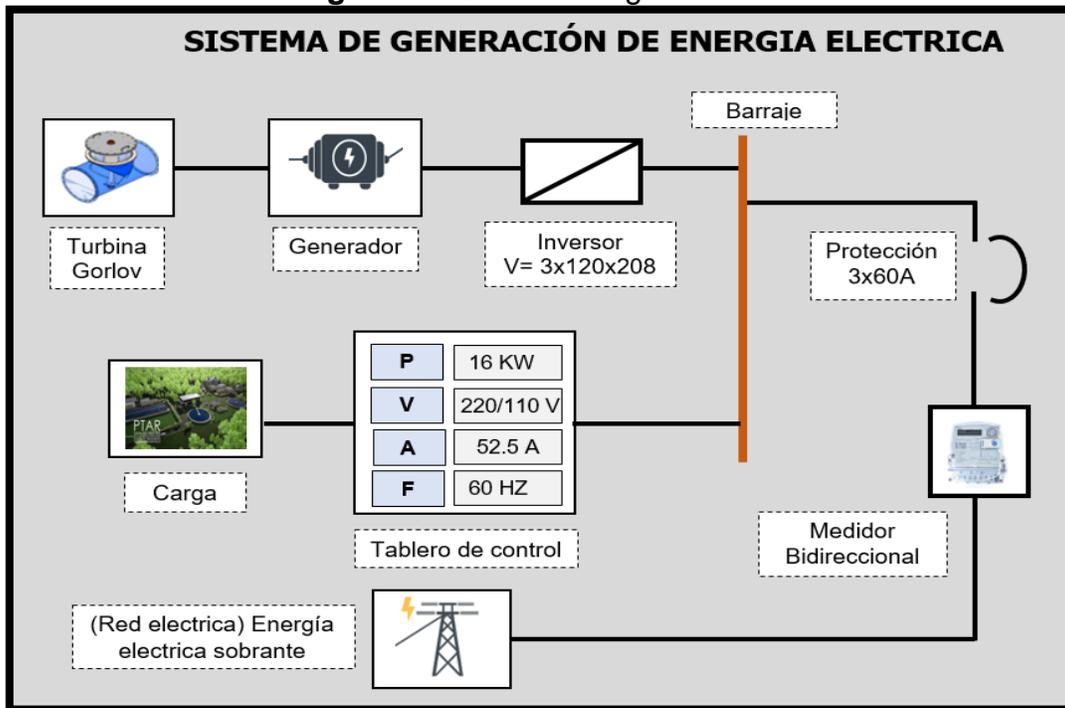
**Figura 25.** Distancia entre turbinas Gorlov



Fuente:LucidEnergy. Huella de instalación de cuatro turbinas para tubería.

La empresa LucidEnergy (2014) señala que las turbinas se colocan en serie con cuatro diámetros de diferencia para obtener el máximo potencial de energía con el fin de obtener una generación del doble de potencia de salida por turbina.

**Figura 26.** Sistema de generación

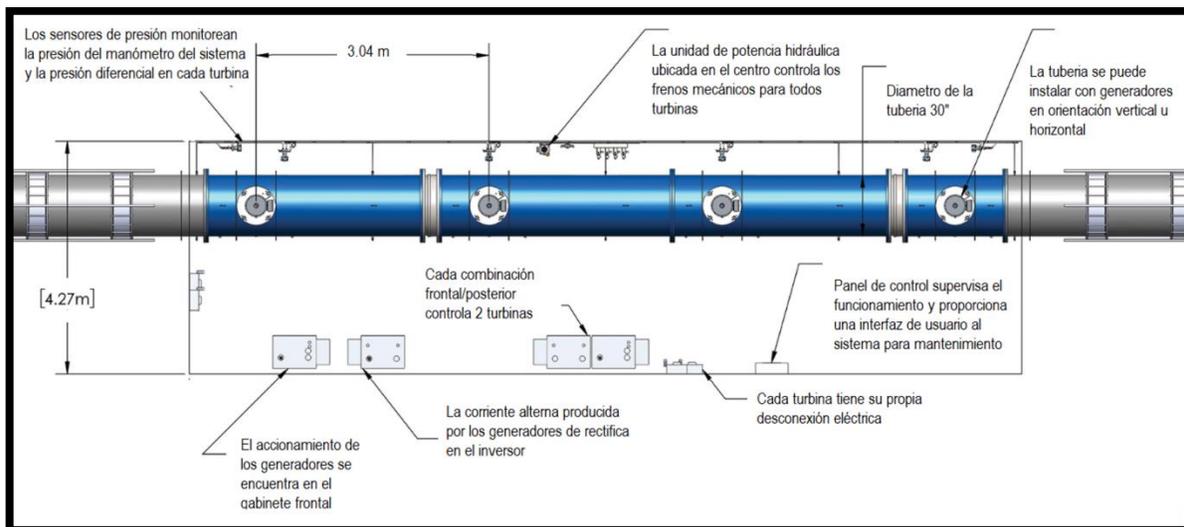


Fuente: Autor

En la turbina la energía potencial del agua que fluye a través de la tubería se transforma en energía mecánica de rotación la cual se encarga de mover las aspas y transmitir ese movimiento al generador (Ver ficha técnica anexo 8) produciendo así la energía eléctrica la cual es distribuida mediante un barraje a una carga con cobertura para tomas, iluminarias, ventiladores, computadores, pantallas de control, entre otras. El calibre del conductor puede ser 3x16+6 en la acometida.

Por otra parte, se plantea un caso hipotético donde se presente un sobrante de energía la cual sería conectada a la red eléctrica; se instala un sistema de protección 3x60 A y un medidor bidireccional el cual funciona en dos direcciones, es decir que no solo mide la energía que fluye de la red al usuario, sino también la que fluye del usuario a la red, haciendo posible con esto último, la venta de excedentes de energía a la red eléctrica convencional.

**Figura 27. Diagrama sistema de control**



**Fuente:**LucidEnergy. Huella de instalación de cuatro turbinas para tubería.

Teniendo en cuenta que la potencia generada es de 16 KW se describe a continuación un cuadro para posibles cargas de alimentación eléctrica.

**Tabla 28.** Cuadro de cargas

ITEM	DESCRIPCIÓN	POTENCIA UNIDAD	CANT	POTENCIA TOTAL
1	Televisor	115 W	2	235 W
2	Computador	305 W	4	1.22 KW
3	Nevera	85 W	1	85 W
4	Bombillos	120 W	5	600 W
5	Ventilador	250 W	6	1.5 KW
6	Toma corriente	180 W	8	1.4 KW
7	Aire acondicionado	3 KW	3	9 KW
8	Dispensador	120 W	1	120 W
9	Reflectores	400 W	2	800 W
10	Timbre	30 W	2	60 W
11	Portóneléctrico	500 W	1	500 W
<b>TOTAL</b>				<b>15.5 KW</b>

Fuente: Autor

### Costos de construcción e instalación.

Los artículos detallados son los componentes para la construcción del sistema de generación, las cantidades, los precios unitarios, parciales y el valor total. Cada uno de los costos suministrados en la tabla de información, es con base al proceso de investigación y desarrollo del proyecto realizado a cotizaciones que son prestos en las ventas de cada uno de los artículos (En el precio total se incluyeron la mano de obra).

**Tabla 29.** Suministro de materiales

<b>COSTO DE CONSTRUCCIÓN</b>				
<b>ITEMS</b>	<b>Descripción</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Valor unitario</b>	<b>Valor total</b>
1	Eje principal	1	\$ 1.000.000	\$ 1.000.000
2	Alabes	3	\$ 8.000.000	\$ 24.000.000
3	Base de sujeción superior e inferior	2	\$ 1.200.000	\$ 2.400.000
5	Generador eléctrico	1	\$ 7.350.000	\$ 7.350.000
6	Accesorios eléctricos (Cable, conectores, amarres, tornillería, entre otros)	Global	\$ 800.000	\$ 800.000
7	Material misceláneo	1	\$ 680.000	\$ 680.000
8	Estructura metalica	1	\$ 2.720.000	\$ 2.720.000
9	Turbina Gorlov	1	\$ 14.000.000	\$ 14.000.000
10	Caja de conexiones	1	\$ 700.000	\$ 700.000
<b>TOTAL</b>				<b>\$ 53.650.000</b>

Fuente: Revisión de cotizaciones

**Tabla 30.** Suministro de materiales cuarto de control

<b>COSTO DE CONSTRUCCIÓN</b>				
<b>ITEMS</b>	<b>Descripción</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Valor unitario</b>	<b>Valor total</b>
1	Fuente 220AC a 24 VDC	2	\$ 390.000	\$ 780.000
2	Medidor de presión	2	\$ 1.200.000	\$ 2.400.000
3	Medidor de flujo	1	\$ 1.950.000	\$ 1.950.000
4	Inversor de corriente	1	\$ 2.800.000	\$ 2.800.000
5	Medidor bidireccional	1	\$ 790.000	\$ 790.000
6	Pantalla touch 17"	1	\$ 5.200.000	\$ 5.200.000
7	Caja armario 1.70 m x 0.50 m	1	\$ 1.700.000	\$ 1.700.000
8	Analizador de redes PACC 3200	1	\$ 2.400.000	\$ 2.400.000
9	Pilotos testigos	1	\$ 55.000	\$ 55.000
10	Selector manual-automático	2	\$ 97.000	\$ 194.000
<b>TOTAL</b>				<b>\$ 18.269.000</b>

Fuente: Revisión de cotizaciones

Personal de adecuación e instalación: Este rubro es destinado a las adecuaciones del lugar puesto que para la instalación de los equipos y el sistema como tal se necesitan espacios internos sobre suelo. Además, este personal se encarga de los acabados, puesta en marcha, etc.

- Ingeniero mecánico: Este cargo sobrelleva toda la responsabilidad de instalación, ejecución y puesta en marcha del proyecto, se encarga desde el diseño modular, el seguimiento de planos, establecimientos de planes de trabajo, etc.
- Ayudantes electromecánicos: Los ayudantes de la parte eléctrica y mecánica, suplen todas las funciones de instalaciones operativas y rudimentarias concernientes a la parte eléctrica y mecánica del sistema, están bajo las indicaciones del ingeniero mecánico.
- Transporte: Este rubro es destinado a todas las operaciones de movimientos de tierra (en el caso de las excavaciones), transporte de personal, maquinaria y equipos. Es importante contar con un rubro amplio pues las condiciones meteorológicas, geográficas, sociales y económicas son variables en países en desarrollo.

**Tabla 31.** Ingeniería e instalación

RUBRO	CANTIDAD	VLR HORA	HRS	TOTAL
Ingeniero mecánico	1	90.000,00	40	\$ 3.600.000,00
Ayudantes	2	30.000,00	40	\$ 2.400.000,00
Oficiales de obra	3	35.000,00	20	\$ 2.100.000,00
<b>TOTAL</b>	<b>6</b>			<b>\$ 8.100.000,00</b>

**Fuente:** Autor

**Tabla 32.**Total, de inversión

ITEMS	DESCRIPCIÓN	TOTAL
1	Ingeniería e instalación	\$ 8.100.000
2	Suministro de materiales	\$ 71.919.000
<b>TOTAL</b>		<b>\$ 80.019.000</b>

**Fuente:** Autor

La construcción y ensamblaje de la turbina tipo Gorlov en la tubería de descargue de la PTAR Barrancabermeja, Santander tiene un costo promedio de \$ 80.019.000Sin embargo, el valor mencionado puede variar con relación a los costos de la estructura de soporte y el personal logístico para la instalación del sistema.

### 3.4.1. Análisis de Factibilidad Financiera

De acuerdo con la fórmula del costo unitario del kWh del recibo de la energía eléctrica, se puede empezar un análisis para hallar el costo unitario de la energía producida. En primero instancia, lo que se muestra el cobro de la energía eléctrica es un valor de venta que se hace al usuario del servicio, sin embargo, esta fórmula sirve para determinar los componentes que intervienen en el proceso para extraer lo que realmente ocupa el sistema.

La fórmula del Costo Unitario de Prestación del Servicio, CU, (Fórmula 1) permite agregar los componentes de costos de la prestación del servicio público domiciliario de energía eléctrica. Así las cosas, las fórmulas aportadas para estos estudios se utilizan para el cálculo del valor de la energía eléctrica generada por el sistema. A través de fórmulas tarifarias particulares definidos por la Comisión se determinan los costos asociados con la transmisión, la distribución y la comercialización, y a través de mecanismos de mercado se definen los costos de compra de energía. (Grosso & Mejía, 2014)

$$CUv_{n,m} = G_m + T_m + D_{n,m} + Cv_m + PR_{n,m} + R_m(1)$$

Donde:

n: Nivel de tensión de conexión del usuario.

m: Es el mes para el cual se calcula el costo unitario de Prestación del servicio.

CUv: Componente variable del costo unitario de prestación del n, m servicio (\$/KWh) para los usuarios conectados al nivel de tensión n, correspondiente al mes m.

G: Costo de compra de energía o generación (\$/kWh) para el mes m

Rm: Costo por restricciones para el mes m

Tm: Costo por uso del Sistema Nacional de Transmisión para el mes m

$D_n$ , m: Costo por uso de Sistemas de Distribución correspondiente al nivel de tensión n para el mes m.

$C_{vm}$ : Margen de comercialización que incluye costos variables de la actividad de comercialización al mes m

$PR_n$ , m: costo de compra, transporte y reducción de pérdidas de energía acumuladas hasta el nivel de tensión n para el mes m

Como ya se mencionó, algunos de estos factores equivalen a cero dentro del sistema, porque no se utilizan, o su costo es muy bajo. De esta manera, solo se tendría que asumir el costo de generación de energía, que dependerá de la cantidad de energía que se produce sobre el costo para obtenerla.

Por lo cual la fórmula 1 queda reducida a:

$$CUv_{n,m} = G_m$$

Entonces, teniendo en cuenta que queda reducida a una simple ecuación, se procede a hallar los costes sobre el cual se dividiría la cantidad de KWh producido para realizar una aproximación del costo de venta de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$CV = (\text{Costo de producción})/(\text{cantidad producida})$$

De allí, para determinar la viabilidad financiera del sistema se hallan los costos de funcionamiento fijo y variable, que para la producción de un servicio o bien, se asocian a costos OPEX y CAPEX.

OPEX: Cotos operacionales que incluirían las actividades rutinarias que permiten y facilitan la operación, además de garantizar la confiabilidad de los equipos de generación eléctrica.

CAPEX: Son los costos de inversión que siguen dentro de otras cosas, los equipos, recursos humanos, ampliaciones de terrenos, modificaciones, estructuras, etc.

**Tabla 33. Costos operacionales**

<b>OPEX</b>			
<b>FIJOS</b>			
<b>Mantenimientos</b>	<b>Partes</b>	<b>Periodicidad*</b>	<b>Valor</b>
Mtto turbina	Eje principal Cuerpo del rotor Coronas giratorias carcasa Alabes	2 veces al año	\$3'400.000
Mtto generador	Correas y elementos auxiliares sistema de refrigeración	1 vez al año	\$1'000.0000
Mtto eléctrico asociados	Fuente, medidores, inversor, medidor etc.	1 vez al año	\$2'000.000
Mtto misceláneo	Accesorios eléctricos (Cable, conectores, amarres, tornillería, entre otros)	Cada 2 años	\$1'600.000
<b>TOTAL ANUAL</b>			<b>\$7'200.000</b>

Fuente: Autor

El sistema no tiene costos variables adicionales, pues su operación depende de la entrada directa de agua a la PTAR.

**Tabla 34. Costos de inversión**

<b>CAPEX</b>			
<b>Descripción</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Valor unitario</b>	<b>Valor</b>
Eje principal	1	\$ 1.000.000	\$2'400.000
Alabes	3	\$ 8.000.000	\$1'000.0000
Base de sujeción superior e inferior	2	\$ 1.200.000	\$600.000
Estructura metálica	1	\$ 2.720.000	\$ 2.720.000
Turbina Gorlov	1	\$ 14.000.000	\$ 14.000.000
Caja de conexiones	1	\$ 700.000	\$ 700.0000
<b>TOTAL</b>			<b>\$ 47.280.000</b>

Fuente: Autor

**Tabla 35. Otros costos de inversión asociados**

<b>COSTO DE CONSTRUCCIÓN</b>				
<b>ITEMS</b>	<b>Descripción</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Valor unitario</b>	<b>Valor total</b>
1	Fuente 220AC a 24 VDC	2	\$ 390.000	\$ 780.000
2	Medidor de presión	2	\$ 1.200.000	\$ 2.400.000
3	Medidor de flujo	1	\$ 1.950.000	\$ 1.950.000
4	Inversor de corriente	1	\$ 2.800.000	\$ 2.800.000
5	Medidor bidireccional	1	\$ 790.000	\$ 790.000
6	Pantalla touch 17"	1	\$ 5.200.000	\$ 5.200.000
7	Caja armario 1.70 m x 0.50 m	1	\$ 1.700.000	\$ 1.700.000
8	Analizador de redes PACC 3200	1	\$ 2.400.000	\$ 2.400.000
9	Pilotos testigos	1	\$ 55.000	\$ 55.000
10	Selector manual-automático	2	\$ 97.000	\$ 194.000
<b>TOTAL</b>				<b>\$ 18.269.000</b>

Fuente: Autor

**Tabla 36.** Costos de inversión mano de obra.

RUBRO	CANTIDAD	VLR HORA	HRS	TOTAL
Ingeniero mecánico	1	90.000,00	40	\$ 3.600.000,00
Ayudantes	2	30.000,00	40	\$ 2.400.000,00
Oficiales de obra	3	35.000,00	20	\$ 2.100.000,00
<b>TOTAL</b>	<b>6</b>			<b>\$ 8.019.000,00</b>

Fuente: Autor

La construcción y ensamblaje de la turbina tipo Gorlov en la tubería de descargue de la PTAR Barrancabermeja, Santander tiene un costo promedio de 80.019.000. Sin embargo, el valor mencionado puede variar con relación a los costos de la estructura de soporte y el personal logístico para la instalación del sistema y operatividad del mismo.

**Tabla 37.** Costo inicial y factores de operación

INVERSIÓN INICIAL	\$80.019.000
Mantenimiento anual	9,7 %
Aumento anual del Mtto	3 %

Fuente: Autor

En la tabla anterior se detalla los rubros involucrados para la puesta en marcha del sistema en la cual se tendrán los procesos de diseño, montaje y adquisición e instalación de toda la infraestructura necesaria para operar correctamente y su mantenimiento anual.

### Evaluación bajo las premisas financieras.

Los ingresos del sistema de generación de energía eléctrica basado en la turbina de Gorlov para la planta de tratamiento de aguas residuales de san silvestre en el municipio de Barrancabermeja se establecen de acuerdo al aprovechamiento que se dará en la PTAR; el análisis de su costo de inversión comparado con el valor de comprar la energía eléctrica a una entidad externa permitirá concluir su factibilidad financiera como complemento del anterior análisis técnico.

Proyección de la demanda de energía en la PTAR. Para esto, como se mencionó en el análisis técnico, la sumatoria del gasto energético por hora total de los equipos de oficina equivalen a 2 KWh, teniendo en cuenta que, se establece de 24 horas de funcionamiento y asumiendo un trabajo constante por 30 días; la Tabla muestra la proyección para cada año aproximando un incremento del costo del servicio de energía en un 2,5 % debido a factores macro económicos.

**Tabla 38.** Bases de cálculo para el valor de la energía proyectada por año

Aumento anual	0,05	% anual
Costo KWh ESSA	530,16	\$/KWh
Consumo por hora	15,8	KWh
Consumo por año	11376	KWh/año
Aumento del consumo	0,01	% anual

Fuente: Autor

Con base a la demanda anual identificada en el análisis técnico, se construye el estimado evidenciado en la siguiente tabla.

**Tabla 39. Costo del gasto energético proyectado**

<b>AÑO</b>	<b>COSTO</b>
0	
1	\$ 6.031.100,16
2	\$ 12.427.081,88
3	\$ 18.823.063,60
4	\$ 25.219.045,32
5	\$ 31.615.027,04
6	\$ 38.011.008,76
7	\$ 44.406.990,48
8	\$ 50.802.972,20
9	\$ 57.198.953,92
10	\$ 63.594.935,64

**Fuente:** Autor

La anterior tabla da a conocer la demanda proyectada que se tendrá en cuenta para ejercicio de la elaboración del flujo de caja para determinar la viabilidad económica del proyecto por medio del cálculo de la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el Valor Actual Neto (VAN)

Flujo de caja. El ahorro representado por la diferencia entre el valor a pagar por energía consumida de la compañía externa y el valor del de operación, el cual incluye el mantenimiento anual y su crecimiento conforme al porcentaje determinado en la Tabla.

**Tabla 40.** Flujo de caja proyectado

AÑO	COSTO	Mantenimiento	Flujo neto	Inversión
0			\$ (73.649.000,00)	\$ 73.649.000,00
1	\$ 6.031.100,16	\$ 7.700.000,00	\$ (1.668.899,84)	\$ 75.317.899,84
2	\$ 12.427.081,88	\$ 7.931.000,00	\$ 4.496.081,88	\$ 70.821.817,96
3	\$ 18.823.063,60	\$ 8.168.930,00	\$ 10.654.133,60	\$ 60.167.684,36
4	\$ 25.219.045,32	\$ 8.413.997,90	\$ 16.805.047,42	\$ 43.362.636,94
5	\$ 31.615.027,04	\$ 8.666.417,84	\$ 22.948.609,20	\$ 20.414.027,74
6	\$ 38.011.008,76	\$ 8.926.410,37	\$ 29.084.598,39	\$ (8.670.570,65)
7	\$ 44.406.990,48	\$ 9.194.202,68	\$ 35.212.787,79	\$ (43.883.358,44)
8	\$ 50.802.972,20	\$ 9.470.028,76	\$ 41.332.943,43	\$ (85.216.301,87)
9	\$ 57.198.953,92	\$ 9.754.129,63	\$ 47.444.824,29	\$ (132.661.126,17)
10	\$ 63.594.935,64	\$ 10.046.753,52	\$ 53.548.182,12	\$ (186.209.308,29)

Fuente: Autor

Como puede observarse, el flujo de caja proyectado, resalta que los valores de la inversión comparados con el ahorro que se obtiene del consumo de energía del sistema, se equiparan aproximadamente en el sexto año de operación del sistema.

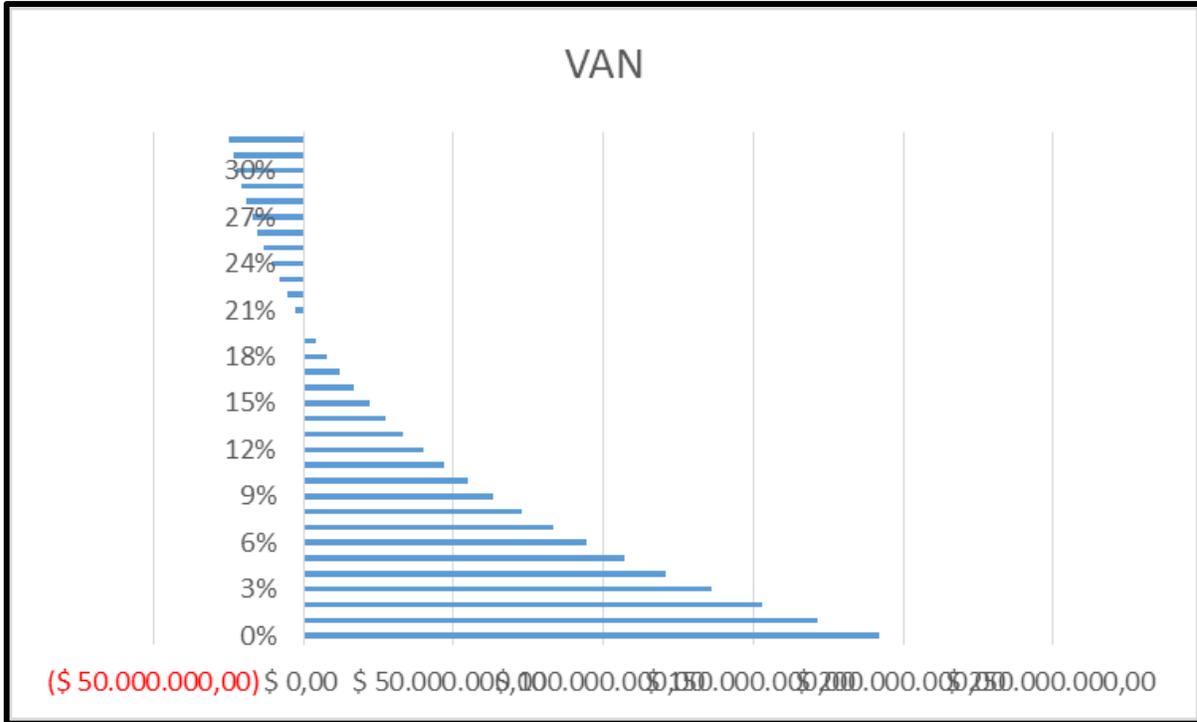
Asimismo, este flujo permite obtener los resultados de los indicadores que determinan a priori una factibilidad financiera del sistema. Dichos valores se ven reflejados en la siguiente Tabla.

**Tabla 41.** Premisas de factibilidad financiera

VAN	\$ 82.970.502,50
TIR	20,22%

Fuente: Autor

**Figura 28.** Valor Actual Neto y TIR



Fuente: Autor

**Análisis de indicadores.** Una TIR de 20,22% indica que la recuperación del valor de la inversión para una tasa de oportunidad del 15% indicada por la valoración del mercado, donde en supuesto es un porcentaje que exigiría el inversionista como mínimo de rentabilidad; El Valor Actual Neto, acompaña y sustenta esta evaluación con un saldo positivo de \$82.970.502.

#### 4. RESULTADOS

En la ejecución de esta propuesta de grado, se visualizó como eje fundamental la innovación, enfocada en cómo integrar este tipo de tecnologías que ya están disponibles en el mercado, para el beneficio de la comunidad de Barrancabermeja. La obtención de nuevas tecnologías desde el aspecto técnico, buscó concebir un sistema de captación de energía a través de las turbinas hidro-cinéticas de la cual se puede generar energía eléctrica, de llevarse a la implementación este diseño, dirigido a la Planta de Tratamiento de Agua Residuales (PTAR) donde será instalada la Turbina GORLOV.

En la investigación se diseñó y modeló la turbina Gorlov a fin de medir las variables de la velocidad de flujo que permiten construir sus curvas características bajo condiciones controladas. De esta manera se deja plasmado y por escrito a las Unidades Tecnológicas de Santander (UTS) esta propuesta, como estudio y factibilidad de incluir dentro de esta alternativa nuevas sugerencias para la obtención de datos importantes, puesta a punto de prototipos y la determinación de ciertos datos fundamentales. Además, se establece un modelo de análisis, diseñado en el software Solidworks, implementando un equipo de sistema de generación de energía eléctrica aislado, basado en la turbina de Gorlov, donde se especifican las características principales de cada pieza, en este se estudian los comportamientos tomados por la máquina una vez esté en funcionamiento. Con este proyecto la universidad puede implementar temáticas que ayuden al estudiante a observar y conocer adecuadamente los procedimientos y la forma en que se deben diseñar las turbinas Gorlov.

De igual manera esta propuesta, permitió integrar a empresas (Públicas o privadas), a instituciones educativas, a hacer parte de esta iniciativa y ejecutar

proyectos para un mayor impacto social, dando solución a problemáticas como la expuesta en esta investigación, donde el beneficio final, no sólo sea la integración, inclusión y apropiación en el uso de este tipo de tecnologías que beneficien a la sociedad, sino también dar el debido reconocimiento a las empresas y entidades públicas que hacen esfuerzos en inversión social.

Dentro de los aspectos más importantes a resaltar, es la característica modular del sistema, que se puede configurar de diferentes formas, según las condiciones de estructuras constructivas y clima de la región teniendo en cuenta el requerimiento deseado, además de la necesidad para la autogeneración de energía.

## 5. CONCLUSIONES

Se puede mostrar dentro de esta propuesta de grado el diseño de un sistema de generación de energía eléctrica teniendo como base la implementación de una turbina tipo gorlov, la cual se simulo cumpliendo como los parámetros constructivos adecuados en el modelado, con el fin de evaluar los resultados obtenidos en ellos, mostrando con esto alternativa para el desarrollo de la ciudad y como apartado a modo de guía de trabajos futuros para otros estudiantes que continúen con el avance o amplíen soluciones a este diseño de generación energética.

Con lo anteriormente expresado, se materializo esta propuesta desarrollando el modelo, por medio de un software de simulación, optimizando las características de diseño. Con el programa de SolidWorks, software de simulacion donde se mostró el diseño de la Turbina Gorlov y sus generadores que coadyuvaron a la fijación de los parámetros de dicho diseño, mediante la unión de metodologías establecidas.

El diseño establecido en cada uno de los elementos dispuestos para la construcción optima de la turbina, están basados en una geometría que permite reducir el efecto de borde o bloqueo de pared, debido a que estos se mantienen a una alta distancia con relación al borde del canal, evitando modificaciones del flujo alrededor del prototipo.

Se concluye la dependencia que implica la relación entre la velocidad angular y el coeficiente de rendimiento  $C_p$ . Por lo que se establece que para adquirir mayores rendimientos y por tanto una mayor potencia útil se debe aumentar la velocidad que ingresa al sistema.

Luego de la obtención propuesta en el enfoque de esta propuesta, cuyo alcance considera el diseño optimizado de este sistema, que dejará como finalidad la continuidad en la ejecución del proyecto ya en fases posteriores, esto contando activamente con estructuras teóricas y prácticas en un entorno donde la obtención de un prototipo funcional se de a escala real, para su respectiva evaluación y monitoreo de desempeño por medio de las simulaciones realizadas, así como estudiar la viabilidad comercial y técnica que permita una comercialización con posibles clientes potenciales.

Por medio de esta investigación, previa a la obtención del título de ingeniero electromecánico, se enmarca en un aporte significativo para la innovación de los índices metodológicos empleados en la institución, que permite deducir una serie de propiedades mecánicas, fundamentadas en teorías y conclusiones expuestas por otros autores. Así mismo, se presenta el nivel de viabilidad que desarrolla la aplicación de diseños en equipos de gran magnitud, como lo es el de una Turbina Gorlov para la Generación de Energía Eléctrica.

De este modo, se efectuá el diseño de la turbina Gorlov en el programa de modelación llamado Solidworks, esta se realiza teniendo en cuenta dimensiones reales, permitiendo un análisis tomando directamente las interacciones, obteniendo un diseño de dibujo de forma didáctica, con las propiedades mecánicas, características principales, observación del comportamiento, conexiones internas e identificación de las piezas principales, que son elementales para el desarrollo de cálculos y determinación de variables que permitan la comparación de teorías abordadas en las temáticas propuestas en el desarrollo de las asignaturas abordadas en el transcurso de actividades educativas del

programa de ingeniería electromecánica, en las unidades tecnológicas de Santander.

## 6. RECOMENDACIONES

Se sugiere a Las Unidades Tecnológicas de Santander sede Barrancabermeja socializar la viabilidad del proyecto de investigación planteado por los autores, con el objetivo de que los estudiantes de la ingeniería electromecánica se familiaricen con estudios de igual medida e inicien nueva investigación, donde el enfoque de analizar equipos encontrados en la industria sea extendido a las diferentes áreas de producción.

El diseño de un Sistema de Generación de Energía Eléctrica en base a la Turbina Gorlov, realizado a través de la herramienta de simulación Solidworks en la que se dispone de las propiedades necesarias para ejecutar cálculos mecánicos, donde el estudiante tiene la posibilidad de interactuar adecuadamente y comparar los resultados obtenidos en el aula de clase, con los expuestos por el prototipo.

Sin embargo, teniendo en cuenta que la investigación elaborada cuenta con una limitación y es la falta de un banco de pruebas, con dimensiones aptas para, efectuar la detección de posibles puntos de falla, observar las conexiones internas, y la forma correcta de manipular los procesos de generación eléctrica de forma didáctica. Lo cual genera un aumento en el nivel formativo por parte de la institución, debido a que los estudiantes pueden conocer detalladamente los procesos internos e identificar las piezas elementales y valores nominales para el desarrollo de cálculos analíticos, teniendo en cuenta que las actividades realizadas en clase estén acorde a los procesos elaborados en el campo de trabajo.

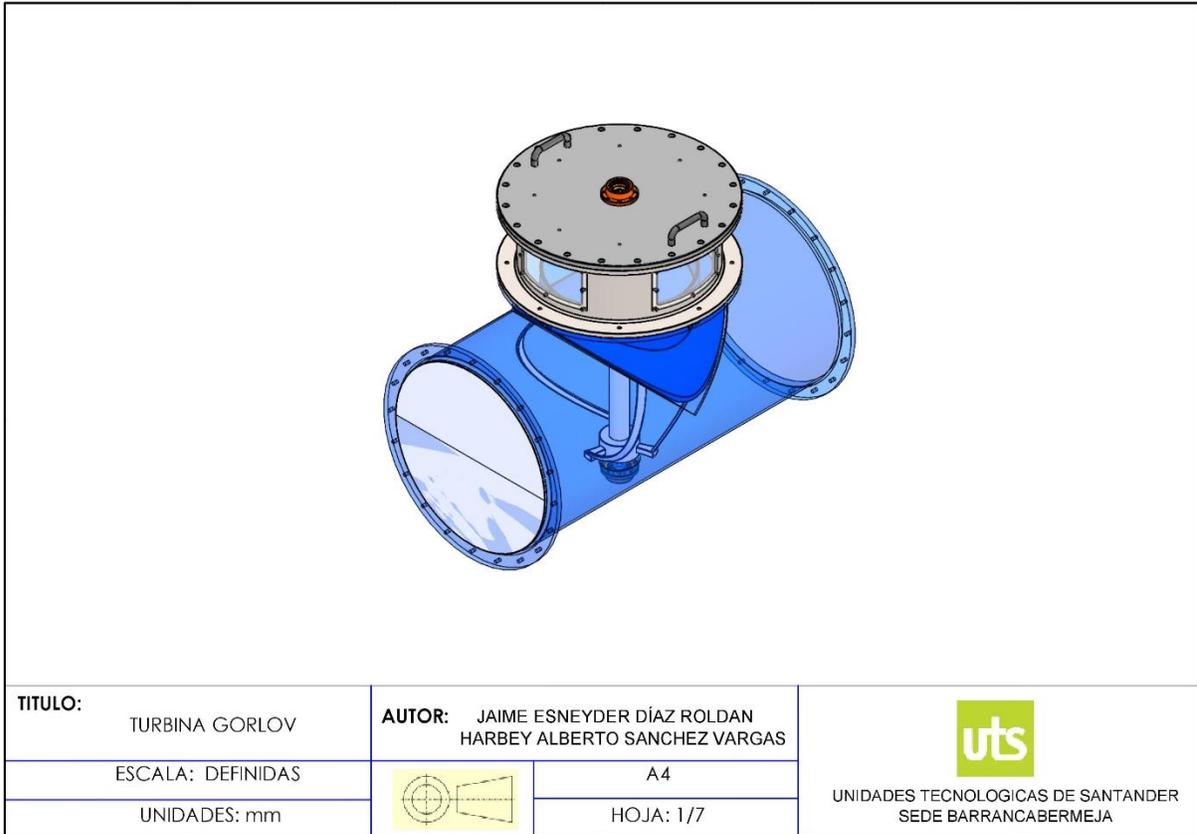
## 7. BIBLIOGRAFÍA

- Aragón Betancourt, A. (2013). Criterios para la selección de parámetros característicos de turbinas hidrocínicas de eje horizontal. Santa Clara: CEETA.
- Arrau Soza, J. F. (2016). Diseño del Generador de una Turbina. Santiago de Chile: Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Carrillo, J. (2018). Diseño mecánico de una turbina hidrocícnica para generación de energía en la estación de biodiversidad del Tiputini. Quito: Universidad San Francisco de Quito.
- Domingo, A. M. (1997). Apuntes de Mecánica de Fluidos. España: Copyright.
- Empresarial, D. T. (19 de Octubre de 2018). COLINNOVACION. Obtenido de COLINNOVACION: <https://www.researchgate.net/publication/322835380>
- Fernández Díez, P. (2 de Noviembre de 2018). Libros.redsauce. Obtenido de file:///C:/Users/Tercera%20Edad/Downloads/Turbinas
- García y Toyceñ, R. D. (2014). DISEÑO DE UN BANCO DE Ensayos de Turbina hidrocícnica tipo gorlov para el laboratorio de termo-fluidos. Bolívar: Instituto Universitario de Tecnología del Estado Bolívar.
- Gorlov, A. (2010). Hydraulic Cross Flow Turbines. Estados Unidos: Northeastern University Boston.
- Martínez Camacho, E. (2014). Diseño y optimización por medio de análisis exergéticos de una turbina hidrocícnica para generación de energía eléctrica a partir de fluidos de bajo caudal. México D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Martínez y Mosquera, C. J. (2017). Diseño de una pícocentral hidroeléctrica (pch) impulsada por la potencia hidráulica del río San Juan en la vereda Salao (medio San Juan, Chocó, Colombia). Bogotá D.C.: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

- Marture Pérez, G. J. (2012). Simulación fluidodinámica de un modelo de turbinahidrocínética tipo Gorlov. Puerto Ordaz: Universidad Técnica del Estado Venezolano.
- Mata, A. (2009). Diseño de una turbina hidrocínética para la realización de pruebas en un canal de ensayos hidruslicos, por el centro de investigaciones aplicadas. Puerto Ordaz: EDELCA.
- Mora, D. (2 de Noviembre de 2018). Tecnología. Obtenido de Recuperao: <https://html.rincondelvago.com/las-turbinas.html>
- Ortiz, G. (2018). Diseño de un rotor hidrocínético tipo gorlov para el suministro de energía eléctrica a una vivienda ubicada en una zona no interconectada del departamento de casanare. Bogota: Universidad Santo Tomas.
- Pico, R. (2018). Turbinas hidrocínéticas de eje vertical helicoidal. Ecuador: Universidad técnica estatal Quevedo.
- PTAR. (2017). Plan de gestión y resultados PTAR Barrancabermeja. Barrancabermeja: Aguas de Barrancabermeja.
- Ramirez, y. S. (Enero de Noviembre de 2010). Revista Eidenar. Obtenido de <http://www.redalyc.org/pdf/2311/231116434011.pdf>
- Rivadeneira Moya, D. M. (2015). Modelación y simulación de la operación de generadores que emplesn turbinas hidrocéniticas en rios de bajo caudal. Quito: Universidad Politécnica Salesiana.
- Romero Bentez, M. d. (2016). Estudio para suplir la demanda energética de la estación de bombeo del municipio de cicuco a través de la adopción de tecnolgúas hidrocínéticas. Barranquilla: Universidad de la Costa.
- Van, d. O. (2003). Turbina hidrocínética para poblaciones aisladas. HidroRed, 14.
- Zamora, V. B. (2016). Máquinas Hidraulicas. Teoría y problemas. Cartagena: Rai UPCT Ediciones.

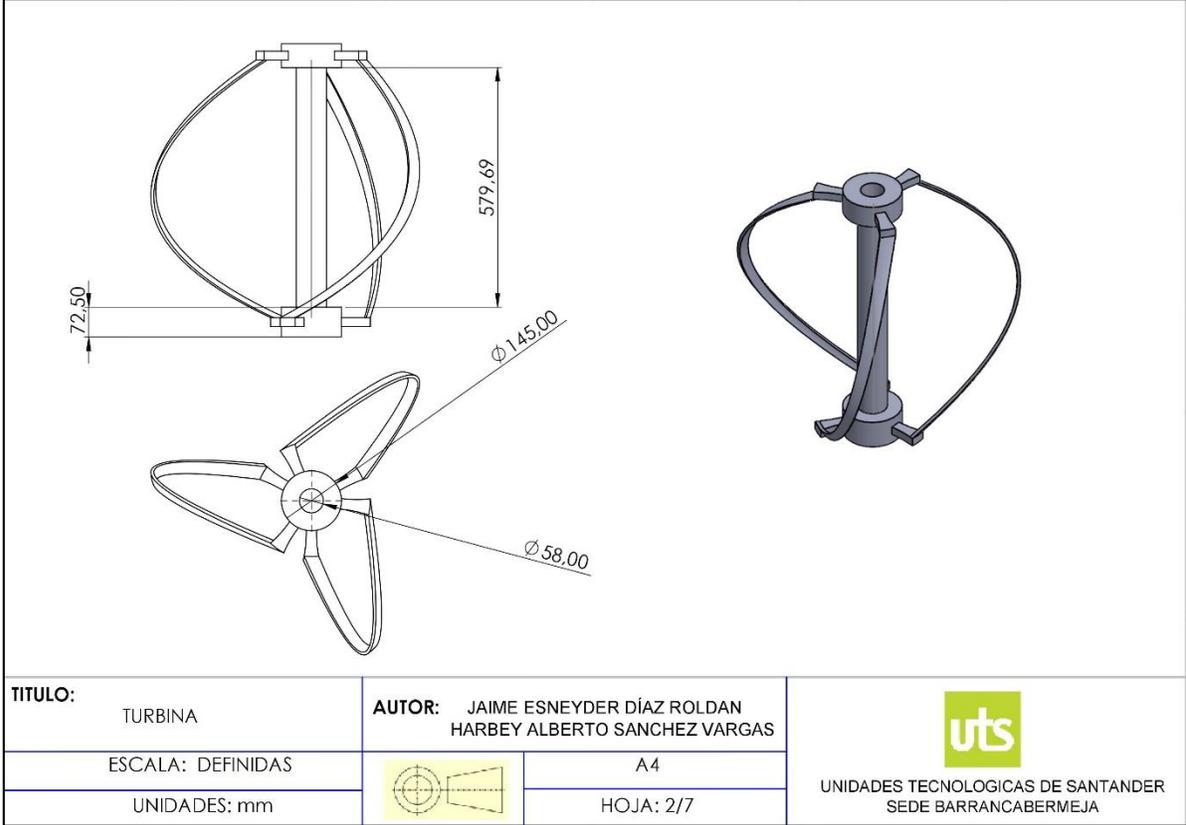
## 8. ANEXOS

### Anexo 1.Turbina Gorlov



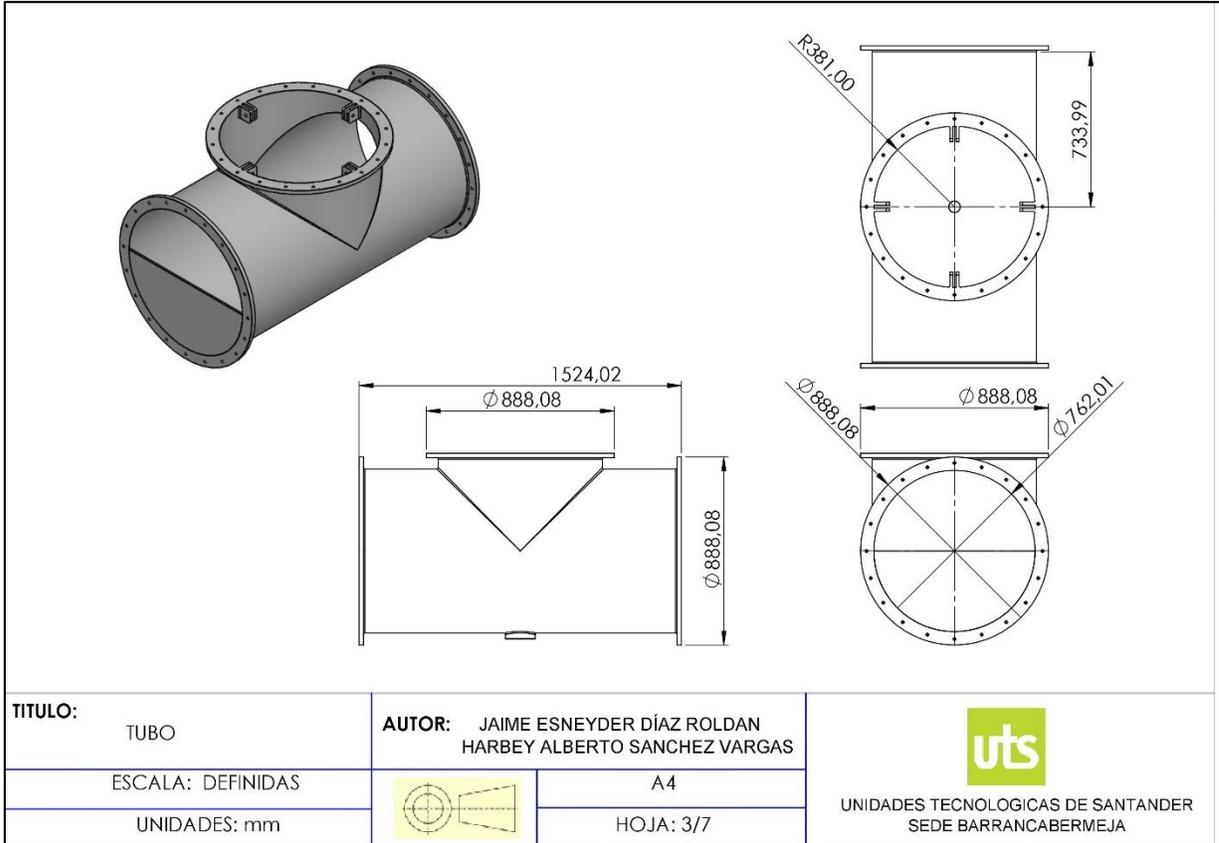
Fuente: Autor

**Anexo 2. Alabes con ángulo de 84°**



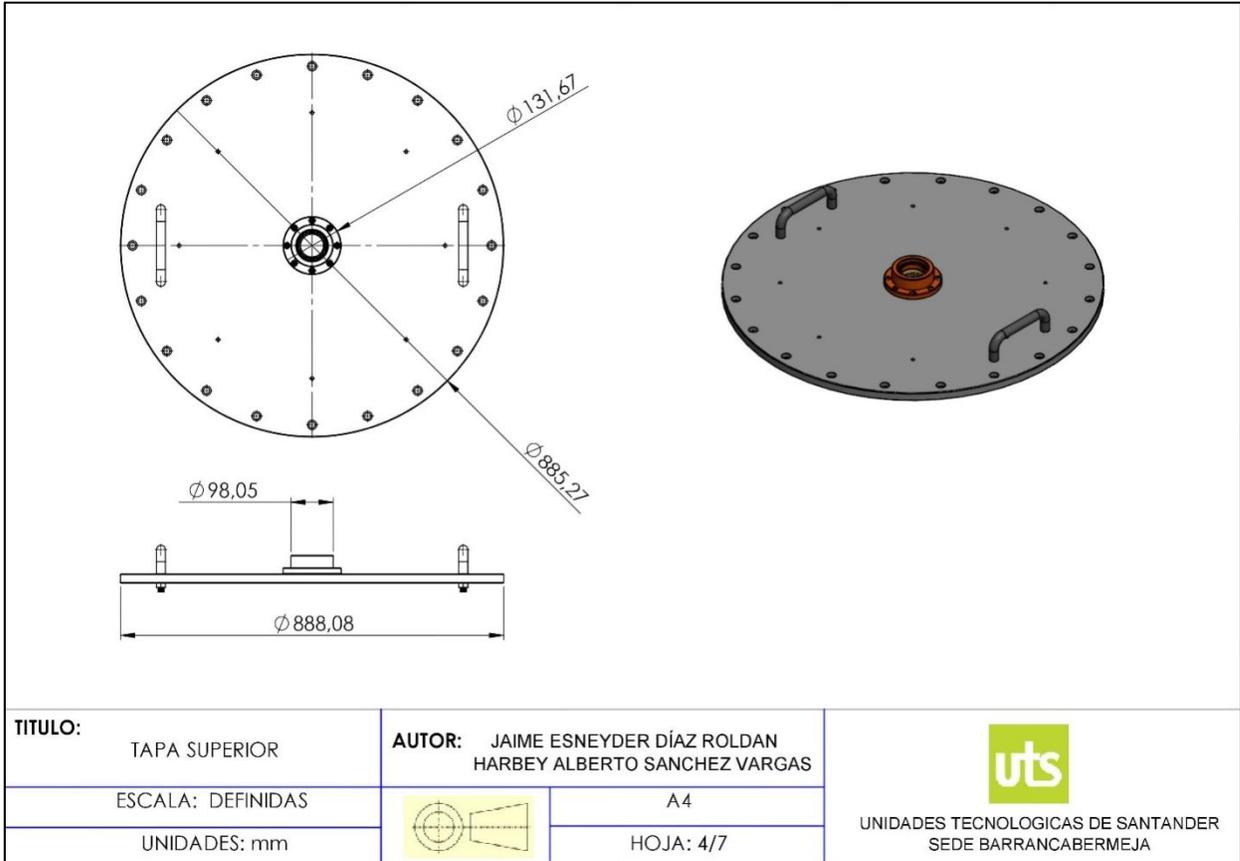
**Fuente:** Autor

**Anexo 3.Tubería**



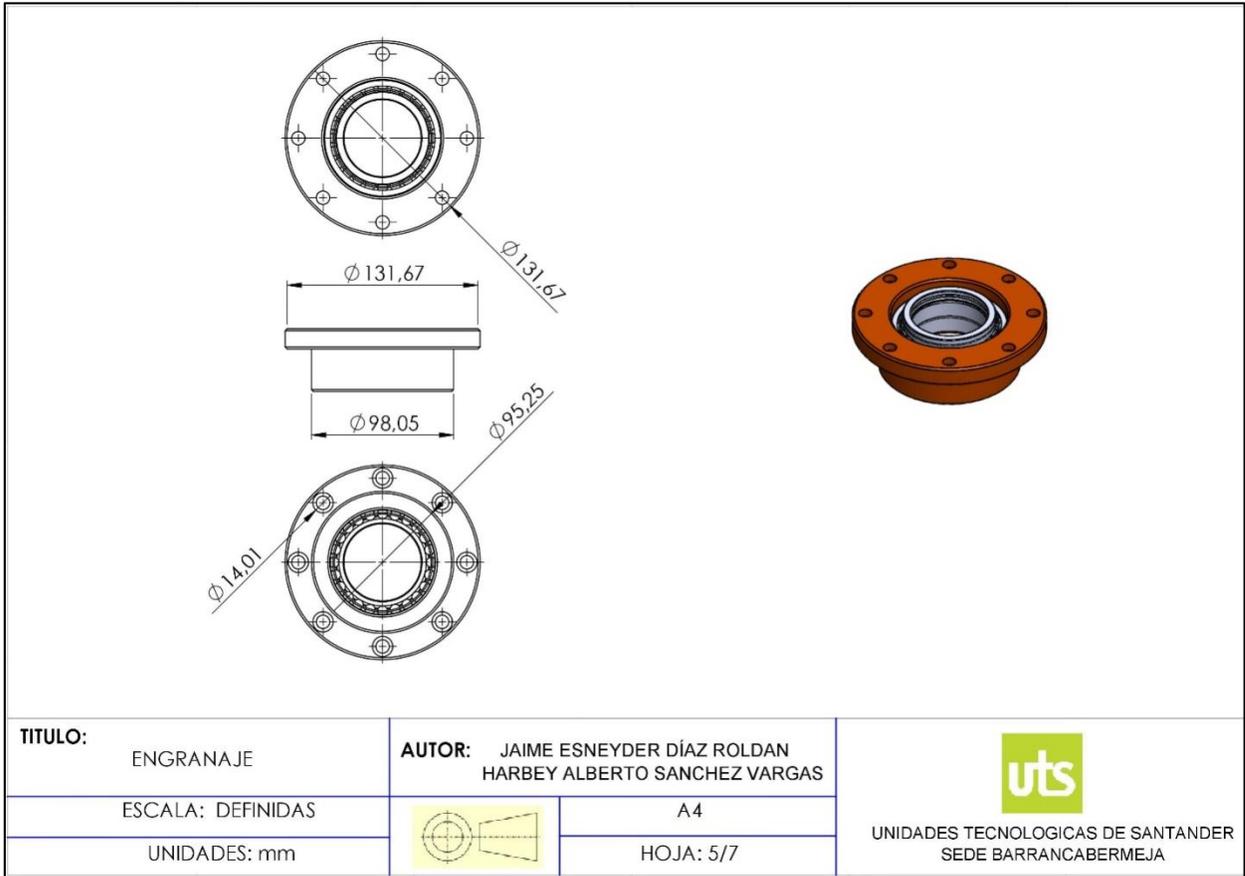
Fuente: Autor

**Anexo 4. Tapa superior**



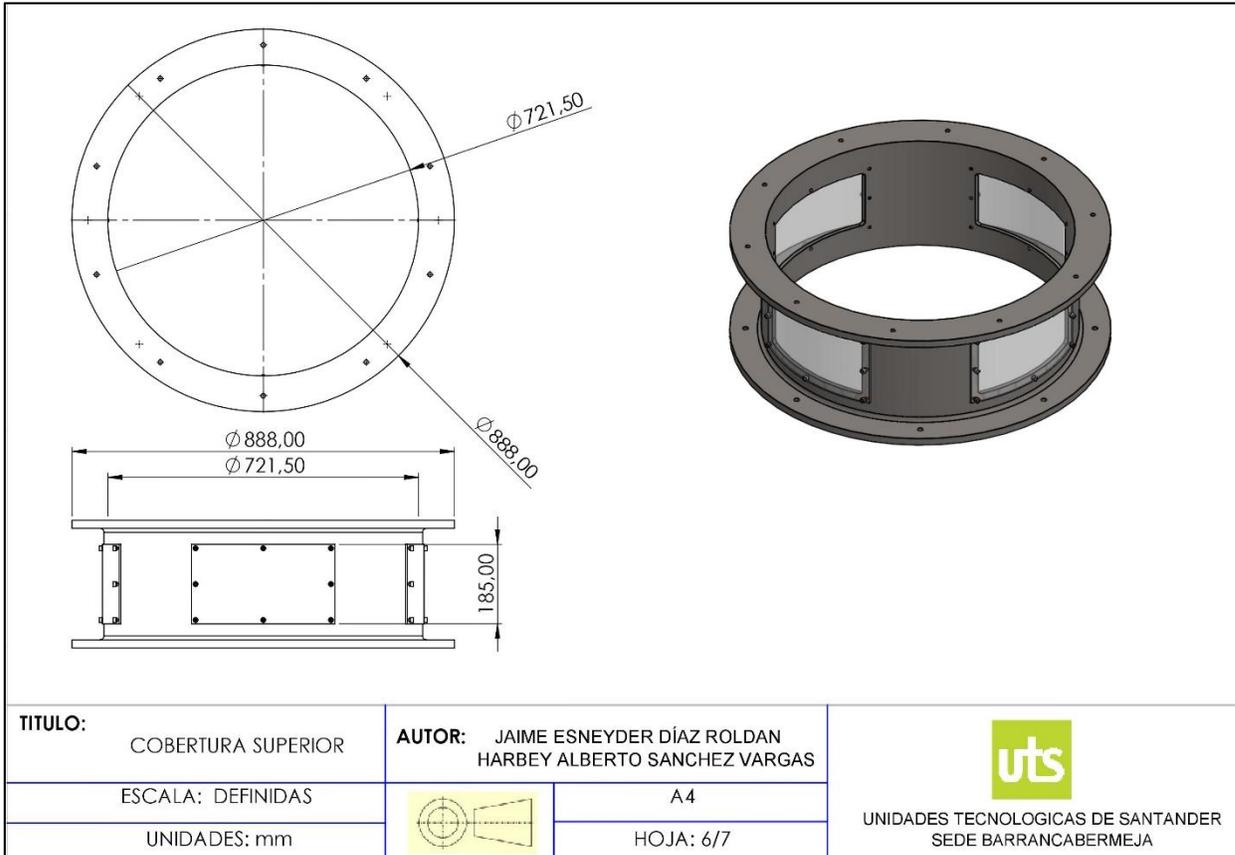
Fuente: Autor

**Anexo 5. Engranaje**



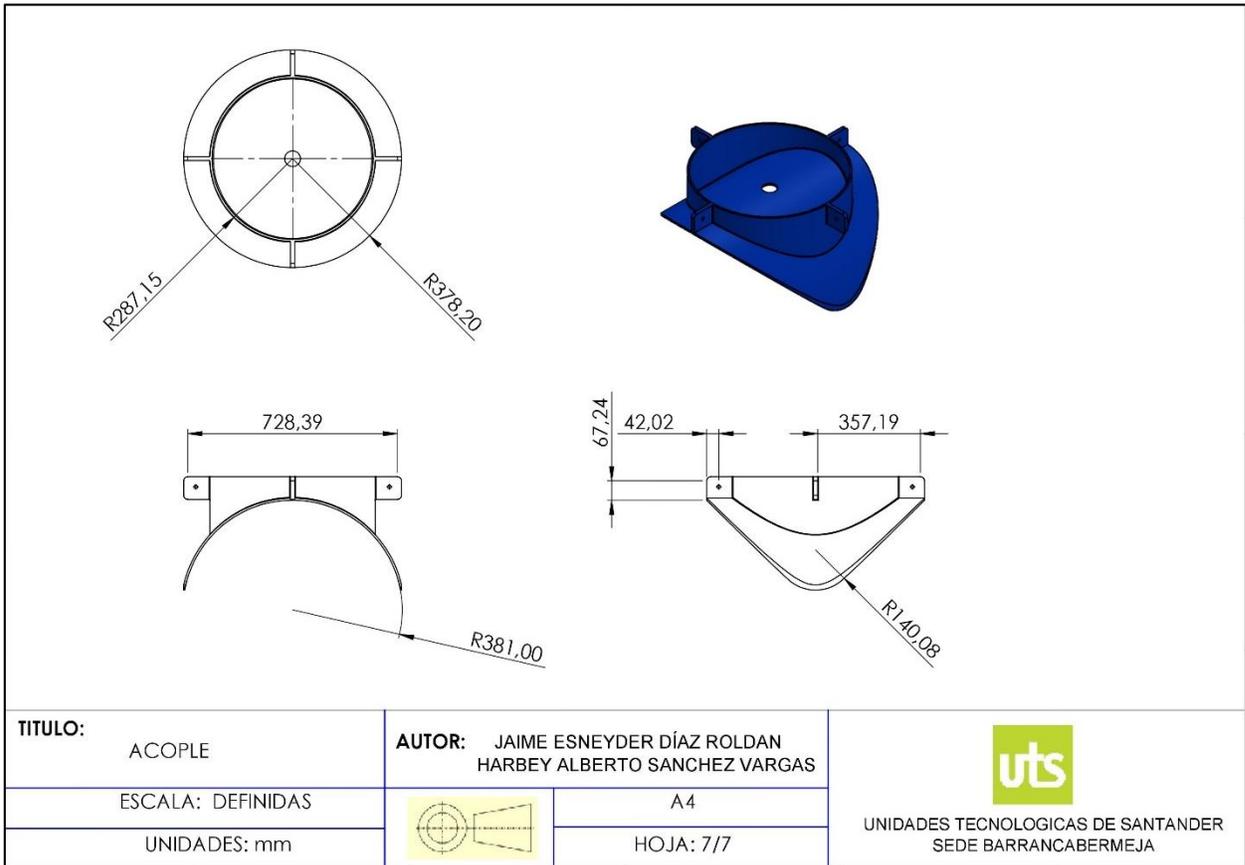
**Fuente:** Autor

**Anexo 6. Cobertura superior**



**Fuente: Autor**

**Anexo 7.Acople**



Fuente: Autor

**Anexo 8.**Ficha técnica generador eléctrico

<b>SIEMENS</b>																	
<b>Hoja de datos de motores de jaula de ardilla trifásicos</b>																	
<b>Datos de pedido:</b>		<b>1LE1001-1CD22-1AA4</b>															
<b>Tipo de motor:</b>		<b>1AV2132D</b>															
<b>Número de pedido del cliente:</b>				<b>Nº. de item:</b>				<b>Nº. de envío:</b>				<b>Proyecto:</b>					
<b>Nº. de pedido Siemens:</b>				<b>Número de oferta:</b>				<b>Nota:</b>									
U	Δ/Y	f	P	P	I	n	M	NOM. EFF at ... load [%]			Power factor at ... load			I <sub>L</sub> /I <sub>N</sub>	M <sub>v</sub> /M <sub>N</sub>	M <sub>v</sub> /M <sub>N</sub>	IE-CL
[V]		[Hz]	[kW]	[hp]	[A]	[1/min]	[Nm]	4/4	3/4	2/4	4/4	3/4	2/4	I <sub>N</sub>	T <sub>v</sub> /T <sub>N</sub>	T <sub>v</sub> /T <sub>N</sub>	
220	Δ	50	3,00	-/-	15,90	720	40,0	80,0	80,7	79,2	0,62	0,55	0,44	3,7	1,4	2,0	IE2
380	Y	50	3,00	-/-	9,20	720	40,0	80,0	80,7	79,2	0,62	0,55	0,44	3,7	1,4	2,0	IE2
440	Y	60	3,45	-/-	9,20	870	38,0	80,0	80,8	79,2	0,62	0,56	0,45	3,8	1,5	2,0	IE1
440	Y	60	3,00	-/-	8,00	875	33,0	85,5	85,5	81,2	0,58	0,51	0,40	4,3	1,8	2,3	IE2
IM B3 / IM 1001			FS 132 M			52 kg	IP55	IEC/EN 60034			IEC, DIN, ISO, VDE, EN						
<b>Poder</b>	<b>Voltaje</b>	<b>Velocidad</b>	<b>Actual</b>	<b>Esfuerzo de torsión</b>	<b>Par de arranque</b>												
1 ~40 KW	24~380 V	15~350 rpm	15~80 A	636.7 Nm-1591.7 Nm	10 Nm – 60 Nm												
<b>Velocidad (rpm)</b>	30	60 60	100	150	200	250	Peso/Kg										
<b>Potencia (KW)</b>	1.2	2.5	4.5 4.5	7 7	10	11	230										
<b>Potencia (KW)</b>	1.5	3.5	5 5	9 9	12	13	260										
<b>Velocidad (rpm)</b>	300	400	500	600	900		Peso/Kg										
<b>Potencia (KW)</b>	12	15	20	25	30		230										
<b>Potencia (KW)</b>	15	18 años	25	28	35		260										
<b>Polos No.</b>			<b>Tamaño del marco</b>			<b>60 Hz / Velocidad</b>											
24			200			300											

Fuente: SIEMENS. Hoja de datos de motores de jaula de ardilla trifásicos.