



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**PROYECTO TÉCNICO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO**

TEMA:

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE TURBINA WELLS PARA LA
GENERACIÓN DE ENERGÍA”**

AUTOR:

Andrés Ricardo Villacrés Santamaría

TUTOR:

Ing. Mg. Alex Santiago Mayorga Prado

AMBATO- ECUADOR

2018

APROBACIÓN DEL TUTOR

En mi calidad de tutor del proyecto técnico, previo a la obtención del título de Ingeniero Mecánico, con el tema “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE TURBINA WELLS PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA”, desarrollado por el señor Andrés Ricardo Villacrés Santamaría con cédula de ciudadanía 1804105185, egresado de la Faculta de Ingeniería Civil y Mecánica, Carrera de Ingeniería Mecánica.

Certifico:

- Que el presente proyecto es original de su autoría.
- Ha sido revisado cada uno de sus capítulos.
- Esta concluido y puede continuar el trámite correspondiente.

.....

Ing. Mg. Alex Mayorga.

TUTOR

AUTORIA DEL TRABAJO

Declaro que los criterios y las ideas expuestas en este proyecto técnico de titulación con el tema: “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE TURBINA WELLS PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA”, así como también los contenidos, ideas, diseño, resultados, conclusiones y recomendaciones son de responsabilidad exclusiva de mi persona en calidad de autor del proyecto.

Ambato, enero del 2019

.....

Andrés Ricardo Villacrés Santamaría

1804105185

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato para que haga de este proyecto técnico o parte de él, un documento disponible para su lectura, consulta y procesos de investigación según las normas de la Institución.

Cedo los derechos en línea patrimoniales de nuestro proyecto técnico con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este documento, dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando esta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando mis derechos de autor.

Ambato, enero del 2019

.....

Andrés Ricardo Villacrés Santamaría

1804105185

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

Los miembros del tribunal de grado aprueban el informe del proyecto técnico realizado por el alumno Andrés Ricardo Villacrés Santamaría de la carrera de Ingeniería Mecánica, bajo el tema: “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE TURBINA WELLS PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA”,

Ambato, enero 2019

Para constancia firman:

.....

Ing. Mg. Mauricio Carrillo

.....

Ing. Mg. Luis Escobar

DEDICATORIA

Este proyecto va dedicado, en especial, a Dios, por proveer fuerza y sabiduría para la conclusión de esta meta.

A mis padres, Mercedes Santamaría y Marco Villacrés, por haberme dado uno de los mejores regalos que es la educación, la misma que me permitió salir adelante a pesar de todas las adversidades y sigue siendo una herramienta muy útil para mi formación profesional, gracias por brindarme todo su apoyo.

A mis hermanos, Fernanda, Alex, Santiago y Paúl, por estar en las buenas y en las malas y apoyarnos mutuamente en este camino llamado vida.

A mis sobrinos queridos, Mateo, Emilia y Paula.

A mis abuelitas América, Luz y a mi cuñado Eduardo Salinas.

Andrés Villacrés

AGRADECIMIENTO

A Dios.

A mis padres, por el apoyo incondicional y ánimo para seguir adelante.

A mi familia, por estar presente en cada una de las etapas de mi vida.

A la Universidad Técnica de Ambato porque en sus instalaciones, me formé a lo largo de mi vida universitaria y, a mis docentes por la enseñanza brindada para mi desarrollo profesional.

Al Ing. Mg. Alex Mayorga por los conocimientos impartidos para la realización de este proyecto.

A mis amigos, en especial a Cristian y Jonathan, por brindarme su amistad.

Y a aquellas personas, que de una u otra manera me ayudaron en toda mi vida universitaria.

Andrés Villacrés

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS

PORTADA.....	I
APROBACIÓN DEL TUTOR.....	II
AUTORIA DEL TRABAJO	III
DERECHOS DE AUTOR	IV
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO	V
DEDICATORIA	VI
AGRADECIMIENTO	VII
ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS.....	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XIII
ÍNDICE DE TABLAS	XV
RESUMEN EJECUTIVO	XVI
ABSTRACT.....	XVII
CAPÍTULO I.....	1
ANTECEDENTES.....	1
1.1. Tema.....	1
1.3. Justificación	2
1.4. Objetivos	4
1.4.1. Objetivo general	4
1.4.2. Objetivos específicos	4
CAPÍTULO II	5
FUNDAMENTACIÓN	5
2.1. Investigaciones previas	5
2.2. Fundamentación teórica	7
2.2.1. Máquinas hidráulicas	7
2.2.2. Energías alternativas	8
a) Energía mareomotriz.....	9
b) Energía Undimotriz	10
Columnas Oscilantes de agua (OWC)	11
Wave Dragon (Dragón de olas)	12
c) Energía térmica oceánica	13

2.2.3. Turbomáquinas.....	14
2.2.3.1. Clasificación de las turbomáquinas.....	14
2.2.3.1.1. Turbomáquinas generatrices	14
2.2.3.1.2. Turbomáquinas motrices.....	15
2.2.3.1.3. Turbomáquinas reversibles	15
2.2.3.1.4. Grupos de transmisión o acoplamiento.....	15
2.2.4. Turbina	15
2.2.4.1. Clasificación de las turbinas	16
2.2.4.2. Turbinas de acción	16
2.2.4.3. Turbinas de reacción	16
2.2.5. Sistema OWC.....	17
2.2.6. Turbina Wells.....	17
2.2.6.1. Turbina Wells convencional	17
Partes o elementos.....	19
Rodete	19
Perfil alar.....	19
2.2.6.2 Turbina Wells con aletas directrices	21
2.2.6.3 Turbina Wells biplano.....	21
2.2.6.4 Turbina Wells biplano contrarrotante	22
2.2.6.5 Turbina Wells con alabes orientables	23
CAPÍTULO III.....	24
DISEÑO DEL PROYECTO	24
3.1. Selección de alternativas.....	24
Alternativa 1.....	24
Ventajas.....	24
Desventajas	24
Alternativa 2.....	24
Turbina Wells biplano.....	24
Ventajas.....	25
Desventaja.....	25
Alternativa 3.....	25
Ventajas.....	25
Desventajas	26
Evaluación de soluciones	26

Método ordinal de criterios ponderados.....	26
Criterios de evaluación.....	26
Descripción de criterios	27
3.2. Cálculos.....	30
3.2.1. Selección del perfil.....	30
Perfil NACA 0018	31
Perfil NACA 0021	32
Perfil NACA 0024	33
3.2.2 Parámetros de diseño	35
a) Número de álabes.....	35
b) Ángulo de distribución de los álabes	35
c) Diámetro exterior	35
d) Solidez de la turbina	35
e) Diámetro interior.....	35
f) Envergadura.....	36
g) Área total del rodete.....	36
h) Velocidad del aire	37
i) Velocidad angular.....	38
j) Velocidad angular por el radio de la turbina	38
k) Caudal	38
l) Diferencia de presiones	39
m) Velocidad inducida	39
n) Ángulo de velocidad efectiva	40
o) Velocidad efectiva	40
3.2.3. Diseño aerodinámico del álabe	40
p) Cuerda.....	42
q) Número de Reynolds	42
r) Ángulo de velocidad geométrica.....	43
s) Velocidad geométrica.....	43
t) Fuerza de sustentación.....	43
u) Fuerza de arrastre.....	43
v) Componente de fuerza axial	44
w) Componente de fuerza tangencial.....	44
x) Torque.....	44

3.2.4. Diseño mecánico del eje de la turbina	44
a) Fuerzas y momentos	45
b) Cálculo de la carga del viento.....	46
c) Cálculo del momento torsor	46
d) Cálculo de la fuerza vertical	46
e) Peso del rodete	47
f) Cálculos de las reacciones	47
g) Diagrama de fuerza cortante	48
h) Diagrama de momento flector	49
3.2.5. SELECCIÓN DEL EJE DE LA TURBINA	49
Diseño estático del eje.....	51
a) Esfuerzo máximo por flexión en el eje	51
b) Esfuerzo cortante por torsión en el eje	51
c) Esfuerzo de Von Mises	52
d) Factor de seguridad.....	52
Diseño dinámico del eje	52
a) Límite de resistencia a la fatiga	52
b) Factor de modificación de la condición superficial K_a	53
c) Factor de modificación del tamaño K_b	53
d) Factor de modificación de la carga K_c	53
e) Factor de modificación de la temperatura K_d	54
f) Factor de confiabilidad K_e	54
g) Factor de modificación de efectos varios K_f	54
h) Fracción de resistencia a la fatiga	55
i) Resistencia a la fatiga	55
j) Esfuerzo máximo por flexión	56
k) Factor de seguridad del eje de la turbina	56
Criterio de Goodman Modificado	56
a) Esfuerzo medio	56
b) Esfuerzo alterante	57
c) Factor de seguridad según el criterio de Goodman Modificado	57
3.2.6. SELECCIÓN DE RODAMIENTOS	57
a) Carga estática equivalente.....	58
b) Carga dinámica equivalente.....	58

c) Vida nominal del rodamiento.....	58
d) Ratio de la viscosidad	59
e) Factor básico <i>a23II</i>	59
3.2.7. SELECCIÓN DEL GENERADOR	60
3.2.8. DATOS DE LA TURBINA	61
3.2.9. DESARROLLO DE LA EXPERIMENTACIÓN.....	61
3.2.10. RESULTADOS.....	63
3.2.10.1 TIEMPO VS VELOCIDAD DEL AIRE	63
3.2.10.2. TIEMPO VS PRESIÓN	65
3.2.10.3. TIEMPO VS VOLTAJE	66
3.2.10.4. TIEMPO VS AMPERAJE.....	67
3.2.10.5. TIEMPO VS RPM	68
3.3. PRESUPUESTO	69
3.3.1. Elementos de la turbina.....	69
3.3.2. Material eléctrico	70
3.3.3. Máquinas y herramientas	70
3.3.4. Estructura banco de pruebas	71
3.3.5. Varios.....	71
3.3.6. Costo total del proyecto	72
CAPÍTULO IV.....	73
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	73
4.1. CONCLUSIONES	73
4.2. RECOMENDACIONES.....	73
BIBLIOGRAFÍA	75
ANEXOS	77

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. 1. Turbina Wells.	2
Figura 1. 2. Funcionamiento de una Turbina Wells.....	3
Figura 2. 1. Clasificación de las máquinas hidráulicas ode fluido.....	8
Figura 2. 2. Partes de una central mareomotriz.....	10
Figura 2. 3. Esquema de un sistema OWC.....	11
Figura 2. 4. Funcionamiento de un sistema OWC	12
Figura 2. 5. Funcionamiento del Dragón de olas.	13
Figura 2. 6. Planta energía mareomotérmica	14
Figura 2. 7. Turbina de acción	16
Figura 2. 8. Esquema de una turbina de reacción	16
Figura 2. 9. Triangulo de velocidades	18
Figura 2. 10. Perfil alar	20
Figura 2. 11. Turbina Wells con aletas directrices.....	21
Figura 2. 12. Esquema de una turbina Wells biplano	22
Figura 2. 13. Esquema de una turbina Wells contrarrotante	23
Figura 2. 14. Rodete de una turbina Wells con álabes orientables	23
Figura 3. 1. C_l vs C_d – C_l vs α (perfil 0018)	31
Figura 3. 2. C_l vs C_d – C_l vs α (perfil 0021).....	32
Figura 3. 3. C_l vs C_d – C_l vs α (perfil 0024).....	33
Figura 3. 4. Valores del perfil NACA 0018	34
Figura 3. 5. Diagrama de velocidades ideal y real de una turbina Wells.....	41
Figura 3. 6. Relación de ángulos entre los dos diagramas de velocidades y de fuerzas sobre el perfil de un álabe.....	41
Figura 3. 7. Diagrama de fuerzas y velocidades sobre el perfil de un álabe.....	42
Figura 3. 8. Fuerzas del eje de la turbina	45
Figura 3. 9. Diagrama de cuerpo libre del eje de la turbina	45
Figura 3. 10. Diagrama de fuerza cortante	48
Figura 3. 11. Diagrama de momento flector	49
Figura 3. 12. Eje de acero.....	51
Figura 3. 13. Generador	61

Figura 3. 14. Tiempo vs Velocidad del aire	64
Figura 3. 15. Tiempo vs Presión	65
Figura 3. 16. Tiempo vs Voltaje.....	66
Figura 3. 17. Tiempo vs Amperaje.....	67
Figura 3. 18. Tiempo vs RPM.....	68

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3. 1. Evaluación del peso específico de cada criterio.....	27
Tabla 3. 2. Evaluación del peso específico del criterio de facilidad de construcción	28
Tabla 3. 3. Evaluación del peso específico del criterio de bajo costo.....	28
Tabla 3. 4. Evaluación del peso específico del criterio de diseño.....	29
Tabla 3. 5. Evaluación del peso específico del criterio de pruebas accesibles	29
Tabla 3. 6. Evaluación del peso específico Alternativa/ Criterio.....	30
Tabla 3. 7. NACA 0018-0021-0024.....	33
Tabla 3. 8. Diferencia y relación de los perfiles NACA 0018-0021-0024	34
Tabla 3. 9. Tipo de carga, valores de momento de flexión	50
Tabla 3. 10. Valores del tiempo vs velocidad del aire	63
Tabla 3. 11. Valores del tiempo vs presión.....	65
Tabla 3. 12. Valores del tiempo vs voltaje.....	66
Tabla 3. 13. Valores del tiempo vs Amperaje.....	67
Tabla 3. 14. Valores del tiempo vs rpm	68
Tabla 3. 15. Costo de los elementos de la turbina.....	69
Tabla 3. 16. Costo del material eléctrico.....	70
Tabla 3. 17. Costo del uso de máquinas y herramientas	71
Tabla 3. 18. Costo de estructura banco de pruebas	71
Tabla 3. 19. Costos varios	72
Tabla 3. 20. Costo total del proyecto	72

RESUMEN EJECUTIVO

El presente proyecto se basó en el diseño y construcción de un prototipo de una turbina Wells para la generación de energía, para lo cual primero se procedió a la recopilación de información, a la investigación de las características de la turbina Wells, al estudio del funcionamiento adecuado y a los parámetros necesarios para el diseño del prototipo teniendo como fuentes de investigación artículos científicos y revistas de investigación. Gracias al programa Airfoil Tools se pudo proceder a la elección del perfil más adecuado para este tipo de turbinas tal como el NACA 0018, también para los parámetros del diseño aerodinámico del alabe se calculó con la ayuda de tesis y de artículos científicos, los cálculos de la elección del eje de la turbina se realizaron con la ayuda del libro de Shigley y se obtuvo un eje de $\frac{1}{4}$ de pulgada de diámetro. Para la selección de los rodamientos se utilizó los catálogos FAG.

En la parte de la construcción, el prototipo de la turbina Wells se mandó a imprimir en un material más liviano como es el PLA, el eje fue de acero, el tubo donde se encontraba la turbina fue de PVC de 8 pulgadas de diámetro.

En la parte eléctrica se compró 2 electroválvulas de $\frac{1}{2}$ pulgada, racores de $\frac{1}{2}$ pulgada, 6 metros de manguera de $\frac{1}{2}$ pulgada, 2 contactores, 2 pulsadores uno normalmente abierto y el otro normalmente cerrado, una batería de 12 V y se realizó un banco de pruebas de madera.

Finalmente se realizaron las pruebas en el laboratorio de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Carrera de Mecánica se obtuvieron resultados máximos como: presión de 120 Psi, velocidad de 6.7m/s, voltaje de 14 V y 1300 rpm.

ABSTRACT

The present project was based on the design and construction of a Wells turbine prototype for the generation of energy, for which first we proceeded to the collection of information, to the investigation of the characteristics of the Wells turbine, to the study of the operation adequate and the parameters necessary for the design of the prototype having as research sources scientific articles and research journals. Thanks to the AirfoilTools program it was possible to proceed with the choice of the most suitable wing profile for this type of turbines, such as the NACA 0018 symmetric profile, and also for the parameters of the aerodynamic design of the wing, it was calculated with the help of theses and scientific articles. the calculations of the choice of the turbine shaft were made with the help of Shigley's book and an axis of $\frac{1}{4}$ inch in diameter was obtained. FAG catalogs were used to select the bearings

In the part of the construction, the Wells turbine prototype was sent to print in a lighter material such as the PLA, the shaft was made of steel, the tube where the turbine was 8 inches diameter PVC.

In the electrical part, 2 $\frac{1}{2}$ -inch solenoid valves, $\frac{1}{2}$ -inch fittings, 6 meters of $\frac{1}{2}$ -inch hose, 2 contactors, 2 push-buttons, one normally open and the other normally closed, a 12-V battery were purchased and a bank was made wood tests. Finally the tests were carried out in the laboratory of the Faculty of Civil and Mechanical Engineering of the Mechanical Career, maximum results were obtained: pressure of 120 Psi, speed of 6.7m /s, voltage of 14 V and 1300 rpm.

CAPÍTULO I

ANTECEDENTES

1.1. Tema

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE TURBINA WELLS PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA

1.2. Antecedentes

Uno de los puntos más importantes de nuestro país es la accesibilidad con la naturaleza del cual debemos aprovechar cada uno de los recursos que nos brinda y uno de ellos es el mar, con el cual nos podemos beneficiar de ellos, el mar puede ser un afluente muy importante para la generación de energía eléctrica ya que en la actualidad es una fuente indispensable para cada una de las personas en el mundo.

Con el avance de la tecnología obliga a las personas a descubrir nuevas fuentes de energía que sea mucho más limpias que la energía fósil y una de ellas es la energía undimotriz el cual se da gracias al aprovechamiento de la energía proveniente de las olas.

En otros países como por ejemplo Colombia, en la Universidad Militar Nueva Granada se han realizado el análisis de la viabilidad del desarrollo de una turbina de flujo bidireccional desde el punto de vista del recurso energético el cual muestra el uso de la energía undimotriz como fuente de energía alternativa que es aprovechada por el movimiento de las olas y la transforman en energía mecánica gracias a la Turbina Wells y esta la convierte en energía eléctrica mediante un generador.

Por medio de este antecedente se desea realizar este proyecto de diseño y construcción de una turbina Wells que genere energía eléctrica por medio de un generador.

1.3. Justificación

La mayor parte de la superficie del planeta tierra está cubierta por agua, hablamos del 70.8% que corresponden a 362 millones de Km² de superficie que son ocupados por océanos, mares, ríos y lagunas ubicados en los seis continentes lo cual es un recurso de vital importancia para los países que tiene la oportunidad de acceder territorialmente a él y saber utilizarlo y saber sacar ventajas de este recurso sabiendo que es una de las formas más limpias de conseguir electricidad [1].

El presente proyecto está basado en el estudio y diseño de una turbina Wells la cual es una máquina compacta que servirá para la generación de energía como se muestra en la figura número 1.1

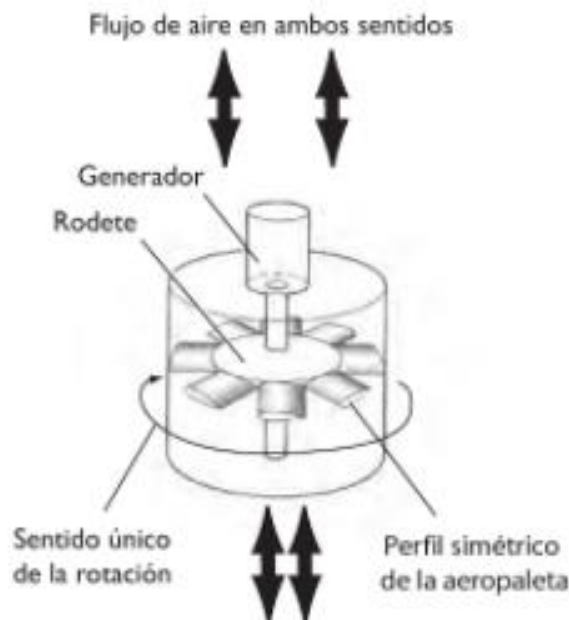


Figura 1. 1. Turbina Wells.

Fuente [2].

La Turbina Wells fue diseñada por Alan Wells, fue la primera turbina bidireccional, este tipo de máquinas han sido las más utilizadas en sistemas de columnas de agua de oscilación (OWC) porque son de sencillo diseño y fácil fabricación, debido a que es la turbina adecuada para las instalaciones OWC, este tipo de maquinaria se propuso en 1976 [2].

Su principal característica es que, debido a su geometría, siempre gira en el mismo sentido, independientemente del sentido del flujo de aire en la cámara de captura. Para aprovechar esta forma de energía la turbina Wells consta de un rodete formado por perfiles aerodinámicos que se encuentran perpendicularmente al eje de giro en un determinado número de aspas, distribuidos alrededor de un cubo central cuando una ola choca con la membrana su volumen disminuye y hace circular el aire dentro de ella, a través de una tubería, hacia las otras membranas [3].



Figura 1. 2. Funcionamiento de una Turbina Wells

Fuente:[3].

La utilización de las turbinas Wells en sistemas de generación de energía a pequeña escala es aún corta y limitada; principalmente en países en vía de desarrollo, debido a la falta de recursos involucrados en el estudio de fuentes alternativas de energía. [4].

Este proyecto es factible realizarlo en nuestro país ya que se cuenta con la capacidad, el personal y los materiales necesarios para poder elaborarlo, pero al ser un proyecto que necesita de investigación se realizará un estudio previo para determinar eficiencias, alturas hasta las que se podría utilizar y la cantidad de agua que se necesita para generar el movimiento de la turbina

Estas turbinas se integran sin problemas en diques, riachuelos y mares, este tipo de sistemas alternativos de energía protegen el medio ambiente de igual manera

poseen alto rendimiento, ofrecen alternativas energéticas inagotables y siendo irrelevante la zona de instalación [5].

1.4.Objetivos

1.4.1. Objetivo general

- Diseñar el prototipo de una Turbina Wells para la generación de energía.

1.4.2. Objetivos específicos

- Determinar los parámetros fundamentales para el diseño y construcción de una turbina Wells
- Construir la Turbina Wells
- Realizar pruebas de funcionamiento del prototipo de una turbina Wells

CAPÍTULO II

FUNDAMENTACIÓN

2.1. Investigaciones previas

En la Universidad de Queens, Canadá en un proyecto de investigación fue diseñada la Turbina Wells por Alan A. Wells su objetivo fue desarrollar una turbina que al girar en una sola dirección permitiera un flujo bidireccional [6].

En la Universidad de Oviedo- España de la Escuela de Ingenierías de Minas, Energía y materiales se realizó la tesis de Maestría con el tema, “Análisis de un sistema OWC twin turbines con turbinas radiales” realizada por el Ingeniero Manuel García Díaz, en la cual crea un modelo teórico mediante la ecuación de Euler con la que permite tener una estimación de los datos geométricos de optimización de la turbina, para luego usar un modelo numérico el cual nos servirá para estudiar el comportamiento de la turbina [1].

En el artículo técnico “Generación de Energía Eléctrica a través de una Turbina Wells para dispositivos portátiles” desarrollado por el Ingeniero Mecánico Alfredo Santa con la ayuda del Ingeniero Mecánico Álvaro Pinilla profesor de la Universidad de los Andes Bogotá- Colombia, el cual describe el proceso teórico de diseño y construcción de un Turbina Wells a pequeña escala para producir 50W en un generador de imanes previamente diseñados. El estudio y análisis de cada una de las variables están orientado al montaje del sistema generador turbina y a la construcción del dispositivo para producir las condiciones de flujo oscilante que permitan el funcionamiento de la turbina [4].

El artículo técnico “Diseño de una turbina twin radial de impulso bidireccional para sistemas OWC de Energía Undimotriz” publicado por Laudino Rodríguez García con la ayuda del Doctor B. Pereira del Departamento de Energías de la Universidad de Oviedo- España, analiza el rendimiento de dos turbinas

unidireccionales de tipo radial para el aprovechamiento de la energía undimotriz en sistemas OWC para luego realizar el diseño que facilite el paso del flujo y su aprovechamiento energético obteniendo como resultados que los alabes diseñados para flujos unidireccionales ofrecen rendimientos energéticos aceptables para un amplio rango de presiones que son específicas para el aprovechamiento de la energía undimotriz [7].

En la tesis “Estudio del flujo en un grupo turbinado de dos turbinas axiales bidireccionales para centrales OWC” que fue desarrollado por Pablo Valdez Loaicono en la Universidad de Valladolid, Escuela de Ingenierías Industriales del Departamento de Ingeniería Energética y Fluido mecánica, nos permite identificar el comportamiento del coeficiente de par de una turbina axial y conocer los ángulos de alabe propicios para tener el mayor aprovechamiento también nos enseña una metodología que permite el adecuado dimensionamiento de la turbina para que esta tenga un acople adecuado cámara- turbina y tengo un correcto funcionamiento [8].

El proyecto fin de carrera realizado en España en la Universidad Politécnica de Madrid en el Departamento de Ingeniería Eléctrica en el año 2008 a cargo de Julia Fernández Chozas con el tema “Una aproximación al aprovechamiento de la energía de las olas para la generación de electricidad” la cual nos indica que existen dos formas de generar electricidad la primera son un conjunto de turbinas instaladas bajo el agua que utilizan corrientes provocando que gire el rotor del generador y la segunda forma de generar electricidad consiste que las corrientes inducen un movimiento variable en un sistema hidráulico motor de un generador. Las profundidades varían entre 20 y 30 metros para un mayor potencial del recurso energético[9].

En el artículo técnico realizado en Colombia por la Universidad Militar Nueva Granada por los Ingenieros Mecatrónicos Astrid Rubiano Fonseca, Vladimir Prada Jiménez y el Ingeniero Mecánico Jorge Aponte Rodríguez con el tema “Análisis de la viabilidad del desarrollo de una turbina de flujo bidireccional desde el punto de vista del recurso energético” el cual muestra el uso de la energía undimotriz como fuente de energía alternativa que es aprovechada por el

movimiento de las olas y la transforman en energía mecánica gracias a la Turbina Wells y esta la convierte en energía eléctrica mediante un generador; así de esta manera se creó un modelo matemático y se propuso parámetros de diseño y animaciones con el apoyo del software CAD [10].

En el proyecto de grado previo a la obtención del título de Ingeniero Mecatrónico en la Universidad Militar Nueva Granada de la Facultad de Ingeniería de Mecatrónica por parte de Paola González Ramos con el tema “Estudio del modelamiento matemático de un alabe para una turbina de flujo bidireccional ” la que será de mucha importancia para mi proyecto en la realización de cálculos del alabe de la turbina Wells para un mejor diseño.[11].

En la tesis realizada en la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica presentada por Duran Arturo y Vásquez Everardo con la ayuda del Ingeniero Urbano José con el tema “Generación de energía eléctrica a través de la energía cinética y potencial de las olas en una central undimotriz localizada en Pascuales Colima, México”en el año 2010 en donde gracias a esta tesis podremos saber el funcionamiento correcto de la turbina y los elementos que debemos utilizar como es la camama que se encarga de captar la energía del oleaje, la turbina que transforma la energía captada de la cámara por la energía mecánica y el generador que transforma en energía eléctrica[12].

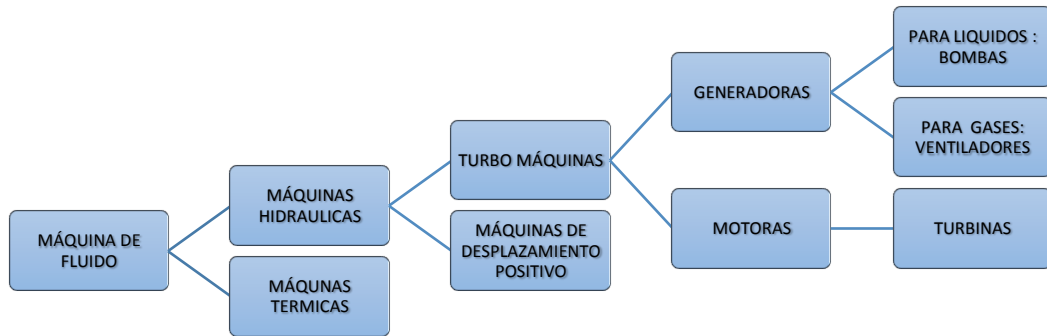
2.2. Fundamentación teórica

2.2.1. Máquinas hidráulicas

Una máquina se puede decir que es hidráulica cuando el límite de cambio, generalmente para los gases no exceda el límite de 100 mbar. En las máquinas hidráulicas se experimenta un ciclo adiabático, lo que quiere decir que no existe intercambio de calor con él[13].

Una máquina hidráulica o de fluido es un sistema mecánico porque intercambian energía con el fluido que circula. Las que aportan energía al flujo como las bombas y las que extraen energía del flujo son las turbinas. Algunas máquinas hidráulicas son: bombas, ventiladores, compresores, turbinas de vapor de gas, tornillos de Arquímedes o ruedas hidráulicas[14].

Las máquinas de fluido se dividen en:



*Figura 2. 1.*Clasificación de las máquinas hidráulicas o de fluido

Fuente:[15]

En la figura 2.1 se encuentra la clasificación de las máquinas hidráulicas o de fluido, se observa que una turbina se encuentra dentro del grupo de las turbomáquinas motoras

Las máquinas de fluido se clasifican según varios criterios como:

- Sentido de transmisión de la energía entre el fluido y la máquina
- Compresibilidad del fluido
- Por su principio de funcionamiento
- Por el encerramiento
- Por el movimiento [15].

2.2.2. Energías alternativas

Existen varias energías como la mareomotriz, undimotriz y térmica oceánica que son renovables, que gracias a su enorme potencial de la energía del mar en el

mundo será en un futuro quien reemplazará a las energías convencionales conocidas actualmente.

Lo importante de obtener energía eléctrica del mar es que no contiene muchos contaminantes ni residuos después de la explotación para el medio ambiente y también nos permite llevar la energía eléctrica donde es difícil el acceso tales como barcos y plataformas.

Algunas energías que aprovechan la energía del mar son:

- Energía de las mareas
- Energías de las olas
- Aprovechamiento del gradiente térmico del mar.

a) Energía mareomotriz

Es una fuente de energía alternativa que aprovecha la energía producida por el movimiento de las olas del mar o la diferencia de alturas entre la pleamar y la bajamar en un salto hidráulico y la convierte por medio de una turbina Wells convencional en energía mecánica y gracias a un generador le convierte en energía eléctrica, también son utilizadas turbinas de altas velocidades como la Kaplan, bulbo y de hélice debido a que necesitan de un alto caudal y de altura pequeña [10].

La primera central mareomotriz se instaló en Francia para la producción de energía eléctrica, la desventaja es que la cantidad de energía que se adquiere con respecto al costo de la creación e instalación de los dispositivos son altos lo que han pausado una proliferación por completo de esta energía.

En la figura 2.2 se muestra las partes de una central mareomotriz, a continuación, se detallan los pasos del funcionamiento de una central mareomotriz son:

- Al momento que sube la marea las compuertas de la central se abren mientras el agua va al embalse
- mientras el agua sube al embalse hasta el máximo nivel o tope las compuertas automáticamente se cierran
- La marea regresa o baja mientras al otro lado del embalse el agua baja

- Se produce la diferencia máxima entre el nivel del mar y el embalse se abren las compuertas de las turbinas para que el agua pase por ahí generando electricidad [16].

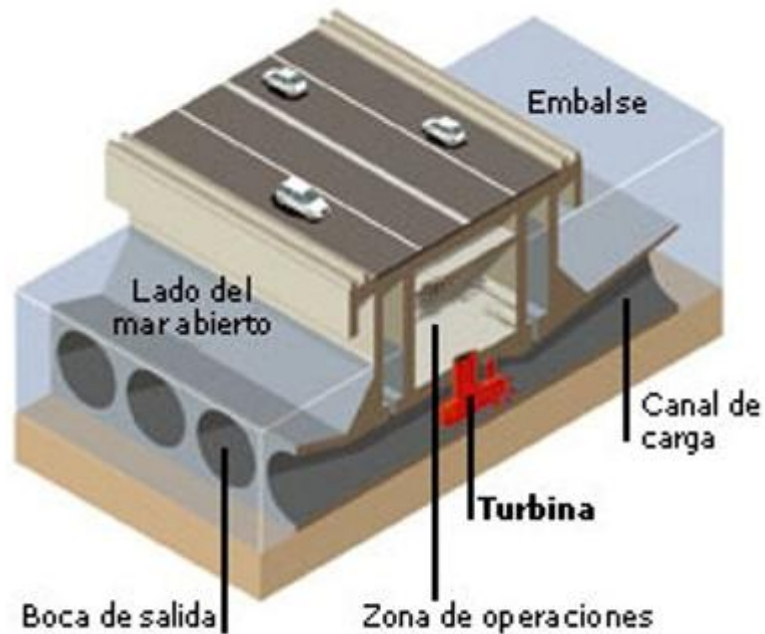


Figura 2. 2. Partes de una central mareomotriz

Fuente: [16].

b) Energía Undimotriz

Se refiere al aprovechamiento de la energía de las olas y es una de las formas más prometedoras de energía renovable. La primera planta de este tipo fue instalada en el 2005 en España.

Para la extracción de la energía de las olas hoy en día existen algunos dispositivos o tecnologías como:

- Columnas oscilantes de agua (OWC)
- Wave Dragón (Dragón de olas)

Columnas Oscilantes de agua (OWC)

En la figura 2.3 se muestra el esquema de un sistema OWC, este método es el más utilizado como convertidor de energía undimotriz hoy en día por ser más económico y sencillo su instalación y diseño.

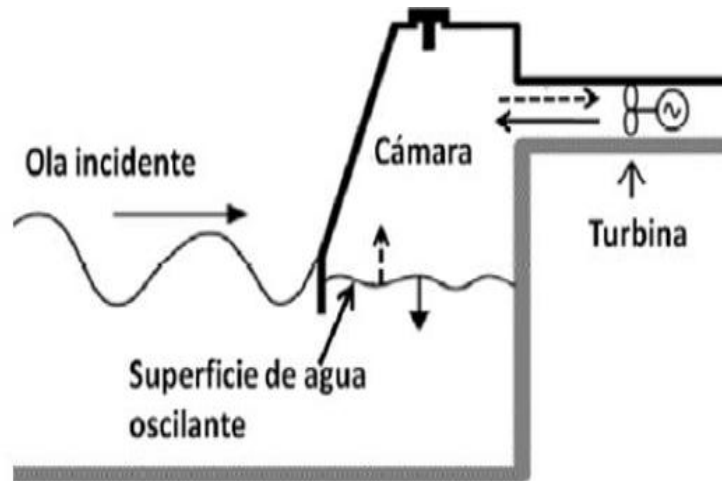


Figura 2. 3. Esquema de un sistema OWC

Fuente:[12]

En la figura 2.4 se muestra el funcionamiento de un sistema OWC, consiste en un tubo hueco que contiene aire que se comprime y expande por efecto de las olas, éstas penetran por la parte inferior y desplazan hacia arriba una columna de aire aumentando la presión, una turbina situada en el extremo superior del tubo aprovecha la energía de aire. [16].

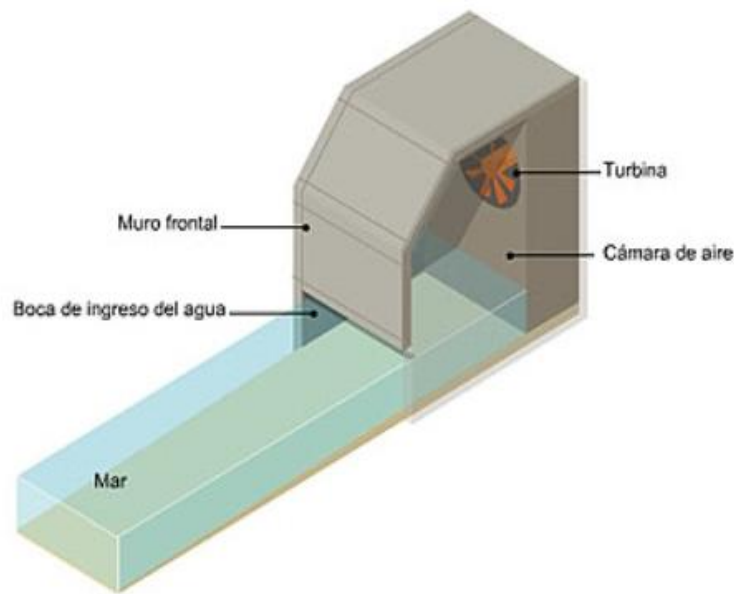


Figura 2. 4. Funcionamiento de un sistema OWC

Fuente: [16].

El funcionamiento de un sistema OWC es:

En la cámara de aire ingresan las olas al chocar con el muro frontal

En la cámara se queda el aire y al subir el nivel del agua otra vez, el aire a presión que se encuentra en la cámara impulsa y mueven las alabes de la hélice que están en la turbina

Mediante un eje conectado a un generador genera la electricidad [16]

Wave Dragon (Dragón de olas)

En la figura 2.5 se muestra el funcionamiento de este dispositivo, consta de una parte móvil que es la turbina, los otros componentes están en el fondo del mar anclados a una profundidad de 30 metros aproximadamente también posee una rampa reflectora que es utilizada para minimizar la pérdida de energía de la ola.[17]

Este mecanismo consta de tres fases:

- Absorción. - Se retiene de las olas lo que excede de un nivel fijo gracias a una barrera

- Almacenamiento. -se realiza por medio de un estanque flotante
- Conversión. - en esta fase se deja caer el agua hacia la turbina haciéndole esta girar solo abriendo el estanque flotante y por medio del mecanismo de aprovechamiento se convierte la energía mecánica en eléctrica[17].

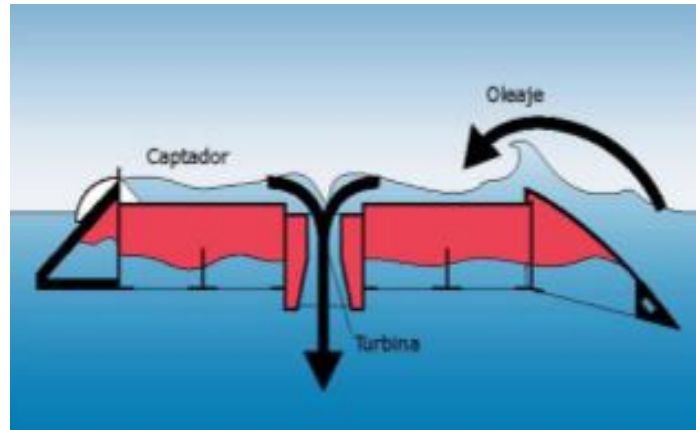


Figura 2. 5. Funcionamiento del Dragón de olas.

Fuente: [17].

c) Energía térmica oceánica

En 1930 se construyó la primera central de energía mareomotérmica en Cuba, aunque años después dejó de existir, luego en Hawái se instaló una planta de producción eléctrica de potencia de 15 kW[16].

En la figura 2.6 se observa una planta mareomotérmica, esta energía trata de las diferencias de las temperaturas entre el agua de la superficie y las superficies de las profundidades del mar aproximadamente 100 metros, en zonas tropicales estas variaciones superan los 20 grados centígrados[16].

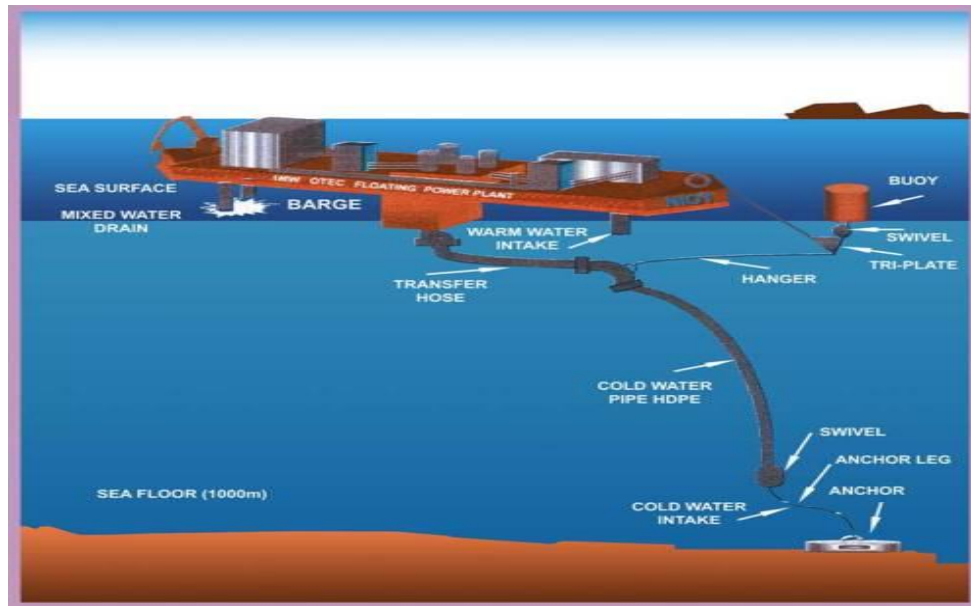


Figura 2. 6. Planta energía mareomotérmica

Fuente: [16].

La desventaja de la instalación de estas plantas son los altos costos económico y las contaminaciones del medio ambiente, existen algunas ventajas como los alimentos y el agua potable ya que como el agua fría de las profundidades es rica en sustancias nutritivas y sin agentes patógenos[16].

2.2.3. Turbomáquinas

En estas máquinas hidráulicas el fluido al atravesar por los rodetes cambia su cantidad de movimiento causando sobre estos una fuerza que genera movimiento que al desplazarse conjuntamente con el álabe produce un trabajo interior en el eje, cuando se trata de turbomáquinas existe una transformación de energía del flujo a energía mecánica situada en el eje de la máquina[18].

2.2.3.1. Clasificación de las turbomáquinas

2.2.3.1.1. Turbomáquinas generatrices

Son aquellas que incrementan la energía del fluido que circula ya sea en forma potencial o cinética. La energía mecánica que estas consumen para su operación es proporcionada por un motor, pudiendo ser de dos tipos

- ✓ Bombas de álaves: Se mencionan a las bombas axiales y centrifugas

- ✓ Hélices Marinas: Su funcionamiento se presenta de forma diferente a la anterior, suministra la fuerza de empuje sobre las carena del buque[18].

2.2.3.1.2. Turbomáquinas motrices

Este tipo de turbomáquinas receptan la energía perdida por el fluido que las atraviesan, provocando así la transformación a energía mecánica, este tipo de máquinas se presentan de la siguiente manera

- ✓ Estáticas o de presión, como son por ejemplo helicoidales, de engranajes y de paletas
- ✓ Dinámicas o cinéticas, como son las turbinas y ruedas hidráulicas[18].

2.2.3.1.3. Turbomáquinas reversibles

Estas turbomáquinas son tanto generatrices como motrices, realizan una serie de operaciones que quedan resguardadas por un rotor específico, las más importantes son las siguientes:

- ✓ Grupos bulbo: se utilizan para el aprovechamiento de centrales mareomotrices y pequeños saltos
- ✓ Grupos turbina – bomba: estas se ocupan para aplicaciones como centrales eléctricas de acumulación por bombeo [18].

2.2.3.1.4. Grupos de transmisión o acoplamiento

Se presentan como una mezcla de las turbomáquinas motrices y generatrices, es decir un ensamble entre una bomba y la turbina, suministrados en una conexión hidráulica cerrada por un fluido, comúnmente aceite, a este grupo pertenecen los denominados cambiadores de par[18].

2.2.4. Turbina

La turbina es una turbo máquina motora y por lo tanto es una bomba rotodinámica que trabaja al revés, la turbina absorbe energía potencial del fluido y restituye energía mecánica teóricamente suministrando energía hidráulica a la máquina e invirtiendo el flujo[19].

2.2.4.1. Clasificación de las turbinas

Según su grado de reacción:

- De acción o impulsión
- De reacción o sobrepresión[19].

2.2.4.2. Turbinas de acción

En la figura 2.7 se muestra la turbina de acción, del distribuidor sale el agua a la presión atmosférica llega al rodete con la misma presión y toda la energía potencial del salto se traspassa al rodete en forma de energía cinética; aquí el empuje y la acción del agua coinciden en el mismo sentido[19].

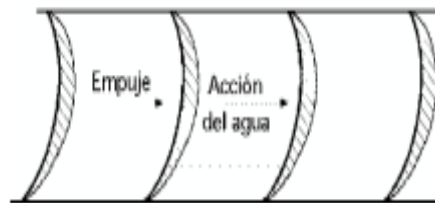


Figura 2. 7. Turbina de acción

Fuente:[19]

2.2.4.3. Turbinas de reacción

En la figura 2.8 se muestra el esquema de una turbina de reacción; con una cierta presión sale el agua del distribuidor y va memorando mientras pasa por los álabes del rodete por lo tanto la presión a la salida es nula o negativa también y la energía potencial del salto se convierte en energía cinética y en energía de presión[19]



Figura 2. 8. Esquema de una turbina de reacción

Fuente:[19]

Depende la dirección del agua a la entrada las turbinas se dividen en:

- Axiales
- Radiales

- Mixtas
- Tangenciales[19].

De acuerdo a la disposición de giro se dividen en:

- De eje horizontal
- De eje vertical[19].

2.2.5. Sistema OWC

En un sistema OWC se suelen utilizar turbinas bidireccionales y la parte principal es la turbina y esta va de acuerdo a su diseño y trabajo bajo las condiciones de funcionamiento como:

- Amplitud de rango del funcionamiento
- Bidireccionalidad del flujo
- Velocidad de rotación[20]

Los tipos de turbinas de flujo bidireccional existentes son las turbinas Wells que son turbinas de reacción y las turbinas de impulso [20]

2.2.6. Turbina Wells

Existen diferentes tipos de turbinas Wells como:

- Convencional
- Con aletas directrices
- Biplano
- Biplano contrarrotante
- Con alabes orientables

2.2.6.1. Turbina Wells convencional

La turbina Wells es magnífica y muy útil para trabajar en un flujo bidireccional es muy utilizada por sistemas OWC, esta turbina posee un rodete formado por perfiles aerodinámicos que están ubicados perpendicular al eje de giro con un número específico de aspas o álabes distribuidos alrededor de un tubo central, gracias a su geometría simétrica no funciona como bomba y gira en el mismo sentido siempre. Mientras el flujo pasa a través del conducto, y luego por los

álabes, se generan fuerzas de arrastre y sustentación sobre cada uno de los álabes. La composición de las fuerzas induce un par de giro sobre el rodete[20].

En la figura 2.9 se muestra el triángulo de velocidades del perfil, el par de giro inducido por F siempre tiene el mismo sentido, independientemente de que el flujo sea de inhalación o de exhalación. No ocurre lo mismo con la otra componente de la fuerza F_x que generará un empuje axial oscilante sobre el rodete. Los triángulos son iguales en los dos modos de funcionamiento pero de sentido inverso, en el dibujo se muestran los correspondientes con la exhalación[20].

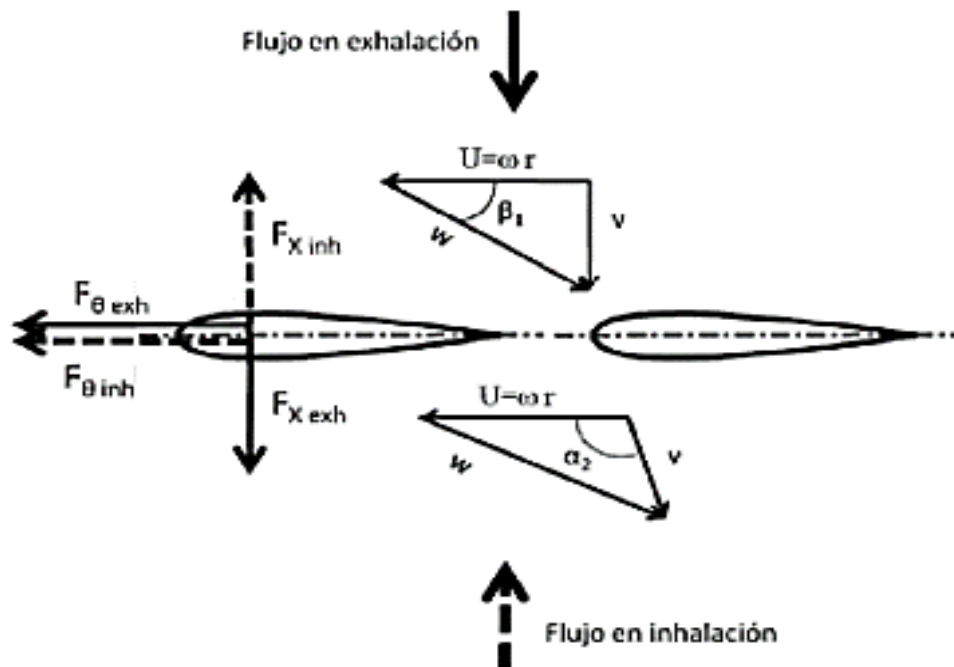


Figura 2. 9. Triangulo de velocidades

Fuente:[20]

El rendimiento de la turbina depende del ángulo de ataque del flujo porque éste determina el patrón de flujo en torno a los álabes. Teniendo esto en cuenta es obvio que la turbina Wells, para poder operar a alto rendimiento, tiene que trabajar bajo condiciones de flujo restringidas[20].

Es importante que la turbina sea capaz de arrancar por sí misma y que consiga alcanzar la velocidad de giro óptima. La aceleración de la turbina depende del par

que genera el flujo sobre los álabes, y éste es función del coeficiente de fuerza en la dirección tangencial[20].

Aspectos como la solidez, tipo de perfil, holgura de punta, hacen que los problemas inherentes a la naturaleza de este tipo de turbina sean más o menos acusados[20].

Los inconvenientes que tiene esta turbina están asociados con el caudal circulante. Para una ω fija, a coeficientes de flujo bajos la turbina tiene su funcionamiento limitado porque el par generado es muy bajo o negativo, mientras que a coeficientes de flujo altos el ángulo de incidencia es muy grande y se produce desprendimiento, lo cual reduce también las prestaciones[20].

Estas dos situaciones, teniendo en cuenta que el flujo es oscilante, y que la ω se mantiene constante, reducen el rendimiento medio de la turbina[20].

Otro problema es que la bidireccionalidad del flujo provoca que la fuerza axial ejercida sobre el rodete sea oscilante, esto puede convertirse en un problema dinámico importante[20].

Para solventar los problemas que se plantean en su funcionamiento se crearon diversas soluciones, por ejemplo: velocidad variable, el ángulo de incidencia, álabes orientables, aletas directrices, válvula by-pass reguladora del caudal, doble rodete. Algunas de estas soluciones han demostrado su validez en ensayos experimentales, e incluso algunas se han construido a tamaño real y operan en plantas OWC[20].

Partes o elementos

Rodete

Es la parte más importante de la turbina en el rodete pueden ir de 4 a 8 álabes de acuerdo al diseño que se desee.

Perfil alar

En la figura 2.10 se muestra un perfil alar; este elemento es de mucha importancia en el diseño de superficies sustentadores como los álabes, es la forma plana que al

desplazarse a través del aire es capaz de crear a su alrededor una distribución de presiones que genere sustentación.

Los perfiles pueden ser finos, gruesos, curvos, poligonales, simétricos o también pueden ir variando a lo largo del ala según la forma del diseño que se requiere y las necesidades del diseñador para su utilización

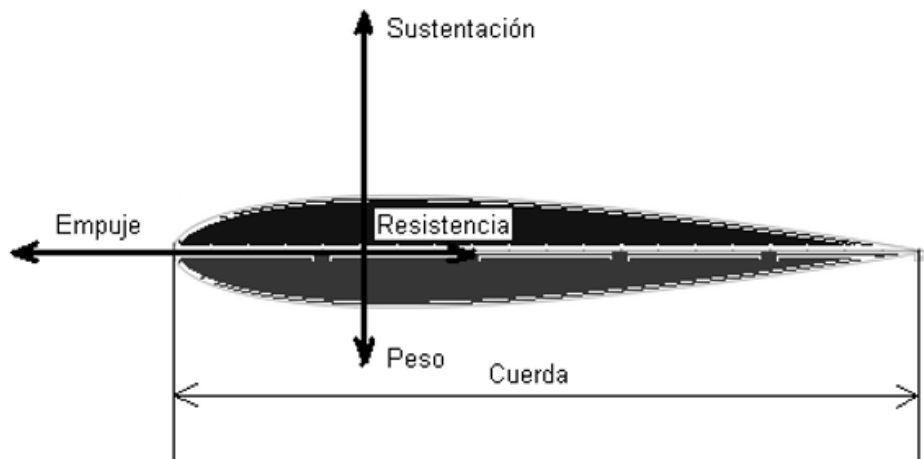


Figura 2. 10. Perfil alar

Fuente:[10]

El perfil aerodinámico seleccionado para este tipo de turbinas suele ser de tipo NACA y los más utilizados son los perfiles de la serie Naca de familia de 4 dígitos donde:

- el primer dígito especifica el ángulo de caída máximo en porcentaje de la cuerda es decir la longitud de la superficie de sustentación
- el segundo dígito indica la posición de la curvatura máxima en decimas de acorde
- el tercer y cuarto dígito proporcionan el máximo espesor de la superficie de sustentación en porcentaje de acorde.

Se debe escoger un perfil Naca con un ángulo de ataque con un rango de 6° y 13° para que la corriente de aire forme una fuerza F_t suficiente para poder provocar el movimiento rotacional de los álabes de la turbina[21]

2.2.6.2 Turbina Wells con aletas directrices

En la figura 2.11 se muestra la turbina Wells con aletas directrices, esta turbina en el momento de su construcción se le aumentan dos coronas de aletas directrices a los dos lados del rodete de la turbina. Cada una de las coronas cumplen una función cuando están aguas arriba del rodete de tal forma que solo es útil en un sentido del flujo[12].

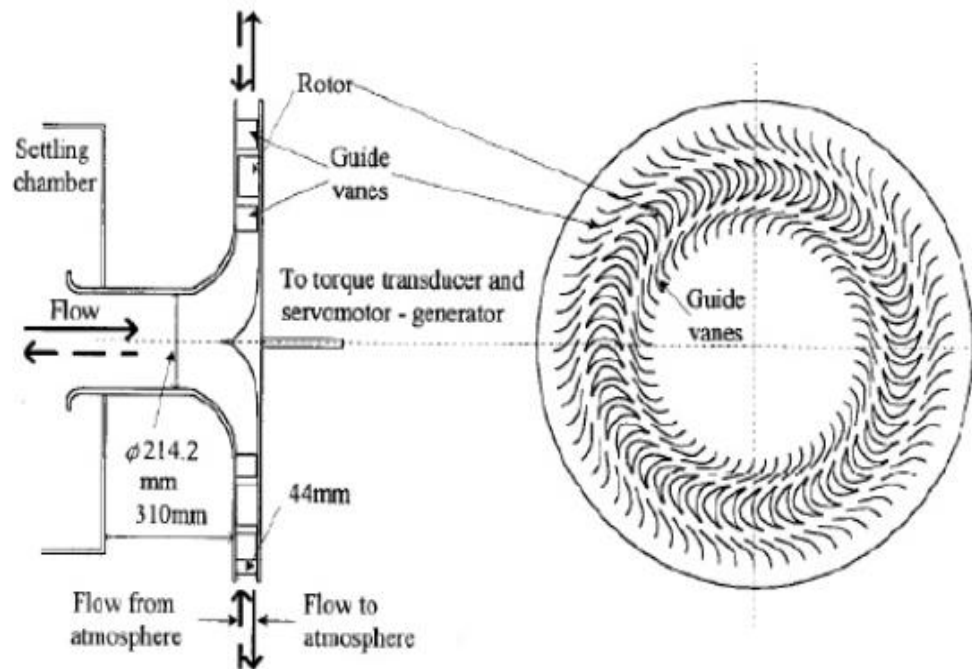


Figura 2. 11. Turbina Wells con aletas directrices

Fuente:[22]

Las turbinas Wells mejoran con la instalación de las coronas directrices ya que aumentan el par generado de la turbina y aumenta su rendimiento un 10%. La utilización es importante ya que el flujo es cíclicamente de inhalación y exhalación[12].

2.2.6.3 Turbina Wells biplano

La turbina multietapa es muy eficiente igual a una Wells monoplano; se necesita la implementación de aletas directrices entre las diferentes etapas con lo cual se produce un aumento de complejidad y costo al momento de su construcción. Más

simple que la turbina multietapa es la turbina Wells multiplano como la biplano esta turbina se trata de montar dos planos de álabes a un mismo eje[12].

En la figura 2.12 se muestra el esquema de la turbina Wells biplano, aquí el primer rodete funciona como una Wells monoplaneo mientras el otro rodete posee un ángulo de incidencia que depende de lo que suceda en el otro rodete[12].

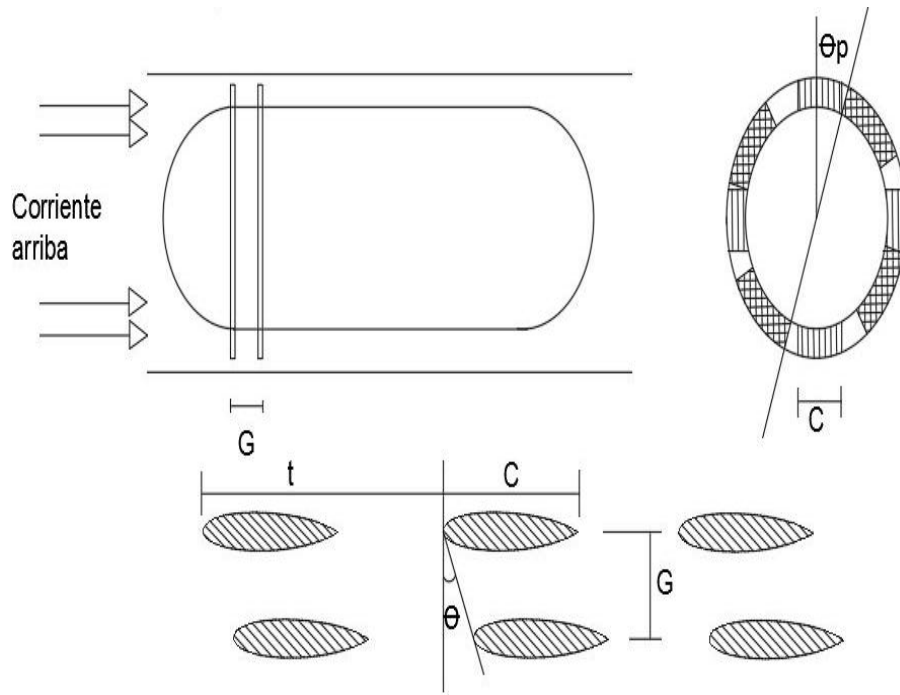


Figura 2. 12. Esquema de una turbina Wells biplano

Fuente: [12]

2.2.6.4 Turbina Wells biplano contrarrotante

En la figura 2.13 se muestra el esquema de la turbina Wells contrarrotante, esta turbina en un sistema OWC es capaz de generar saltos de presión más grandes que los de una Wells convencional. También es una de las turbinas que fue ensayada en una Central de Limpet que consiste en dos turbinas Wells girando en sentidos contrarios[12].

El problema de esta turbina es que muestra un rendimiento no tan bueno como el de otras turbinas ya que al ser dos rodets contrarrotantes estos deben ir montados en ejes distintos lo que dificulta la instalación porque necesita un sistema de transmisión que conecte a los dos ejes[12].

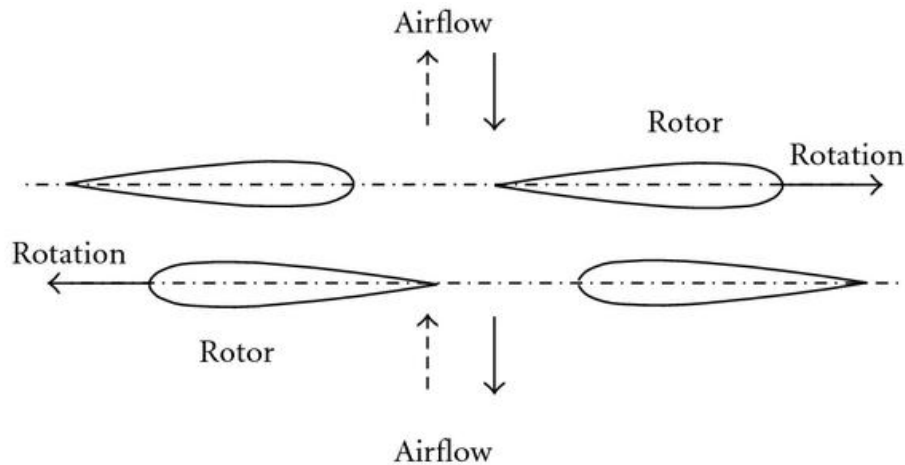


Figura 2. 13. Esquema de una turbina Wells contrarrotante

Fuente: [12]

2.2.6.5 Turbina Wells con álabes orientables

En la figura 2.14 se muestra el rodete de la turbina Wells con álabes orientables, su función principal es la capacidad de modificar el ángulo de incidencia del flujo para optimizar su funcionamiento, esto se da ya que los álabes pivotan sobre sí mismos y aumenta el rendimiento máximo ya que el alabe está orientado de forma que se consigue el par máximo de la turbina[12].

Los álabes orientables pueden combinarse con aletas directrices los cuales mejoran notablemente el rendimiento de la máquina, en los últimos años esta turbina es muy experimentada e investigada, la desventaja es su alto costo[12].

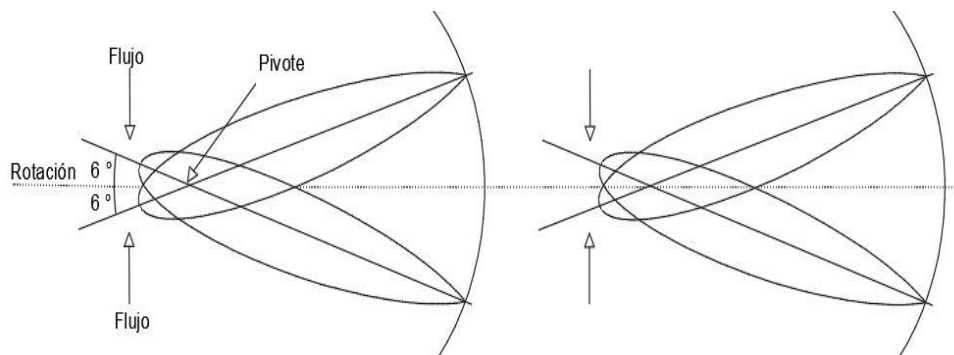


Figura 2. 14. Rodete de una turbina Wells con álabes orientables

Fuente:[12].

CAPÍTULO III

DISEÑO DEL PROYECTO

3.1. Selección de alternativas

Alternativa 1

La turbina Wells convencional es la más utilizada y factibles en este tipo de proyectos.

Ventajas

- Fácil diseño
- Fácil construcción
- Funciona a velocidades variables aproximadamente 1000 a 2000 rpm con flujos de aire a baja velocidad
- Utiliza generadores más económicos debido a la alta velocidad de rotación del rotor
- Comportamiento a caudales bajos, gracias a su geometría simétrica cuando el caudal circulante es reducido
- No emiten gases tóxicos u otras emisiones que afecten al medio ambiente[9].

Desventajas

- Con flujos de aire que sobrepasan el valor crítico en pérdidas aerodinámicas, provocan que la potencia saliente del sistema disminuya
- Con flujos de aire pequeños producen pares bajos o negativos
- Poseen un diámetro demasiado grande con relación a la potencia que se puede extraer[9].

Alternativa 2

Turbina Wells biplano

Esta turbina posee dos planos con el rotor conectado al mismo eje lo cual hace que los dos tengan la misma velocidad de rotación, se debe tomar muy en cuenta la interacción aerodinámica entre los dos rodets que son:

1. Influencia del campo de velocidades de un plano sobre el otro, esto se debe a que la succión en la cara de baja presión de uno de los dos rodets se reduce y retrasa el desprendimiento[23]
2. Efecto de la estela del primer rodete, este efecto depende de la posición relativa de los dos rodets ya que pueden estar desfasados[23]

Ventajas

- Es mucho mayor en el biplano el salto de presión provocando extraer más potencia
- Es capaz de trabajar a mayor rango de caudales
- Con el rodete aguas abajo funciona de mejor manera
- Pueden llegar a un rendimiento máximo de 60% [12].

Desventaja

- Se aumentan más aletas directrices en cada etapa y por eso aumenta el costo en la construcción
- La eficiencia es menor
- Mayor complejidad en la construcción y en las pruebas de funcionamiento.

Alternativa 3

Turbina Wells biplano contrarrotante. Son básicamente dos turbinas Wells, consta de dos rotores estos situados uno al lado del otro en sentido de rotación es decir en direcciones opuestas para que no coincidan el flujo del estator. El rotor se encuentra aguas abajo que recupera el remolino generado, aguas arriba se produce un flujo axial que salen de los rotores[23]

Ventajas

- Tiene un mejor aprovechamiento en la entrada de aire en el rotor de la turbina ayudando generar mayor número de revoluciones
- Gracias a los dos rotores que posee trabaja con más velocidad y posee un mejor arranque de la turbina

Desventajas

- Los estudios realizados en la central Limpe dejando como resultado que los valores obtenidos se encuentran muy alejados de los previstos en los modelos matemáticos
- El rendimiento que se obtienen de esta turbina no alcanzan ni el 33%
- Deben ser montados los rodets en ejes independientes por lo que es necesario un sistema de transmisión que conecte a los dos ejes
- Altos costos de construcción y fabricación[23].

Evaluación de soluciones

Método ordinal de criterios ponderados

Se realizó esta selección de alternativas mediante la metodología de Riba R, es un método muy utilizado y recomendado por que se obtienen resultados verdaderos, este método está basado en tablas el cual consta de criterios donde se van cotejando con los otros criterios uno a uno y se le dan valores como se muestra a continuación.

- Valor de 0 cuando el criterio de la fila es inferior que el de las columnas
- Valor de 0.5 cuando el criterio de la fila es igual al de las columnas
- Valor de 1 cuando el criterio de la fila es superior que el de las columnas

Después, se deben sumar cada uno de los criterios con los valores asignados en relación a los restantes al cual se le da una unidad para que el criterio menor no sea nulo y en otra columna se calculan los valores para cada criterio. Para poder finalizar, se hace una suma total de los productos de los pesos específicos de cada solución por el peso específico del respectivo criterio.

Criterios de evaluación

- Facilidad de construcción
- Bajo costo
- Diseño
- Pruebas accesibles

Descripción de criterios

- **Facilidad de construcción:** este criterio fue analizado con respecto a todos los componentes que se van a utilizar para su construcción y ensamblaje y también tomar en cuenta las herramientas o maquinas disponibles en el país para la realización de la turbina.
- **Bajo costo:** es muy importante este criterio para la adquisición de materiales, materia prima, máquinas, equipos a utilizar y la mano de obra sea de buena calidad y este a disposición en el mercado.
- **Diseño:** se realizará con la ayuda de dos softwares como SolidWorks y AutoCAD.
- **Pruebas accesibles:** facilidad para realizar en cualquier tipo de lugar como mares ríos, diques y piscina y tanques.

A continuación, vamos a realizar los análisis mediante las tablas correspondientes para la selección de alternativas y poder escoger la mejor alternativa para poder realizar el diseño y construcción del prototipo de la turbina Wells con el fin de generar energía eléctrica.

Tabla 3. 1. Evaluación del peso específico de cada criterio

Criterio	Facilidad de construcción	Bajo costo	Diseño	Pruebas accesibles	$\Sigma+1$	Ponderación
Facilidad de construcción		1	1	0,5	3,5	0,35
Bajo costo	0		0	0	1	0,10
Diseño	0	1		1	3	0,30
Pruebas accesibles	0,5	1	0		2,5	0,25
				Total	10	1

Fuente: Autor

Tabla 3. 2. Evaluación del peso específico del criterio de facilidad de construcción

Criterio	Alternativa I	Alternativa II	Alternativa III	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa I		1	1	3	0,50
Alternativa II	0		1	2	0,33
Alternativa III	0	0		1	0,17
			Suma	6	1

Fuente: Autor

Tabla 3. 3. Evaluación del peso específico del criterio de bajo costo

Criterio	Alternativa I	Alternativa II	Alternativa III	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa I		1	1	3	0,50
Alternativa II	0		0	1	0,17
Alternativa III	0	1		2	0,33
			Suma	6	1

Fuente: Autor

Tabla 3. 4. Evaluación del peso específico del criterio de diseño

Criterio	Alternativa I	Alternativa II	Alternativa III	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa I		1	1	3	0,50
Alternativa II	0		0,5	1,5	0,25
Alternativa III	0	0,5		1,5	0,25
			Suma	6	1

Fuente: Autor

Tabla 3. 5. Evaluación del peso específico del criterio de pruebas accesibles

Criterio	Alternativa I	Alternativa II	Alternativa III	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa I		0,5	0,5	2	0,33
Alternativa II	0,5		1	2,5	0,42
Alternativa III	0,5	0		1,5	0,25
			Suma	6	1

Fuente: Autor

Tabla 3. 6. Evaluación del peso específico Alternativa/ Criterio

Criterio	Facilidad de construcción	Bajo costo	Diseño	Pruebas accesibles	Σ	Prioridad
Alternativa I	0,175	0,05	0,15	0,082	0,457	1
Alternativa II	0,116	0,017	0,075	0,105	0,313	2
Alternativa III	0,059	0,033	0,075	0,063	0,23	3

Fuente: Autor

De acuerdo a la tabla 3.6.se obtuvo que la mejor alternativa para la elaboración de la turbina de acuerdo con los criterios expuestoses la turbina Wells convencional (alternativa I)

3.2. Cálculos

3.2.1. Selección del perfil

Para la selección del perfil se toma en cuenta los diferentes tipos NACA que se utilizan para las turbinas Wells, dado que deben ser simétricos los perfiles se va a realizar el estudio de cada uno como son el NACA 0018, NACA 0021 y NACA 0024.

Para obtener un ángulo de ataque de cada perfil se entra a las gráficas en el programa Airfoil Tools el cual es un software libre que se encuentra en el internet yse escoge el perfil, se traza una línea tangente en la gráfica C_l vs C_d desde el punto cero y se encuentra el coeficiente de sustentación C_l y el coeficiente de arrastre C_d , así mismo se traza una línea recta desde la otra gráfica hasta que se cruza una vertical y así se obtiene el ángulo de ataque para cada perfil como se muestra en las figuras 3.1, 3.2, 3.3.

Perfil NACA 0018

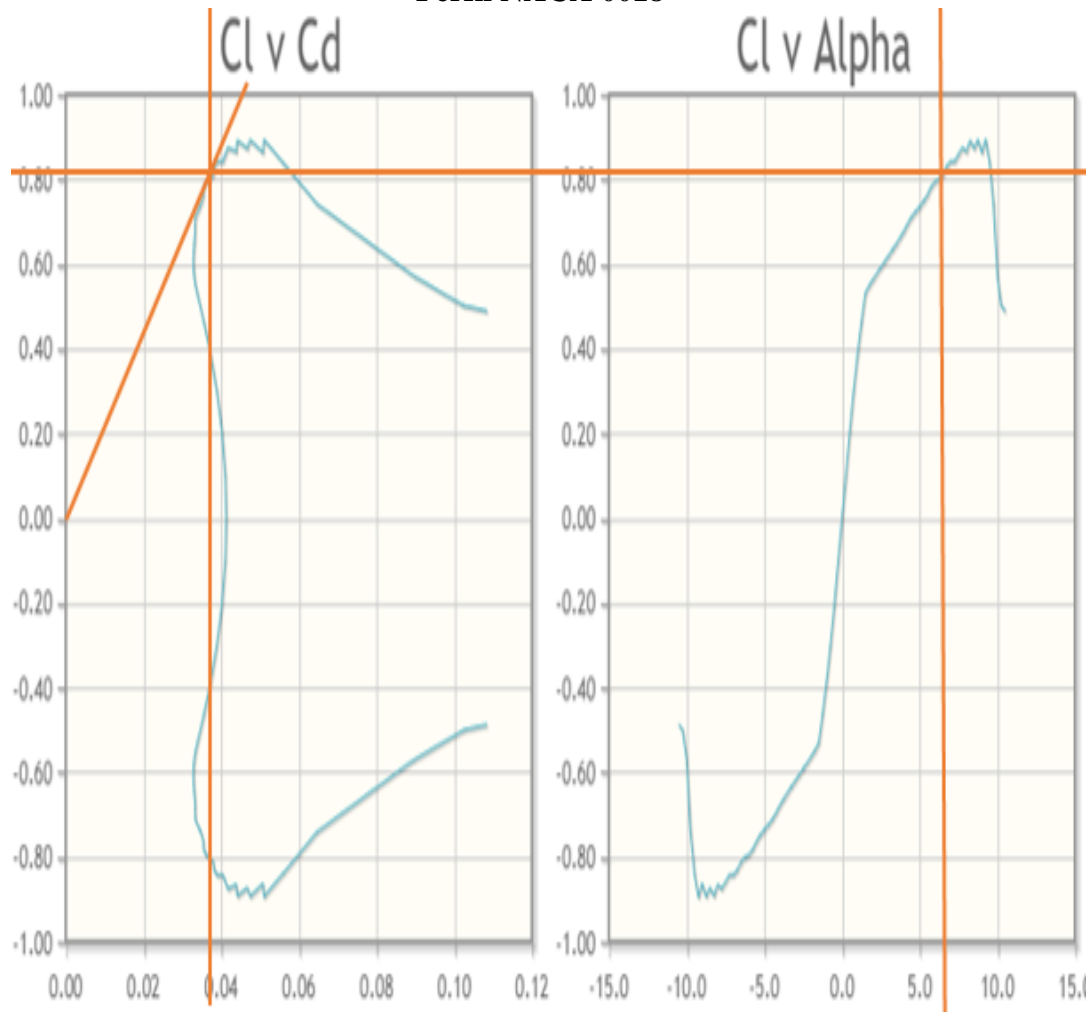


Figura 3. 1. Cl vs Cd – Cl vs α (perfil 0018)

Fuente: Autor

En la figura 3.1 se observa el perfil NACA 0018, en la gráfica de la izquierda en el eje “x” se encuentra la variable Cd que representa al coeficiente de arrastre, en el eje “y” se encuentra la variable Cl que representa al coeficiente de sustentación, en la gráfica de la derecha en el eje “x” se muestra la variable α que representa el ángulo de ataque, en el eje “y” se ubica Cl que es el coeficiente de sustentación y de la misma forma se realiza con los otros perfiles y gráficas 3.2 y 3.3.

Cl= 0.81

Cd= 0.038

$\alpha= 6.5^\circ$

Perfil NACA 0021

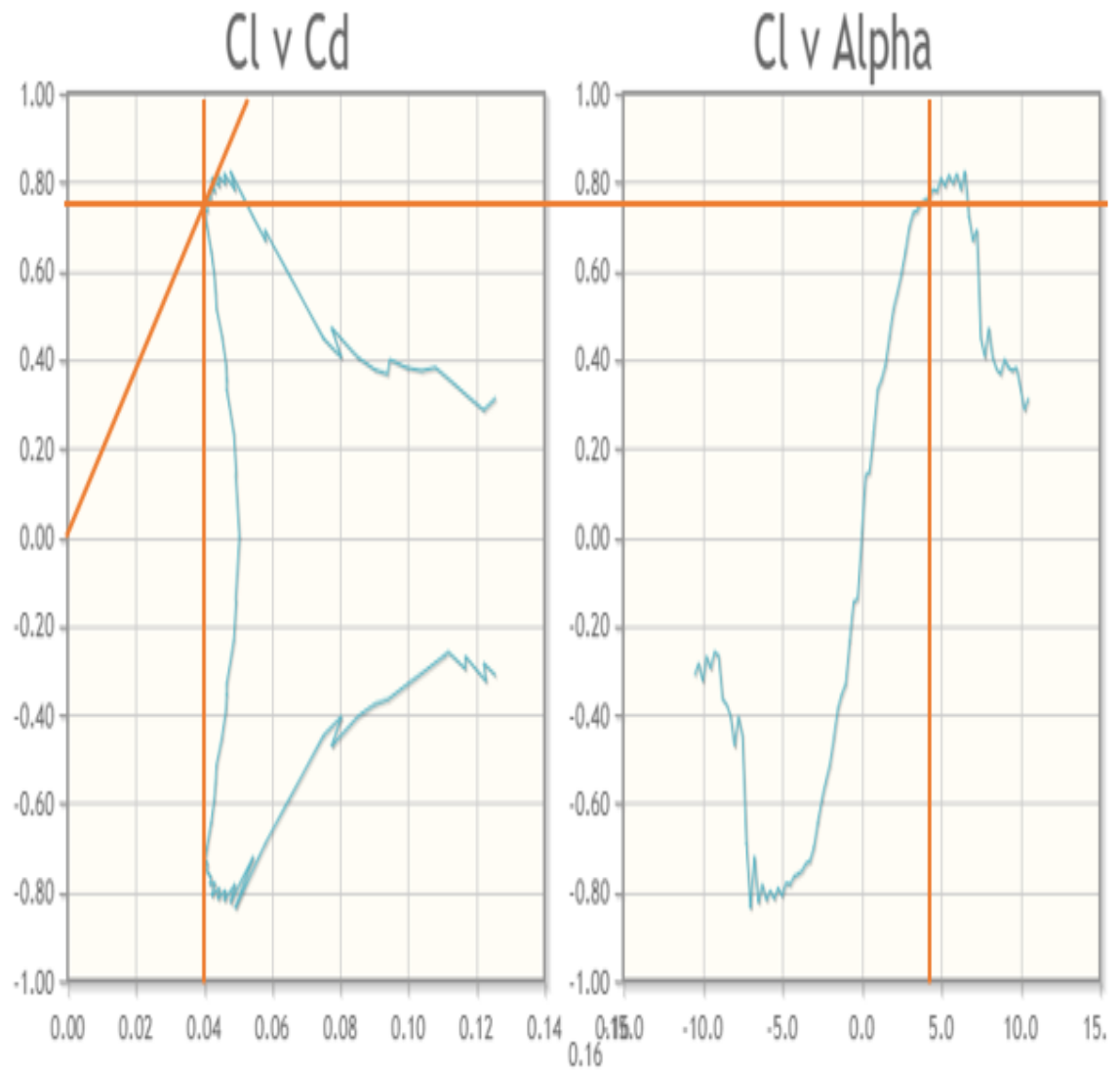


Figura 3. 2. C_l vs C_d – C_l vs α (perfil 0021)

Fuente: Autor

$C_l = 0.76$

$C_d = 0.04$

$\alpha = 4.5^\circ$

Perfil NACA 0024

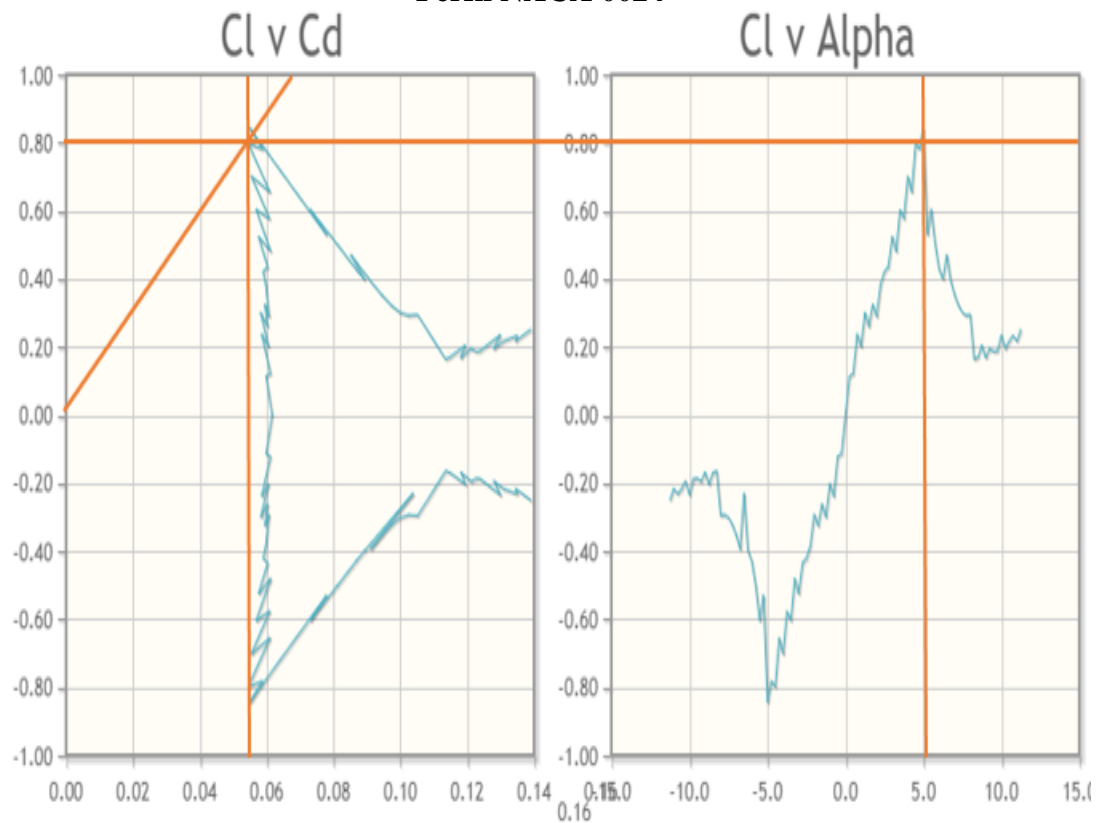


Figura 3. 3. Cl vs Cd – Cl vs α (perfil 0024)

Fuente: Autor

$Cl = 0.80$

$Cd = 0.056$

$\alpha = 5^\circ$

Una vez obtenidos los ángulos de ataques de los 3 perfiles se escoge el ángulo que se encuentra entre 6 y 13° que es el más recomendado para los perfiles alares y que se utilizan para las turbinas Wells como se observa en la tabla 3.7[21]

Tabla 3. 7. NACA 0018-0021-0024

Perfiles NACA	0018	0021	0024
Ángulo de ataque	$6,5^\circ$	$4,5^\circ$	5°

Fuente: Autor

El perfil seleccionado sería el NACA 00018 por que tiene un ángulo de 6.5°, para corroborar que el escogido es el correcto se procede a realizar la diferencia y la relación de los coeficientes, siendo la mejor opción la que tiene el máximo valor como se muestra en la tabla 3.8

Tabla 3. 8. Diferencia y relación de los perfiles NACA 0018-0021-0024

Perfiles NACA	0018	0021	0023
CL	0,81	0,76	0,8
Cd	0,038	0,04	0,056
Cl-Cd	0,772	0,72	0,744
Cl/Cd	21,3157895	19	14,2857143

Fuente: Autor

Con la ayuda del programa Airfoil Tools obtenemos las coordenadas del perfil alar NACA 0018 como se muestra en el Anexo 1, estos datos se insertan en el programa Excel para tener el perfil el cual se exporta al software SolidWorks para poder obtener el perfil de los álabes de la turbina.

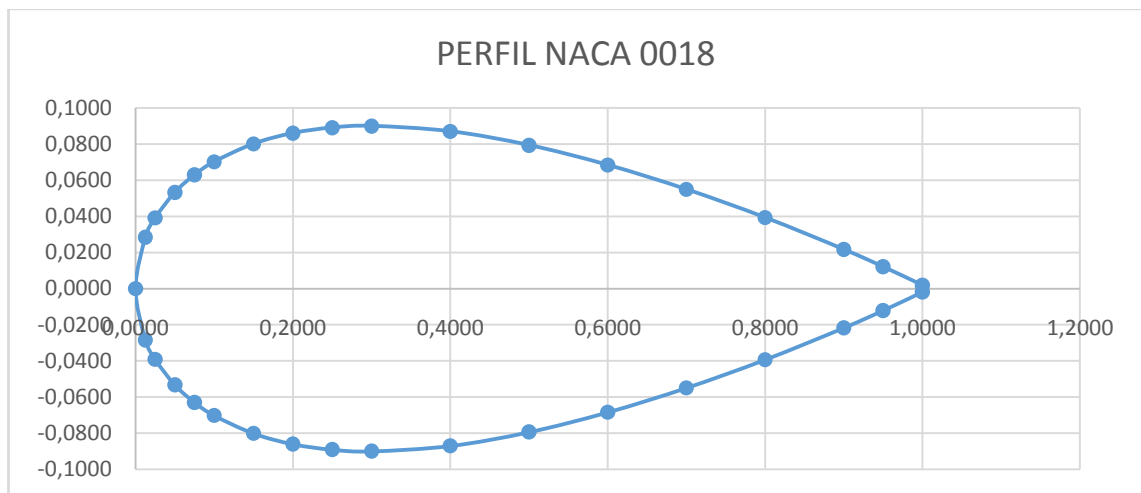


Figura 3. 4. Valores del perfil NACA 0018

Fuente: Autor

El perfil NACA 0018 es el adecuado para trabajar en este proyecto, los valores obtenidos nos ayudaran luego para encontrar las fueras de sustentación y de arrastre.

3.2.2 Parámetros de diseño

a) Número de álabes

Es un elemento independiente para el diseño de la turbina, se pueden trabajar de 4 a 8 álabes y escojo el valor medio del rango.

$$B = 6$$

b) Ángulo dedistribución de los álabes

En el diseño del álabe este es un parámetro esencial, para poder obtener una distribución correcta de cada uno de los álabes en el rodete, se utiliza la ecuación número 1.

$$\theta = \frac{360}{B} \quad (1)$$

$$\theta = 60^\circ$$

c) Diámetro exterior

Este es un parámetro de entrada y como es un prototipo propio me impongo este valor para realizar el diseño

$$De = 0.2 \text{ m}$$

d) Solidez de la turbina

Es un elemento muy importante para la determinación geométrica y el comportamiento de la turbina, el valor mínimo es de 0.6 para obtener un arranque correcto, ya que lo que necesitamos es tener una velocidad de rotación alta.[11]

$$\sigma = 0.6$$

e) Diámetro interior

Para calcular este valor se utiliza la fórmula que es la ecuación número 2 y está expresada de la siguiente manera [11]

$$\sigma = \frac{r_i}{r_e} \quad (2)$$

$$r_i = \sigma * r_e$$

Donde:

r_e = radio exterior de la turbina [m]

r_i = radio interior de la turbina [m]

$$r_i = 0.06 \text{ m}$$

Por lo tanto:

$$D_i = 0.12 \text{ m}$$

f) Envergadura

También conocida como holgura este parámetro nos permite encontrar el valor de la diferencia entre el radio exterior y el radio interior de la turbina mediante la ecuación número 3 que se presenta a continuación[11]

$$h = r_e - r_i \quad (3)$$

$$h = 0.040 \text{ m}$$

g) Áreatotal del rodete

Para obtener el área total del rodete primero debemos obtener el área del disco con la ayuda del diámetro interior, luego calculamos el área de los 6 álabes y restamos el área del eje que a calcular luego.

$$A_{\text{total}} = A_{\text{disco}} + A_{6\text{ala}} - A_{\text{eje}} \quad (4)$$

Donde:

A_{disco} = área del disco [m^2]

$A_{6\text{ala}}$ = área de los 6 álabes se calcula con la ayuda del solidworks [m^2]

A_{eje} = área del eje [m^2]

$$A_{\text{disco}} = 0.0113 \text{ m}^2$$

$$A_{\text{eje}} = 0.000032 \text{ m}^2$$

$$A_{\text{ala}} = 0.0066 \text{ m}^2$$

$$A_{\text{total}} = 0.018 \text{ m}^2$$

h) Velocidad del aire

Se representa con la letra “U” y para poder calcular la velocidad vamos a tomar en cuenta la ecuación número 5 que es la fórmula del ángulo de la velocidad efectiva que es [11]

$$\tan \alpha = \frac{U}{\Omega_r + U_t} \quad (5)$$

Donde:

U_t = velocidad inducida

Ω_r = es la velocidad angular por el radio [11]

$$\Omega_r = \Omega * r_e \quad (6)$$

Después de despejar la velocidad angular por el radio nos queda la siguiente ecuación:

$$\Omega * r_e = \frac{U}{\tan \alpha} - U_t \quad (7)$$

En la ecuación número 7 reemplazamos la ecuación número 8 que es la fórmula de la velocidad inducida [11]

$$U_t = \frac{\Delta P}{2\rho\Omega_r} \quad (8)$$

Donde:

ΔP = Diferencia de presiones expresados en [Pa]

ρ = es la densidad del aire a una temperatura de 15°C, esta expresada en $\frac{Kg}{m^3}$ se encuentra en el anexo 2

(9)

$$\Omega * re = \frac{U}{\tan \alpha} - \frac{\Delta P}{2\rho\Omega * re}$$

De aquí se procede a dejar la ecuación en términos de la velocidad angular por el radio para obtener una ecuación de segundo grado y poder obtener la velocidad del aire, los rpm y la diferencia de presiones con la que se va a trabajar para el diseño.

(10)

$$2\rho * \Omega^2 * re^2 - \frac{2\rho * \Omega * re * U}{\tan \alpha} + \Delta P = 0$$

Después de haber realizado algunos cálculos y haber jugado o interactuado con los valores de algunas variables como el del radio exterior de la turbina, la velocidad angular y la presión se llegó a la conclusión que el valor óptimo para la velocidad del aire es de 2.7 m/seg con una velocidad angular de 1480 rpm y una presión de 228 Pa.

i) Velocidad angular

Para las turbinas Wells algunos autores suelen trabajar entre el rango de 0 hasta 3000 rpm, para este diseño se realizará con 1480 rpm después de haber realizado los cálculos correspondientes con la fórmula general como se observa en la ecuación número 10.

$$\Omega = 1480 \text{ rpm} = 155 \text{ rad/seg}$$

j) Velocidad angular por el radio de la turbina

$$\Omega_r = \Omega * r_e \quad (11)$$

$$\Omega_r = 15.5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

k) Caudal

Asumimos como hipótesis que el caudal de entrada debe ser igual al caudal de salida porque está en régimen permanente es decir que las propiedades en un punto determinado como la masa, peso específico, densidad, viscosidad no sufren

devariaciones a través del tiempo. Mediante la ecuación número 6 que se describe a continuación se calcula el caudal [11]

$$Q = U * A \quad (12)$$

Donde:

A= es el área del tubo de 8 pulgadas de diámetro [m^2]

$$A = 0.0325 \, m^2$$

$$Q = 0.09 \, \frac{m^3}{s}$$

l) Diferencia de presiones

Gracias a la ayuda del cálculo anterior del caudal se procederá a calcular con la ecuación número 13, siendo la relación entre la potencia total de la turbina y el caudal; en este caso como no se tiene la potencia total del sistema, por lo que recién se está diseñando y realizando los cálculos se impone una potencia de 20 Watts, valor el cual se escoge después de realizar el análisis por que la potencia es directamente proporcional al caudal y si se aumenta el valor de la potencia se obtiene un valor muy elevado de la diferencia de presiones el cual es muy difícil encontrar en condiciones normales dicha presión.[11]

$$\Delta P = \frac{W}{Q} \quad (13)$$

$$\Delta P = 228 \, Pa$$

Donde:

W= potencia [Watts]

m) Velocidad inducida

Con la ecuación número 8 calculamos este valor:

$$u_t = 8.14 \, \frac{m}{s}$$

n) Ángulo de velocidad efectiva

Se encuentra el ángulo de velocidad efectiva respecto al plano de rotación y sirve para determinar la mejor geometría posible del álabe de la turbina para que tenga un mejor rendimiento[11]

$$\varphi_0 = \tan^{-1} \left(\frac{u}{\Omega_r + u_t} \right) \quad (14)$$

$$\varphi_0 = 6.5^\circ$$

o) Velocidad efectiva

$$V_{\text{efec}} = \sqrt{(u^2 + (\Omega_r + u_t)^2)} \quad (15)$$

$$V_{\text{efec}} = 23.84 \frac{m}{s}$$

3.2.3. Diseño aerodinámico del álabe

Los álabes son los encargados de extraer la energía que se encuentra disponible de la corriente de aire y por lo tanto deben ser lo más perfectas posibles. Ya que los álabes son simétricos debemos realizar un estudio aerodinámico que nos sirve para el cálculo del momento y de la variación de presión en función de la velocidad del aire incidente. En la figura 3.5 se muestra el diagrama de velocidad ideal y real de la turbina Wells convencional, la generación de un momento en el rotor de la turbina produce un cambio de la corriente de aire en la dirección esto se da a través del espesor del disco provocando una componente de energía cinética rotacional también conocida como velocidad inducida U_t este tiene un efecto aerodinámico en la turbina[21]

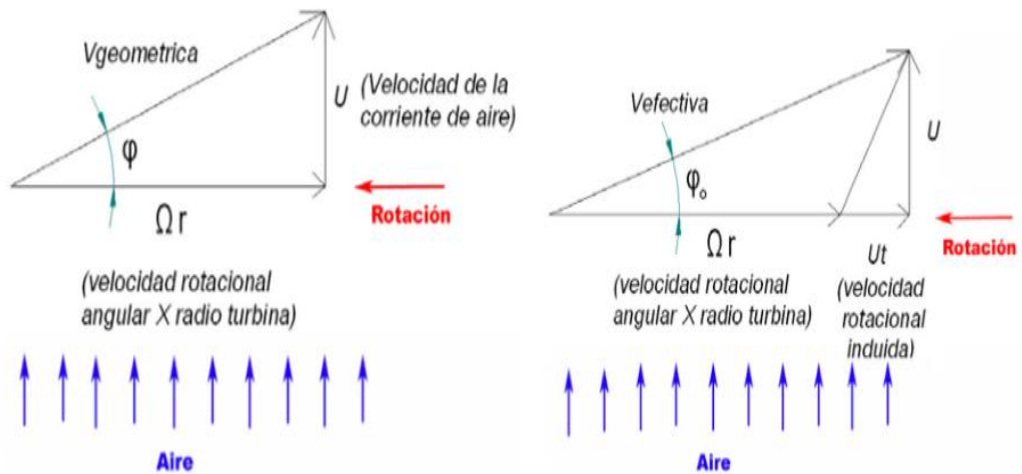


Figura 3. 5. Diagrama de velocidades ideal y real de una turbina Wells

Fuente:[21]

En la figura 3.6se observa el ángulo de ataque (α) el cual está formado por la bisectriz y la cuerda geométrica del álabe, de igual manera podemos observar el diagrama de fuerzas sobre el perfil de un alabe[21]

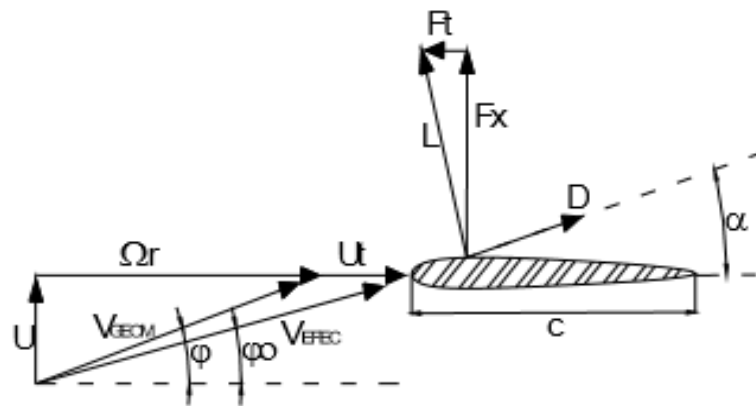


Figura 3. 6. Relación de ángulos entre los dos diagramas de velocidades y de fuerzas sobre el perfil de un álabe.

Fuente:[21]

Como se muestra en la figura 3.7 conociendo la velocidad angular de giro del rotor se puede determinar la velocidad relativa del perfil aerodinámico, la velocidad relativa produce las fuerzas sobre el perfil por medio de esta relación de triángulos de fuerzas y velocidades como la fuerza de sustentación (L) y la fuerza de arrastre (D) que se pueden expresar como fuerza axial (F_x) y fuerza tangencial

(F_t) mediante la figura 3.7 se pueden relacionar todos los aspectos a considerar para determinar los cálculos del perfil de álabe sea simétrico y que gire en una sola dirección sin importar el ángulo de ataque sea negativo o positivo[21]

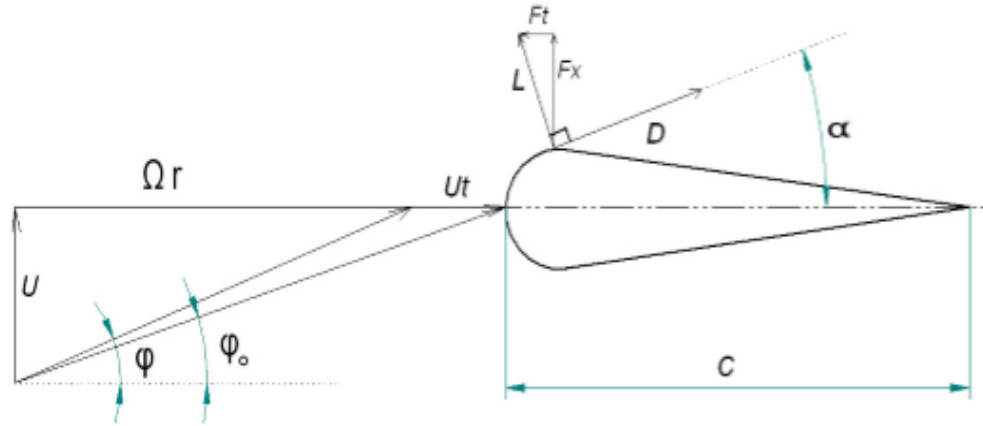


Figura 3. 7. Diagrama de fuerzas y velocidades sobre el perfil de un álabe

Fuente:[11]

p) Cuerda

Es la línea que une el borde de ataque con el borde salida es decir los extremos del perfil aerodinámico y se calcula con la ecuación número 16[11]

$$C = \frac{\pi * De * \sigma}{B} \quad (16)$$

Donde:

B = número de álabes

$$C = 0.063 \text{ m}$$

q) Número de Reynolds

El tipo de flujo que adquiere un fluido que se transporta por una tubería de cualquier material depende de algunos parámetros como la velocidad del líquido, propiedades del fluido que se transporta y el diámetro de la tubería, el número de Reynolds es adimensional.

El número de Reynolds pueden ser de dos tipos:

- Flujo laminar si es menor que 2000

- Flujo transicional si esta entre 2000 y 4000
- Flujo turbulento si es mayor que 4000

A continuación, se calcula el número de Reynolds con la siguiente fórmula [11]

$$\text{Reynolds} = \frac{U * D_e}{\vartheta} \quad (17)$$

Donde:

ϑ = es la viscosidad cinemática del aire expresada en $[\frac{m^2}{s}]$, Anexo 3

$$\text{Reynolds} = 36735$$

r) Ángulo de velocidad geométrica

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{u}{\Omega_r} \right) \quad (18)$$

$$\varphi = 9.86^\circ$$

s) Velocidad geométrica

$$V_{\text{geo}} = \sqrt{(u^2 + \Omega_r^2)} \quad (19)$$

$$V_{\text{geo}} = 15.78 \frac{m}{s}$$

t) Fuerza de sustentación

Este tipo de fuerza sirve para conseguir el movimiento unidireccional entre más delgado sea el perfil aerodinámico del álabe su relación de sustentación arrastre aumenta para un número determinado de Reynolds[11]

$$L = \frac{1}{2} * \rho * V_{\text{efec}}^2 * C * C_L * h \quad (20)$$

Donde:

C_L = es el coeficiente de sustentación

$$L = 0.522 \text{ N}$$

u) Fuerza de arrastre

Con la ecuación número 21 se puede calcular este valor [11]

$$D = \frac{1}{2} * \rho * V_{\text{efec}}^2 * C * C_D * h \quad (21)$$

Donde:

C_D = es el coeficiente de arrastre

$$D = 0.0024 \text{ N}$$

v) Componente de fuerza axial

Se expresa como F_x , es la fuerza que cambia el sentido en función del flujo del aire que circula [11]

$$F_x = L \cos \alpha + D \sin \alpha \quad (22)$$

$$F_x = 0.515 \text{ N}$$

w) Componente de fuerza tangencial

Gracias a esta fuerza es la que nos permite el movimiento rotacional del disco de la turbina y se expresa como F_t [11]

$$F_t = L \sin \alpha - D \cos \alpha \quad (23)$$

$$F_t = 0.088 \text{ N}$$

x) Torque

$$T = (L * \sin(\alpha_1)) - (D * \cos(\alpha_1)) * r_e \quad (24)$$

$$\alpha_1 = \frac{\varphi_0 + \varphi}{2} \quad (25)$$

$$\alpha_1 = 8.18^\circ$$

$$T = 0.49 \text{ N} * m$$

3.2.4. Diseño mecánico del eje de la turbina

Para el diseño del eje necesitamos conocer que en el eje de la turbina estará el rodete, los rodamientos y para lo cual necesitamos calcular las fuerzas presentes en cada uno de los apoyos y también para encontrar el diámetro del eje adecuado para el correcto funcionamiento de la turbina.

a) Fuerzas y momentos

En la figura 3.8 que se muestra a continuación se detallan las fuerzas que se presentan en el eje de la turbina como.

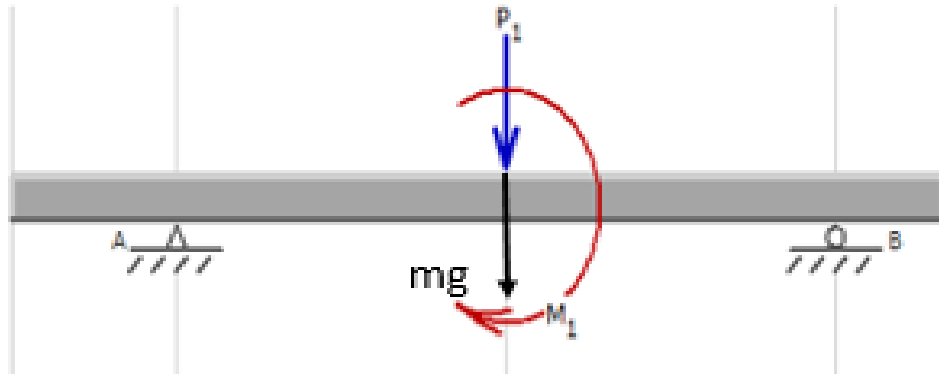


Figura 3. 8. Fuerzas del eje de la turbina

Fuente: Autor

Donde:

$M_1 = T =$ Torque

$F_v = P_1 =$ Fuerza vertical

En la figura 3.9 se puede apreciar el diagrama decuerpo libre del eje de la turbina.

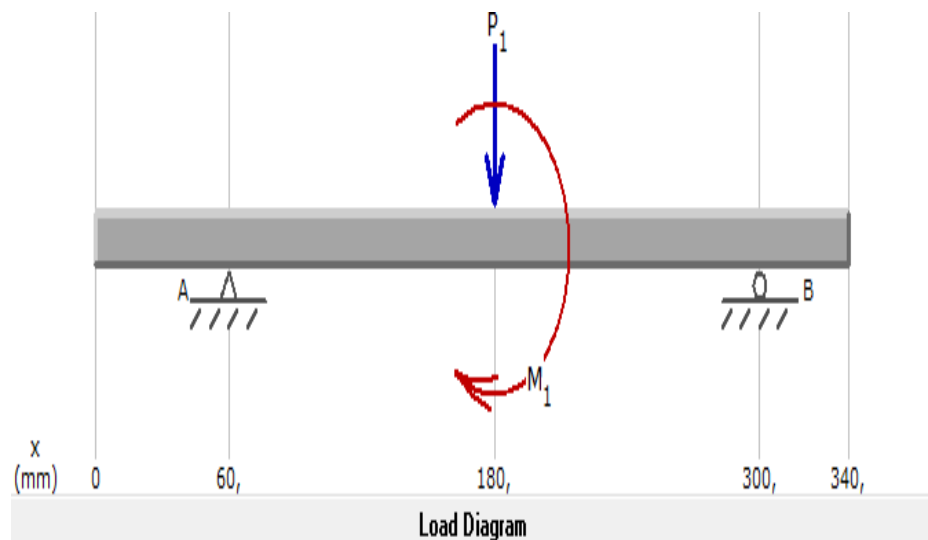


Figura 3. 9. Diagrama de cuerpo libre del eje de la turbina

Fuente: Autor

Para realizar el cálculo de la fuerza vertical se toma en cuenta la siguiente fórmula la cual está en términos de la fuerza de la carga del viento y el peso del rodete como a continuación se explica.

b) Cálculo de la carga del viento

El viento es una masa de aire que por lo general se desplaza o se mueve horizontalmente. La carga del viento se puede calcular con la ecuación [26]:

$$F_{vie} = A * \Delta P * C_d \quad (26)$$

Donde:

A= área del tubo

Cd= coeficiente de arrastre

Todos estos son valores ya obtenidos con anterioridad

$$F_{viento} = 0.28 \text{ N}$$

c) Cálculo del momento torsor

El momento torsor será el que actúa sobre el eje de la turbina producido por la fuerza de la carga del viento que se produce en el rodete por lo que es de vital importancia realizar este cálculo con la ecuación número 27:

$$T = 2 * F_{vie} * \left(\frac{D}{2}\right) \quad (27)$$

$$T = 0.056 \text{ N} * m$$

d) Cálculo de la fuerza vertical

La fuerza vertical que se produce en el eje de la turbina se calcula con la siguiente ecuación la cual no servirá para los cálculos siguientes a realizar.

$$F_v = F_{vie} + W_{rodete} \quad (28)$$

Donde:

W rodete= peso del rodete expresado en [N]

e) Peso del rodete

Para poder calcular el peso del rodete se utiliza la formula número 29, en la cual la masa se puede calcular mediante el software que se utilizó que es el SolidWorks en el que automáticamente no arroja el valor sin calcular analíticamente

$$W_{rodete} = m * g \quad (29)$$

Donde:

m= masa expresado en [Kg] y se encuentra en el anexo 3.

g= gravedad que equivale a 9.81 [m/s]

$$W_{rodete} = 3.23 \text{ N} \quad (30)$$

Finalmente, con los datos calculados anteriormente ya podemos proceder al cálculo de la fuerza vertical que actúa sobre el eje de la turbina para obtener un resultado de:

$$F_v = 3.52 \text{ N}$$

f) Cálculos de las reacciones

Con la ayuda de la figura 3.6 que es el diagrama de cuerpo libre de las fuerzas que actúan en el eje podemos realizar el cálculo de las reacciones en los apoyos del eje por el método de sumatorias de fuerzas en los ejes x, y

$$\sum F_y = 0$$

$$R_A + R_B - F_v = 0$$

$$R_A = F_v - R_B$$

Se realiza la sumatorias de momentos en el punto B igual a cero

$$\sum M_B = 0$$

$$R_A = 1.53 \text{ N}$$

$$R_B = F_v - R_A$$

$$R_B = 3.52 \text{ N} - 1.53 \text{ N}$$

$$R_B = 1.99 \text{ N}$$

g) Diagrama de fuerza cortante

Este diagrama se realiza mediante áreas

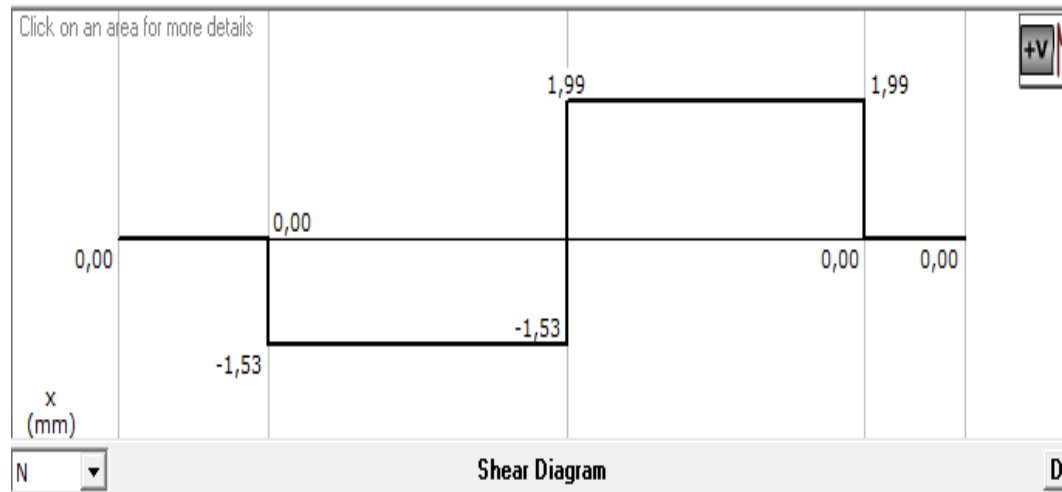


Figura 3. 10. Diagrama de fuerza cortante

Fuente: Autor

$$A_1 = \text{base} * \text{altura}$$

$$A_1 = 0.12 \text{ m} * 1.53 \text{ N}$$

$$A_1 = 0.183 \text{ N} * \text{m}$$

$$A_2 = \text{base} * \text{altura}$$

$$A_2 = 0.12 \text{ m} * 1.99 \text{ N}$$

$$A_2 = 0.238 \text{ N} * \text{m}$$

h) Diagrama de momento flector

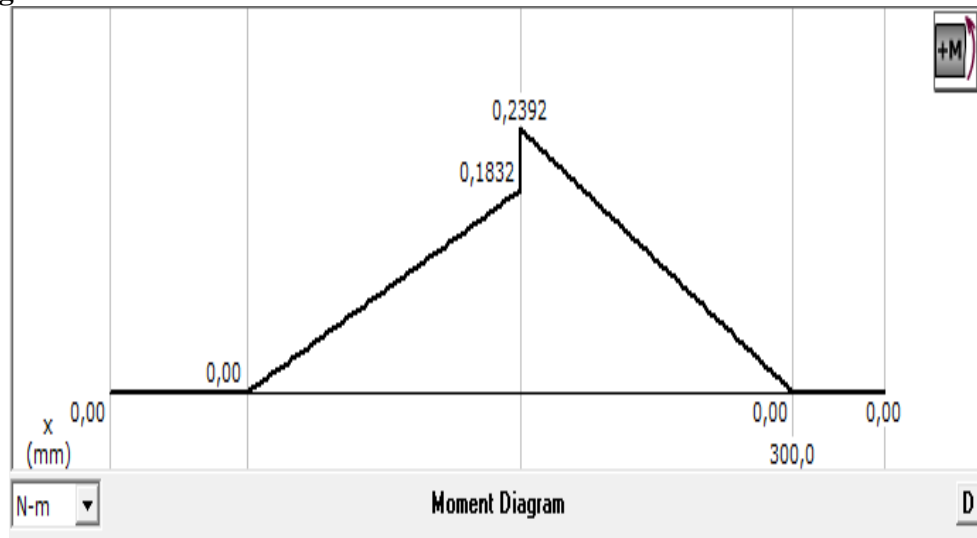


Figura 3. 11. Diagrama de momento flector

Fuente: Autor

Este diagrama nos ayuda a encontrar el momento máximo el cual obtuvimos un valor de:

$$M_{m\acute{a}x} = 0.2932N * m$$

3.2.5. SELECCIÓN DEL EJE DE LA TURBINA

Para el correcto seleccionamiento y dimensionamiento del eje utilizaremos la norma ASME ANSI B106 la cual esta nos permitirá encontrar el diámetro con la ecuación siguiente.[24]

$$d^3 = \frac{16}{\pi * S_y} * \sqrt{(K_m * M)^2 + (K_t * T)^2} \quad (31)$$

Donde:

d= diámetro del eje

M= momento flector máximo

T= es el torque producido por la fuerza de carga del viento

Los valores de K_m y K_t se obtienen de la tabla 3.9: se escoge el tipo de carga que en este caso será eje rotatorio y de carga estable y calculamos el diámetro del eje.

Tabla 3. 9. Tipo de carga, valores de momento de flexión

Tipo de carga	K_m	K_t
Eje estacionario		
Carga aplicada gradualmente	1	1
Carga aplicada de repente	1.5 – 2.0	1.5 – 2.0
Eje rotatorio		
Carga aplicada gradualmente	1.5	1
Carga estable	1.5	1
Choques menores	1.5 – 2.0	1.0 – 1.5
Choques mayores	2.0 – 3.0	1.5 – 3.0

El eje que se utilizará será de ACERO AISI 304 debido a que es un acero muy resistente a la oxidación y por qué posee excelentes propiedades físicas y mecánicas también porque en la actualidad es muy utilizado en diferentes aplicaciones de la ingeniería y de la industria.

En el anexo 4 se muestra las propiedades físicas y mecánicas del ACERO 304 del catálogo de DIPAC las cuales utilizaremos la resistencia mecánica S_{ut} y el punto de fluencia S_y .

$S_{ut} = 520 \text{ MPa}$

$S_y = 220 \text{ MPa}$

$$d^3 = \frac{16}{\pi * 220 \times 10^6} * \sqrt{(1.5 * 0.1232)^2 + (1 * 0.02625)^2} \quad (32)$$

$$d = 0.0021 \text{ m}$$

Revisando el catálogo de DIPAC podemos concluir que el eje seleccionado de acuerdo al diámetro obtenido es el eje de diámetro de 1/4" que es el eje que más

se aproxima al calculado mediante la fórmula del dimensionamiento del eje de la turbina Wells.

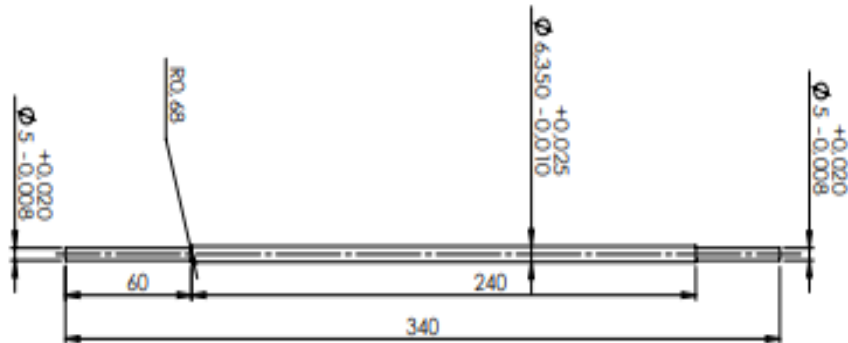


Figura 3. 12.Eje de acero

Fuente: Autor

Diseño estático del eje

Para este estudio utilizaremos la teoría de falla de Von Mises. Para realizar estos cálculos necesitamos de algunos datos ya encontrados anteriormente como:

$$M_{\text{máx}} = 0.2392 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$M_T = 0.056 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$S_Y = 220 \text{ MPa}$$

a) Esfuerzo máximo por flexión en el eje

$$\sigma_x = \frac{32M_{\text{máx}}}{\pi * d^3} \quad (33)$$

$$\sigma_x = 9.51 \text{ MPa}$$

b) Esfuerzo cortante por torsión en el eje

$$\tau_{xy} = \frac{16 * M_T}{\pi * d^3} \quad (34)$$

$$\tau_{xy} = 1.12 \text{ MPa}$$

c) Esfuerzo de Von Mises

La teoría de Von Mises tiene una mayor área en la cual no se presentará falla, por eso la teoría del esfuerzo cortante máximo es la escogida para hacer cálculos conservadores de falla de un material y tener mayor certeza de que no se producirá falla, es el más aplicado y apto para un buen diseño, con la ecuación número 35 podemos hacer el cálculo correspondiente[24]

$$\sigma' = \sqrt{\sigma_x^2 + 3\tau_{xy}^2} \quad (35)$$

$$\sigma' = 10.08 \text{ MPa}$$

d) Factor de seguridad

Se debe tomar en cuenta que el factor de seguridad es muy importante con esto se podrá saber si va a soportar el eje las cargas producidas y se calcula con la ecuación número 36.[24]

$$n = \frac{S_y}{\sigma'} \quad (36)$$

$$n = 22$$

Diseño dinámico del eje

Para este diseño necesitamos de los valores antes obtenidos y también de algunos valores o que se obtendrán con la ayuda de catálogos[24]

a) Límite de resistencia a la fatiga

$$S_{e'} = 0.504 * S_{ut} \quad (37)$$

Donde:

Se' = Límite de resistencia a la fatiga de la muestra de la viga giratoria [Pa]

$$S_{e'} = 262.08 \text{ MPa}$$

$$S_e = K_a * K_b * K_c * K_d * K_e * K_f * S_{e'} \quad (38)$$

Donde:

Se = Límite de resistencia a la fatiga del elemento mecánico

Ka= Factor de modificación de la condición superficial

Kb= Factor de modificación del tamaño

Kc= Factor de modificación de la carga

Kd= Factor de modificación de la temperatura

Ke= Factor de confiabilidad

Kf= Factor de modificación de efectos varios.

b) Factor de modificación de la condición superficial Ka

Se calcula con la ecuación que se presenta a continuación[24]

$$K_a = a * S_{ut}^b \quad (39)$$

Los valores de la base a y del exponente b se pueden encontrar en el anexo 5 y se seleccionó un acabado superficial por maquinado o laminado en frío y los datos obtenidos son:

$$a = 4.517$$

$$b = -0.265$$

$$K_a = 0.86$$

c) Factor de modificación del tamaño Kb

En el anexo 6 se muestra los valores que tiene el Kb para distintos rangos de diámetros y se utiliza la ecuación número 40[24]

$$K_b = 1.24 d^{-0.107} \quad (40)$$

$$K_b = 1$$

d) Factor de modificación de la carga Kc

En el anexo 7 se muestra el valor escogido para Kc

$$K_c = 1$$

e) Factor de modificación de la temperatura K_d

El valor escogido para K_d es igual a 1 como se puede ver en el anexo 8ya que no se va a trabajar a temperaturas elevadas si no solo a temperatura ambiente [24]

$$K_d = 1$$

f) Factor de confiabilidad K_e

Este valor se escoge del anexo 9 para una confiabilidad del 99%

$$K_e = 0.814$$

g) Factor de modificación de efectos varios K_f

Mediante la ecuación número 41 se puede calcular el K_f [24]

$$K_f = 1 + q(K_t - 1) \quad (41)$$

El valor de “q” que es la sensibilidad de la muescase encuentra con la ayuda del anexo 10

Para realizar los cálculos necesitamos conocer los valores como:

d= diámetro menor del eje

D=diámetro mayor del eje

r= radio de muesca

Sut= 220 MPa

Con el valor de r= 0.675 mm y Sut= 75.42 Ksi se ingresan en la figura del anexo 10 y el valor obtenido de la sensibilidad de la muesca es

$$q = 0.64$$

Para el cálculo de K_t lo realizamos con la ayuda del anexo 11, necesitamos entrar a la figura de dicho anexo con los valores de la ecuación 42

$$\frac{r}{d} \quad (42)$$

$$\frac{r}{d} = 0.14$$

$$\frac{D}{d} \quad (43)$$

Con estos dos valores que se muestran a continuación ingresamos a la figura del anexo 11 y calculamos el K_t para una barra ranurada de flexión.[24]

$$\frac{D}{d} = 1.27$$

$$K_t = 1.65$$

Con los valores obtenidos anteriormente procedemos a calcular el K_f [24]

$$K_f = 1 + 0.64(1.65 - 1)$$

$$K_f = 1.42$$

$$S_e = 0.86 * 1 * 1 * 1 * 0.814 * 1.42 * 262.08$$

$$S_e = 260 \text{ MPa}$$

h) Fracción de resistencia a la fatiga

El factor de resistencia a la fatiga f se lo puede encontrar con el valor de la resistencia a la tracción (S_{ut}) del acero AISI 304 de 75.42 Kpsi que se encuentra en el anexo 12.

$$f = 0.89$$

i) Resistencia a la fatiga

Se realizará el cálculo de la resistencia a la fatiga del elemento mecánico que se va a utilizar.[24]

$$S_f = aN^b \quad (44)$$

El valor de “a” se calcula con la ecuación 45:

$$a = \frac{(f * S_{ut})^2}{S_e} \quad (45)$$

$$a = 823.8 \text{ MPa}$$

El valor de b calculamos con la ecuación número 46:

$$b = -\frac{1}{3} \log \frac{(f * S_{ut})}{S_e} \quad (46)$$

$$b = -0.083$$

N representa el número de revoluciones de la turbina

$$N = 1480 \text{ rpm}$$

Número de ciclos= 3600000 consideramos que la turbina va a trabajar las 24 horas del día.

$$S_f = 449.46 \text{ MPa}$$

j) Esfuerzo máximo por flexión

Con los datos ya obtenidos anteriormente como el diámetro procedemos a calcular[24]

$$\sigma_x = \frac{32M_{\max}}{\pi * d^3} \quad (47)$$

$$\sigma_x = 9.54 \text{ MPa}$$

k) Factor de seguridad del eje de la turbina

$$n = \frac{S_f}{\sigma_x} \quad (48)$$

$$n = 44$$

Criterio de Goodman Modificado

a) Esfuerzo medio

$$\sigma_m = \sqrt{3\tau_{xy}} \quad (49)$$

$$\tau_{xy} = \frac{16 * M_T}{\pi * d^3}$$

$$\tau_{xy} = 1.12 \text{ MPa}$$

$$\sigma_m = 1.83 \text{ MPa}$$

b) Esfuerzo alterante

Este esfuerzo es igual al esfuerzo máximo por flexión ya calculado anteriormente[24]

$$\sigma_a = \sigma_x = 6.10 \text{ MPa}$$

c) Factor de seguridad según el criterio de Goodman Modificado

Para la evaluación de la condición del material se utilizará el criterio de Goodman Modificado utilizado para el diseño [24]

$$n_f = \frac{1}{\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}}} \quad (50)$$

$$n_f = 34$$

3.2.6. SELECCIÓN DE RODAMIENTOS

Para seleccionar el correcto rodamiento que se va a utilizar para el diseño y la construcción de la turbina es necesario tomar algunos factores de diseño que son muy importantes como las cargas, precisión, velocidad, montaje, desmontaje en el momento de la selección ya que existen algunos tipos de rodamientos y cada uno tiene sus propias características, valores y dependen de la aplicación y uso que se le va a dar para lo cual se utilizó el catalogo FAG por su fácil utilización por que posee los datos necesarios para la selección del rodamiento.[25]

Como se tienen fuerzas axiales es recomendable trabajar con un rodamiento rígido de bolas.

Se realizará el cálculo en el apoyo B porque este es el más crítico de acuerdo a los valores obtenidos y calculados anteriormente

a) Carga estática equivalente

$$C_o = f_s * P_o \quad (51)$$

Donde:

P_o = Carga perteneciente a la reacción en el apoyo B cuyo valor es:

$$P_o = 1.03 \text{ N}$$

f_s = Es el factor de esfuerzos estáticos y se encuentra en el Anexo 13 y se escogió un valor de 1.5 para condiciones normales.

$$C_o = 1.55 \text{ N}$$

b) Carga dinámica equivalente

$$C = P_o * \sqrt[p]{\frac{L_h * N * 60}{1000000 * a_1 * a_{23}}} \quad (52)$$

Donde:

p = Exponente de vida, Anexo 14 y se obtuvo un valor de 3 para rodamiento de bolas.

L_h = Es la vida nominal del rodamiento en horas [h]

a_1 = Es el factor de probabilidad de fallo, Anexo 15; con una probabilidad de falla de 10% y un valor de 1 para a_1 .

a_{23} = Es el factor para el material y las condiciones de servicio y se toma el valor de 1.7 para comenzar su interacción.

c) Vida nominal del rodamiento

$$L_h = f_l^p * 500 \quad (53)$$

Donde:

f_l = Es el factor de esfuerzos dinámicos, Anexo 16 y se toma un valor de 4

Obteniendo una vida nominal del rodamiento de:

$$L_h = 32000$$

Con el valor calculado de la vida nominal del rodamiento el factor de probabilidad de fallo y las condiciones de servicio mediante la ecuación anterior podemos calcular la carga dinámica equivalente.

$$C = 14.56 \text{ N}$$

Mediante las cargas dinámica y estática se seleccionó el rodamiento rígido de bolas del catálogo FAG 635.2RS, Anexo 17 con las siguientes características:

d= 5 m, D= 19 mm, B= 6

Para verificar que el rodamiento es el correcto se realiza la siguiente comprobación realizando algunos cálculos.

$$d_m = \frac{D + d}{2} \quad (54)$$

$$d_m = 12 \text{ mm}$$

d) Ratio de la viscosidad

$$k = \frac{v}{v_1}$$

Donde:

v = Es la viscosidad de servicio, $v=100\text{mm}^2/\text{seg}$ un aceite ISO VG 100 a una temperatura de 40°C

v_1 = Es la viscosidad relativa con un valor de $30 \text{ mm}^2/\text{seg}$, Anexo 18

$$k = 3.33$$

e) Factor básico a_{23II}

Para realizar este cálculo primero se debe calcular el K_1 y K_2 con la ecuación número 55

$$K = k_1 + k_2 \quad (55)$$

En el Anexo 19 se calcula los valores para un rodamiento de bolas con el fs anteriormente calculado se dice que $k_1 + k_2 = 0$ por lo tanto tenemos:

$$K = 0$$

Gracias a los factores encontrados y mediante el Anexo 20 se calcula el a_{23II}

$$a_{23II} = 3.5$$

Con este valor volvemos a recalcular la carga dinámica equivalente

$$C = 11.44 N = 0.011 KN$$

El C del catálogo es: 2.55 KN, por lo tanto:

$$2.55 KN > 0.011KN$$

Es decir, el rodamiento rígido de bolas del catálogo FAG 635.2RS es el adecuado para este diseño porque soportara las cargas.

3.2.7. SELECCIÓN DEL GENERADOR

Para poder realizar la selección del generador debemos tomar en cuenta el par de torsión y los rpm con las que se va a trabajar la turbina para ello se escogió un generador con las siguientes características

Marca: Ekong

Certificación: CCC, CE, ROHS

Lugar de origen: China

Tamaño: pequeño

Torsión: 0.50 N*m

Construcción: Imán permanente

Velocidad: hasta 3800 rpm

Voltaje: 1 hasta 24 V

Potencia de salida: 1.8 W o personalizada

Propiedades: alta velocidad, precio cómodo

Tipo de motor: motor de imán permanentes

Aplicaciones: equipo eléctrico, juguetes

Mas especificaciones se encuentran en el Anexo 21 del generador



Figura 3. 13. Generador

Fuente:[26]

3.2.8. DATOS DE LA TURBINA

Los datos son los siguientes:

- Perfil NACA 0018
- Número de álabes 6
- Diámetro exterior 0.2 metros
- Diámetro interior 0.12 metros
- Radio exterior 0.1 metros
- Radio interior 0.06 metros
- Cuerda 0.063 metros
- Envergadura 0.040 metros
- Angulo de ataque 6.5 grados
- Longitud de la turbina 0.09metros

Con todos estos valores expresados se procede a la elaboración de la turbina para realizar las pruebas correspondientes

3.2.9. DESARROLLO DE LA EXPERIMENTACIÓN

Para la realización del proyecto consta de 3 partes principales que son: la turbina, el banco de pruebas o estructura de soporte y el generador

La turbina se imprimió en 3D, el eje es de Acero inoxidable 304 de diámetro $\frac{1}{4}$ de pulgada, en el eje se encontrarán los rodamientos de 5 milímetros de diámetro los cuales estarán insertados en un soporte que están impresos a laser que sirve para la sujeción del eje hacia el tubo de PVC que tiene una longitud de 65 cm y un diámetro de 8 pulgadas.

El generador se conectará mediante 2 poleas de 5 centímetros de diámetro en el eje de la turbina, este estará ubicado perpendicular al tubo en un soporte o una base que nos permite la correcta posición para el correcto funcionamiento.

La estructura o soporte se construyó de madera y las dimensiones son: largo 1 metro, ancho 60 centímetros, altura 45 centímetros y grosor de 1.5 centímetros; posee un soporte tipo “Y” que está ubicado encima de la mesa para la sujeción del tubo de 8 pulgadas, sus dimensiones son: 50 centímetros de altura, 28 centímetros de ancho y grosor de 3 centímetros.

En la parte eléctrica también se colocaron 2 electroválvulas de $\frac{1}{2}$ pulgada, 2 contactores, 2 pulsadores normalmente abierto y un normalmente cerrado para poder controlar el flujo de aire en el tubo de PVC, 5 racores de $\frac{1}{2}$ pulgada, una T de $\frac{1}{2}$ y se utilizó manguera de $\frac{1}{2}$ pulgada de diámetro para poder realizar las pruebas de funcionamiento.

Para poder realizar las pruebas de funcionamiento primero la turbina debe estar acoplada en el eje y con los soportes de los rodamientos dentro del tubo de 8 pulgadas, el tubo debe estar apoyado en el banco de pruebas, en el eje debe estar la polea conectado mediante la banda de caucho a la polea del generador y este a su vez mediante a una batería y a una protoboard para poder realizar la aplicación de carga de celular.

El experimento consiste en sujetar la manguera de $\frac{1}{2}$ pulgada a la entrada y salida del tubo PVC, una vez abierto la manguera de aire del compresor, por medio de los pulsadores presionamos cualquiera de los dos verificamos que se produzca el correcto funcionamiento de la turbina Wells que consiste en girar en una sola dirección al ingresar el aire por la entrada o por la salida del tubo, luego el aire choca contra los alabes de la turbina y esta a su vez vence el torque y comienza a

girar la turbina, como el eje está conectado a una polea del generador esta comienza a producir energía y finalmente cumple con la aplicación de cargar la batería del celular; de esta manera podemos realizar las pruebas de funcionamiento para poder obtener resultados como la velocidad de aire, rpm, voltaje gracias a los dispositivos como el anemómetro, tacómetro y el multímetro respectivamente.

3.2.10. RESULTADOS

A continuación, se muestran los valores obtenidos después de haber realizado las pruebas correspondientes en los laboratorios de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Carrera de Mecánica.

3.2.10.1 TIEMPO VS VELOCIDAD DEL AIRE

Tabla 3. 10. Valores del tiempo vs velocidad del aire

TIEMPO (segundos)	VELOCIDAD DEL AIRE (m/s)
1	6,7
5	6,3
10	6,0
15	5,5
20	5,4
25	5,3
30	5,2
35	5,1
40	4,8
45	4,1
50	3,2
55	2,4

Fuente: Autor

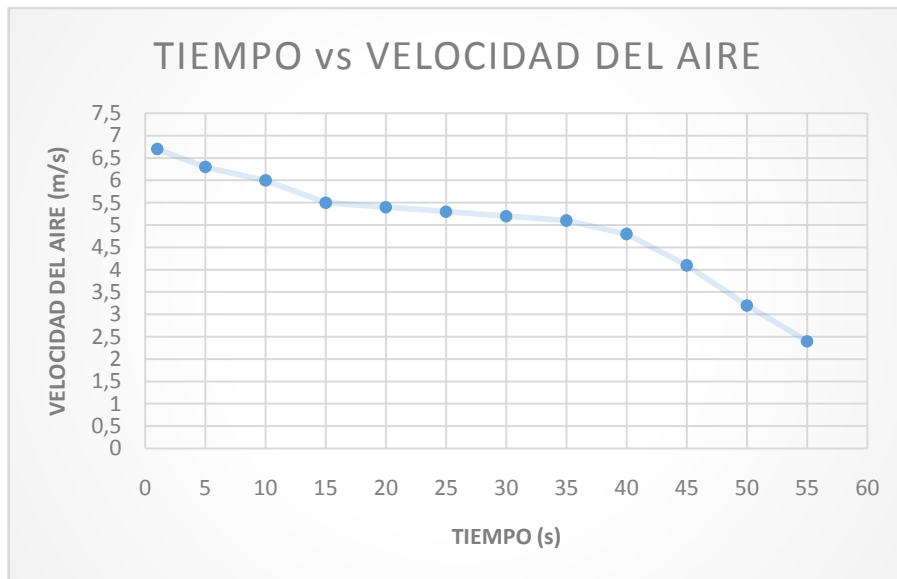


Figura 3. 14. Tiempo vs Velocidad del aire

Fuente: Autor

En esta imagen se observa cómo actúa la turbina en relación al tiempo y la velocidad del aire en el tubo, estos valores se pudo obtener gracias al anemómetro que es el dispositivo que sirve para medir la velocidad del aire en el túnel de viento, a un tiempo de 5 segundos la velocidad es 6.3 m/seg y a 45 segundos la velocidad baja a 4.1 m/seg es decir la velocidad del aire disminuye en la relación que avanza el tiempo debido a que la fuerza del compresor está a su máximo valor cuando se prende y poco a poco tiene a bajar por que pierde fuerza y los valores empiezan a disminuir.

3.2.10.2. TIEMPO VS PRESIÓN

Tabla 3. 11. Valores del tiempo vs presión

TIEMPO (segundos)	PRESIÓN (Psi)
1	120
5	116
10	113
15	110
20	106
25	102
30	98
35	92
40	85
45	82
50	78
55	75

Fuente: Autor

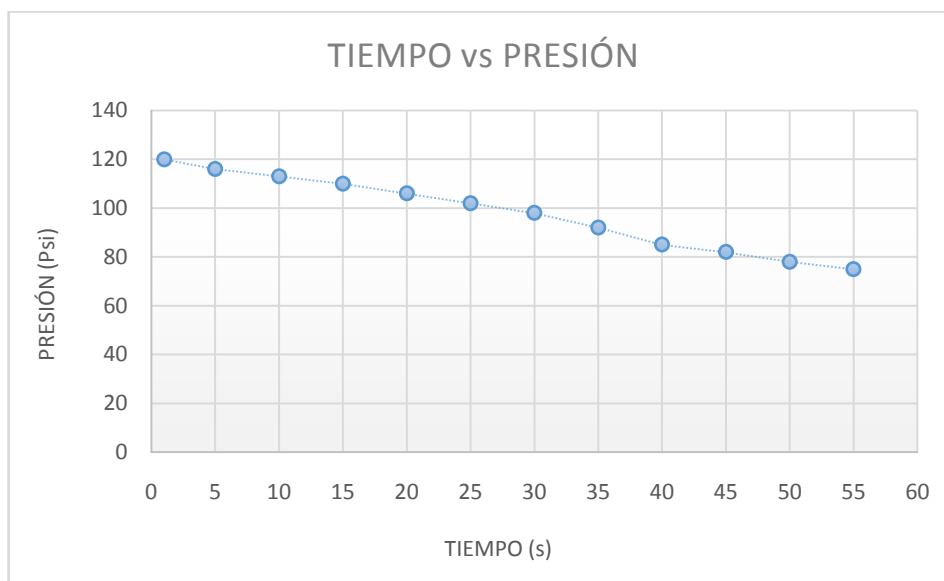


Figura 3. 15. Tiempo vs Presión

Fuente: Autor

En esta imagen se observa la relación entre el tiempo expresado en segundos y la presión expresado en Psi, se puede mirar que la presión máxima es de 120 Psi y es el pico más alto a un tiempo de 2 segundos mientras que a 55 segundos la presión baja a 75 Psi esto se debe a que para poder girar la turbina Wells y poder vencer el

torque necesita una presión súper alta y por tal razón el compresor tiende a descargarse fácilmente.

3.2.10.3. TIEMPO VS VOLTAJE

Tabla 3. 12. Valores del tiempo vs voltaje

TIEMPO (segundos)	VOLTAJE (V)
1	1,8
5	7,6
10	12,5
15	14,1
20	13,2
25	12,4
30	10,9
35	9,8
40	7,3
45	5,2
50	3,2
55	2,0

Fuente: Autor

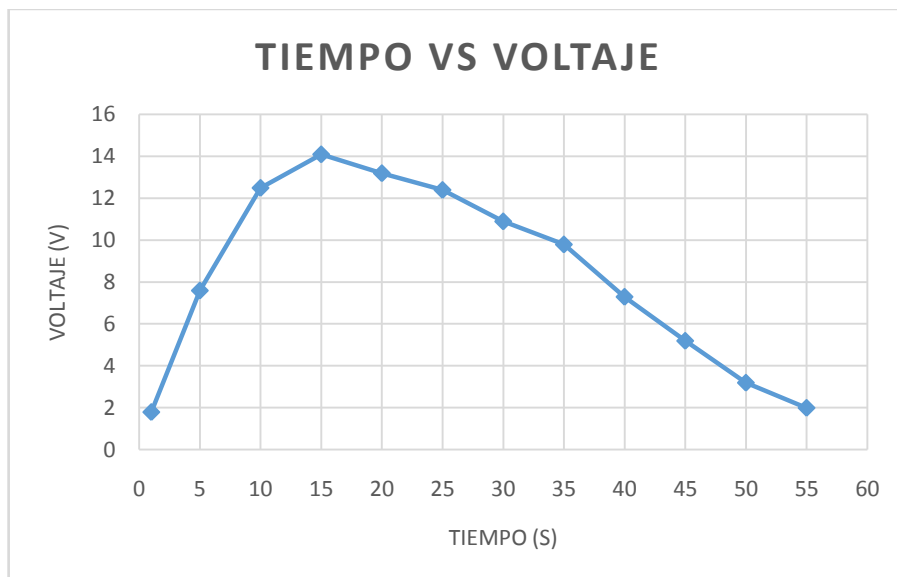


Figura 3. 16. Tiempo vs Voltaje

Fuente: Autor

En esta imagen se observa el tiempo vs el voltaje medido gracias al multímetro; la curva aumenta de acuerdo a la velocidad que gira la polea del generador hasta

obtener un voltaje de 14 V a un tiempo de 15 segundos cuando la turbina gira a su máxima velocidad y luego tiende a bajar a 2V en un tiempo de 55 segundos esto se debe a que la turbina pierde velocidad y la presión descende.

3.2.10.4. TIEMPO VS AMPERAJE

Para medir el amperaje que existe en el circuito se procede a calcular de la siguiente manera: mediante un multímetro, para realizar la medición utilizamos un led con una resistencia de 330 ohmios conectada en serie, se pudo apreciar que había flujo de corriente por que el led se encendía y se observan los siguientes valores.

Tabla 3. 13. Valores del tiempo vs Amperaje

TIEMPO (segundos)	AMPERAJE (A)
1	0.19
5	0.16
10	0.15
15	0.15
20	0.10
25	0.09
30	0.08
35	0.06
40	0.04
45	0.03
50	0.03
55	0.02

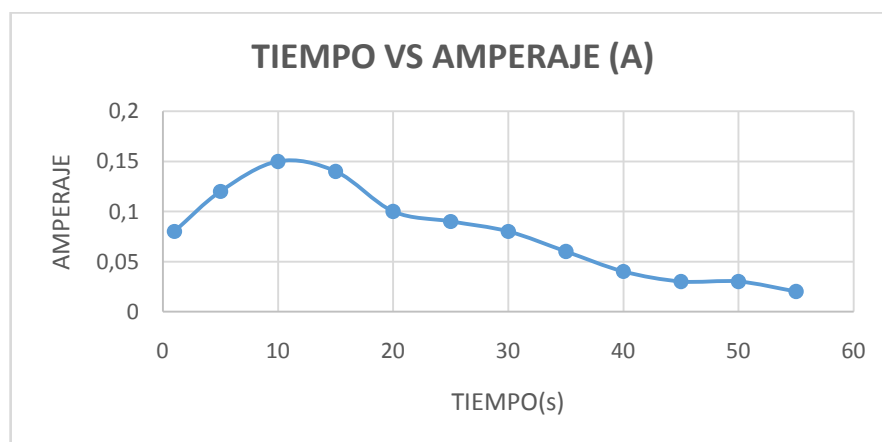


Figura 3. 17. Tiempo vs Amperaje

Fuente: Autor

3.2.10.5. TIEMPO VS RPM

Tabla 3. 14. Valores del tiempo vs rpm

TIEMPO (segundos)	VELOCIDAD (RPM)
1	214
5	924,2
10	1263
15	1282
20	1189
25	974,3
30	840,1
35	631
40	534,1
45	354,5
50	210,8
55	117,3

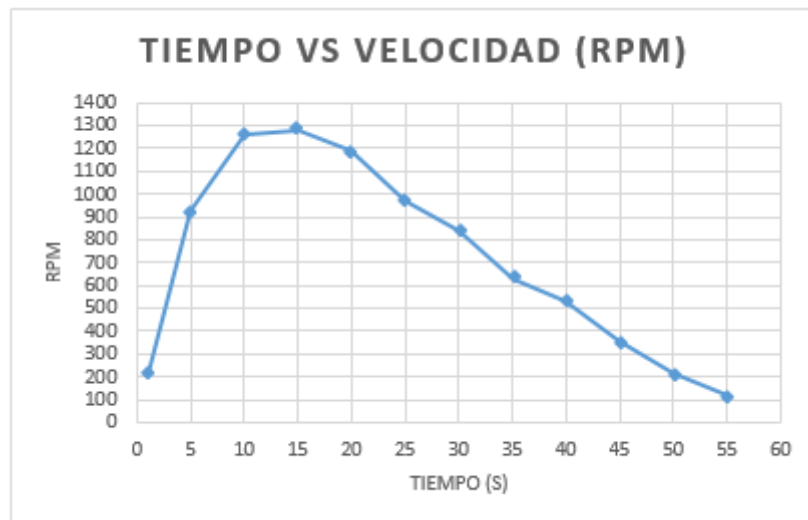


Figura 3. 18. Tiempo vs RPM

Fuente: Autor

En la figura 3.18 se observa la gráfica entre el tiempo y la velocidad en rpm; se mira que a 5 segundos existen 925 rpm, luego a 15 segundos es el pico más alto de la curva con 1300 rpm es decir que hasta que obtenga su máxima velocidad tarda 15 segundos y luego baja la velocidad debido a la presión del compresor que

disminuye y va perdiendo fuerza al momento de girar la turbina y por eso tiende a bajar hasta 117.3 rpm.

3.3. PRESUPUESTO

Para poder tener en cuenta y conocer el presupuesto de este proyecto es necesario tomar varios aspectos como el costo de los materiales, maquinaria, mano de obra, equipos, herramientas utilizadas y costo del taller donde se realizarán la construcción del proyecto.

3.3.1. Elementos de la turbina

En la tabla 3.15 se muestra el costo de los elementos de la turbina.

Tabla 3. 15. Costo de los elementos de la turbina

ELEMENTOS DE LA TURBINA				
Elemento	Descripción	Cantidad	Valor unitario	Costo Final (\$)
Impresión 3D	Turbina	3	70	210
Eje AISI 304	D=1/4 plg, L=45 cm	2	2	4
Rodamientos	D= 5 mm	6	2	12
Pega	UHU	2	5.50	11
Lija	120	2	0.90	1.80
Correas plásticas	pequeñas	1 funda	2.50	2.50
Tubo PVC	D= 8 plg L=100 cm	1	15	15
Tubo PVC	D= 4 plg L=6 m	1	14	14
Generador	1	1	60	60
Impresión laser	apoyos de turbina	4	12	48
Polea	D= ¼ plg	3	18	54
Banda	Circular	1	8	8
Mesa	Soporte	1	50	60
Total				500.30

Fuente: Autor

3.3.2. Material eléctrico

En la tabla 3.16 se muestra el costo del material eléctrico que nos servirá para la generación de energía.

Tabla 3. 16. Costo del material eléctrico

ELEMENTOS ELÉCTRICO				
Elemento	Descripción	Cantidad	Valor unitario	Costo Final (\$)
Batería	12V- 8 A	1	40	40.00
Diodo	2 A	10	0.18	1.80
Conector	USB (hembra)	4	0.60	2.40
Regulador de voltaje	3.3 Voltios	5	0.90	4.50
Regulador de voltaje	12 Voltios	1	0.88	0.88
Cable flexible	# 12	20 m	0.85	17.00
Cable gemelo	#20	10 m	0.36	3.60
Cable flexible	#16	10 m	0.40	4.00
Electroválvulas	½ plg	2	60	120.00
Contactores	Normales	2	17	34.00
Pulsadores	ON/OFF	2	3.15	6.30
Manguera	½ plg	6 m	2.50	15.00
Racores	½ plg	6	2.50	15.00
T	½ plg	1	2.25	2.25
Taype	Negro	2	1.25	2.50
Protoboard		1	8	8
Cables de protoboard		20	.10	2.00
Total				279.23

Fuente: Autor

3.3.3. Máquinas y herramientas

En la tabla 3.17 se detallan todas las máquinas, equipos y herramientas que se utilizaron, así como también la mano de obra que nos sirvió para la construcción del proyecto que se realizó.

Tabla 3. 17.Costo del uso de máquinas y herramientas

USO DE MAQUINAS Y HERRAMIENTAS			
Operario	Hora de trabajo	Costo por hora (\$)	Costo final (\$)
Torno	2	4	8
Sierra manual	1	2	2
Eléctrico	15	5	75
Pintor	2	5	10
Total			95

Fuente: Autor

3.3.4. Estructura banco de pruebas

En la tabla 3.18 se muestran todos los materiales que pudimos utilizar para la realización de la estructura que va a soportar la turbina y sus elementos para tener un mayor soporte.

Tabla 3. 18. Costo de estructura banco de pruebas

Banco de pruebas				
Elemento	Descripción	Cantidad	Valor unitario	Costo Final (\$)
Mesa de madera	1 metro de largo por 60 cm de ancho	1	50	50
Caja USB	20 cm de largo por 8 de ancho y 5 de altura	1	10	10
Canaletas	2 metros de largo	1	4.00	4.00
Total				64.00

Fuente: Autor

3.3.5. Varios

En la tabla 3.19 se muestra los costos varios que se presentaron durante todo el tiempo de realización del proyecto el cual nos sirvió para poder ejecutarlo.

Tabla 3. 19. Costos varios

Descripción	Costo final (\$)
Transporte	100
Internet	40
Impresiones	60
Alimentación	40
Recopilación de información	20
Total	260

Fuente: Autor

3.3.6. Costo total del proyecto

En la tabla 3.20 se presentan los costos totales del proyecto que se detallan por partes como los costos de los elementos de la turbina, costos de máquinas y herramientas, costos estructura banco de pruebas y finalmente los costos varios que se realizaron en todo el transcurso del proyecto

Tabla 3. 20. Costo total del proyecto

Costos finales del proyecto	
Elementos de la turbina	500.30
Elementos eléctricos	279.23
Uso de máquinas y herramientas	95
Estructura banco de pruebas	64
Varios	260
Total	1198.53

Fuente: Autor

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. CONCLUSIONES

- Gracias a los valores obtenidos después de haber realizado los cálculos correspondientes y con la ayuda de investigaciones previas se realizó el diseño y posteriormente se hizo la construcción de la turbina Wells permitiendo llegar a un diseño adecuado que cumple con la correcta funcionalidad de la turbina.
- El material para la impresión de la turbina Wells fue el más ligero en nuestro caso se imprimió en PLA que es el más utilizado para las impresiones en la actualidad, ya que esto es muy importante al momento de realizar las pruebas por qué se necesita el menor peso posible para que pueda girar la turbina, pueda vencer el torque y poder generar energía.
- Se realizaron las pruebas de funcionamiento de la turbina Wells en los laboratorios de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Carrera de Mecánica y se obtuvo como resultados que la velocidad del aire alcanza un rango de 2,4 hasta 6,7 m/seg y una presión de 75 hasta 120 Psi.
- Este tipo de turbinas o de proyectos son muy importantes, pero requieren de un estudio e investigación, desde el lugar de implementación de las turbinas, desarrollo de los cálculos, hasta el costo económico por ser muy elevado y por qué se necesita de una fuerza muy alta para poder girar la turbina y generar energía que sea utilizada y aprovechada de manera correcta.

4.2. RECOMENDACIONES

- Los rodamientos comprados deben ser puestos o insertados por unos minutos en gasolina para su limpieza y luego poner aceite VG40 para una mejor lubricación y que de esa manera puedan tener un trabajo adecuado y poder girar más rápido sin fricción con la finalidad de cumplir con su correcta función en el momento de trabajar.

- Para una mejor visibilidad del experimento y para poder observar de mejor manera como gira en un solo sentido como son las turbinas Wells es necesario que el tubo sea de acrílico transparente, la desventaja de este es el aspecto económico ya que son muy caros por lo que se manda a realizar en otras ciudades o en otro país.
- Al momento de la impresión de la turbina realizar con el material más liviano, también observar y revisar cual es la forma más adecuada al momento de imprimir, se recomienda que se realice en este tipo de turbinas una impresión en dos partes, ya que luego se producen muchas imperfecciones las cuales nos afectan porque en las aspas o en el cuerpo de la turbina se pierde fuerza y finalmente se pueden unir las piezas con alguna goma como la brujita
- Revisar que todos los elementos, dispositivos, máquinas y equipos que se van a utilizar se encuentren en el mercado y sean fácil de adquirir para una rápida y mejor construcción del proyecto.
- Tener los equipos calibrados de acuerdo a las normas correspondientes para una mejor precisión y para obtener unos resultados correctos al momento de realizar las pruebas de funcionamiento de la turbina.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. G. Diaz, Analisis de un sistema OWC twin turbines con turbinas radiales, Oviedo, 2016.
- [2] J. González , "Energías renovables", España: Reverté, 2009.
- [3] A. Santa y A. Pinilla, "Generación de energía eléctrica con turbinas Wells", Bogotá, 2002.
- [4] A. S. -. A. Pinilla, «"Generación de Energía Eléctrica a través de una Turbina Wells para dispositivos portátiles",» Bogota- Colombia.
- [5] A. Crespo, "Mecánica de fluidos", México: Paraninfo, 2006.
- [6] A. Catañeda Cortéz, «"Diseño y manufactura de una Turbina Wells de ala sectorial en Ingeniería Mecánica",» Bogotá, 2004.
- [7] L. Rodríguez García, *"Diseño de una turbina twin radial de impulso unidireccional para sistemas OWC de energía undimotriz*, Oviedo - España, 2013.
- [8] P. P. Valdez Loaicono, *"Estudio del flujo en un grupo turbinado de dos turbinas axiales unidireccionales para centrales OWC"*, Valladolid, Julio 2003.
- [9] J. Fernandez Chozas, *"Una aroximación al aprovechamiento de la energía de las olas para la generación de electricidad"*, Valladolid, España, Septiembre 2008.
- [10] A. Rubiano Fonseca, V. Prada Jiménez y J. Aponte Rodríguez, *"Análisis de la viabilidad del desarrollo de una turbina de flujo bidireccional desde el punto de vista del recurso energético"*, Bogotá- Colombia.
- [11] P. Gonzalez Ramos, "Estudio del modelamiento matemático de un alabe para una turbina de flujo bidireccional", Bogotá, 2010.
- [12] A. Duran San Lazaro y E. Vásquez Ruiz, "Generación de energía eléctrica a través de la energía cinética y potencial de las olas en una central undimotriz localizada en pascuales colima, Mexico, Mexico, 2014.
- [13] A. Viedma Robles y Y. Zamora Parra, "Teoría de máquinas hidráulicas", Murcia-España: Universidad de Murcia, 1997.
- [14] H. Salvador, "Mecánica de fluidos en ingeniería", Catalunya: Universidad Politécnica de Catalunya, Julio 2012.
- [15] S. d. I. Heras, "Mecánica de fluidos en ingeniería", Catalunya : Universidad Politécnica de Catalunya, Julio 2012.
- [16] [En línea]. Available: www.afinidadelectrica.com/articulo.php?IdArticulo=111.

- [17] C. Cortés y S. Guzmán, "Diseño, construcción y comparación de dos prototipos de generación eléctrica: Mareomotriz y Undimotriz", Bogotá- Colombia, 2015.
- [18] P. Fernández Díez, "Turbinas Hidraulicas", Universidad de Cantabria: Pp. 2-3.
- [19] P. Pesantez y D. Bustán, "Diseño y construcción de un prototipo didáctico de turbo bomba para el aprovechamiento hidráulico", Loja, Ecuador, 2010.
- [20] P. Hoyos, "Proyecto de central undimotriz para autoconsumo del ayuntamiento de Comillas ", España , 2014.
- [21] X. Salueña, J. Ortiz y A. Raso, "Diseño y fabricación de un prototipo a pequeña escala de una turbina de aire, para el aprovechamiento de la energía marina, a bajo coste mediante técnicas de prototipado rápido", Catalunya- España, 2015.
- [22] L. Villaroel, «"Las centrales OWC constan principalmente de tres elementos",» Septiembre 2017. [En línea]. Available: <https://es.scribd.com/document/357766882/Las-Centrales-OWC-Constan-Principalmente-de-Tres-Elementos>.
- [23] B. Pereira, "Optmización de una turbina de impulso radial para el aprovechamiento de la energía del oleaje", España , 2011.
- [24] R. Budynas y K. Nisbett, Diseño en ingeniería mecánica de Shigley, México: Mc Graw Hill.
- [25] Rodamientos FAG, España, 2000.
- [26] [En línea]. Available: <https://www.alibaba.com/Products>.

ANEXOS

ANEXO 1

Valores del perfil alar NACA 0018

1,0000	0,0019
0,9500	0,0121
0,9000	0,0217
0,8000	0,0394
0,7000	0,0550
0,6000	0,0685
0,5000	0,0794
0,4000	0,0871
0,3000	0,0900
0,2500	0,0891
0,2000	0,0861
0,1500	0,0802
0,1000	0,0702
0,0750	0,0630
0,0500	0,0533
0,0250	0,0392
0,0125	0,0284
0,0000	0,0000
0,0125	-0,0284
0,0250	-0,0392
0,0500	-0,0533
0,0750	-0,0630
0,1000	-0,0702
0,1500	-0,0802
0,2000	-0,0861
0,2500	-0,0891
0,3000	-0,0900
0,4000	-0,0871
0,5000	-0,0794
0,6000	-0,0685
0,7000	-0,0550
0,8000	-0,0394
0,9000	-0,0217
0,9500	-0,0121
1,0000	-0,0019

ANEXO 2

Propiedades del aire

Tabla 13.1
Propiedades del
aire seco a la
presión atmosférica.

TEMP. °C	Volumen Específico	Densidad	Entalpía	TEMP. °C	Volumen Específico	Densidad	Entalpía
	(m³/kg)	(kg/m³)	(kcal/kg)		(m³/kg)	(kg/m³)	(kcal/kg)
-15	0.7304	1.3691	0.6722	18	0.8244	1.2130	8.6372
-14	0.7332	1.3638	0.9123	19	0.8274	1.2086	8.8772
-13	0.7363	1.3581	1.1523	20	0.8302	1.2044	9.1228
-12	0.7391	1.3530	1.3923	21	0.8329	1.2006	9.3628
-11	0.7422	1.3473	1.6323	22	0.8360	1.1961	9.6028
-10	0.7453	1.3416	1.8779	23	0.8389	1.1920	9.8484
-9	0.7480	1.3369	2.1179	24	0.8418	1.1880	10.0706
-8	0.7511	1.3313	2.3579	25	0.8446	1.1839	10.3284
-7	0.7538	1.3266	2.5980	26	0.8474	1.1800	10.5740
-6	0.7563	1.3222	2.8390	27	0.8501	1.1763	10.7640
-5	0.7591	1.3173	3.0835	28	0.8529	1.1725	11.0540
-4	0.7619	1.3125	3.3235	29	0.8556	1.1687	11.2996
-3	0.7650	1.3072	3.5636	30	0.8583	1.1650	11.5396
-2	0.7678	1.3024	3.8036	31	0.8612	1.1611	11.7796
-1	0.7706	1.2977	4.0447	32	0.8645	1.1567	12.0252
0	0.7734	1.2928	4.2892	33	0.8672	1.1531	12.2652

ANEXO 3

Viscosidad cinemática del aire

PROPIEDADES FÍSICAS DEL AIRE a presión atmosférica

Tabla 2

Temperatura	Densidad	Viscosidad dinámica	Viscosidad cinemática	Velocidad del sonido
°C	ρ kg/m³	μ N.s/m² 10 ⁻⁵	ν m²/s 10 ⁻⁵	c m/s
-30	1.452	1.56	1.08	312
-20	1.394	1.61	1.16	319
-10	1.342	1.67	1.24	325
0	1.292	1.72	1.33	331
10	1.247	1.76	1.42	337
20	1.204	1.81	1.51	343
30	1.164	1.86	1.60	349
40	1.127	1.91	1.69	355
50	1.092	1.95	1.79	360
60	1.060	2.00	1.89	366
70	1.030	2.05	1.99	371
80	1.000	2.09	2.09	377
90	0.973	2.13	2.19	382
100	0.946	2.17	2.30	387
200	0.746	2.57	3.45	436
300	0.616	2.93	4.75	480

ANEXO 4

CATALOGO DIPAC ACERO 304

Eje AISI 304 inoxidable

El eje de acero inoxidable es resistente al efecto corrosivo del medio ambiente, vapor, agua y ácidos, norma de fabricación RTE INEN 228, Calidad AISI 304, disponible en acabado de acero inoxidable, lo puedes encontrar en diámetros desde 3/16" hasta 6" en largo estándar de 6 metros y por piezas de medidas especiales. Los ejes de acero inoxidable de Dipac son perfectos para la elaboración de utensilios domésticos, piezas para industria alimenticia y farmacéutica, entre otras. Cotiza ejes de acero inoxidable u otros ejes de acero ahora.

Especificaciones Generales:

- **Calidad:** AISI 304 (Inoxidable)
- **Descripción:** Acero inoxidable austenítico al cromo-níquel con bajo contenido de carbono. resiste a la corrosión intercrystalina hasta 300°C. Resiste al efecto corrosivo del medio ambiente, vapor, agua y ácidos, así como de soluciones alcalinas si se emplea con la superficie pulida espejo.
- **Aplicaciones:** Industrias alimenticias, cerveceras, azucarera, utensilios domésticos, industria del cuero, farmacéutica, dental, etc.
- **Longitud:** 6m



DESCARGAR CATÁLOGO

Composición Química						
%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Ni	%Cr
0 - 0.08	0 - 1	0 - 2	0 - 0.045	0 - 0.03	8 - 10.5	18 - 20

Propiedades Mecánicas			
Resistencia Mecánica (N/mm2)	Punto de Fluencia (N/mm2)	Elongación %Min.	Dureza ROKWELL B
520	220	20	249 - 278

Ac
Ve i

ANEXO 5

Factor por acabado superficial

Acabado superficial	Factor <i>a</i>		Exponente <i>b</i>
	<i>S_{utr}</i> kpsi	<i>S_{utr}</i> MPa	
Esmerilado	1.34	1.58	-0.085
Maquinado o laminado en frío	2.70	4.51	-0.265
Laminado en caliente	14.4	57.7	-0.718
Como sale de la forja	39.9	272.	-0.995

ANEXO 6

Factor de modificación de tamaño Kb

$$k_b = \begin{cases} (d/0.3)^{-0.107} = 0.879d^{-0.107} & 0.11 \leq d \leq 2 \text{ pulg} \\ 0.91d^{-0.157} & 2 < d \leq 10 \text{ pulg} \\ (d/7.62)^{-0.107} = 1.24d^{-0.107} & 2.79 \leq d \leq 51 \text{ mm} \\ 1.51d^{-0.157} & 51 < d \leq 254 \text{ mm} \end{cases}$$

ANEXO 7

Factor de la modificación de la carga Kc

$$k_c = \begin{cases} 1 & \text{flexión} \\ 0.85 & \text{axial} \\ 0.59 & \text{torsión}^{17} \end{cases}$$

ANEXO 8

Factor de modificación de la temperatura Kd

Temperatura, °C	S_T/S_{RT}	Temperatura, °F	S_T/S_{RT}
20	1.000	70	1.000
50	1.010	100	1.008
100	1.020	200	1.020
150	1.025	300	1.024
200	1.020	400	1.018
250	1.000	500	0.995
300	0.975	600	0.963
350	0.943	700	0.927
400	0.900	800	0.872
450	0.843	900	0.797
500	0.768	1 000	0.698
550	0.672	1 100	0.567
600	0.549		

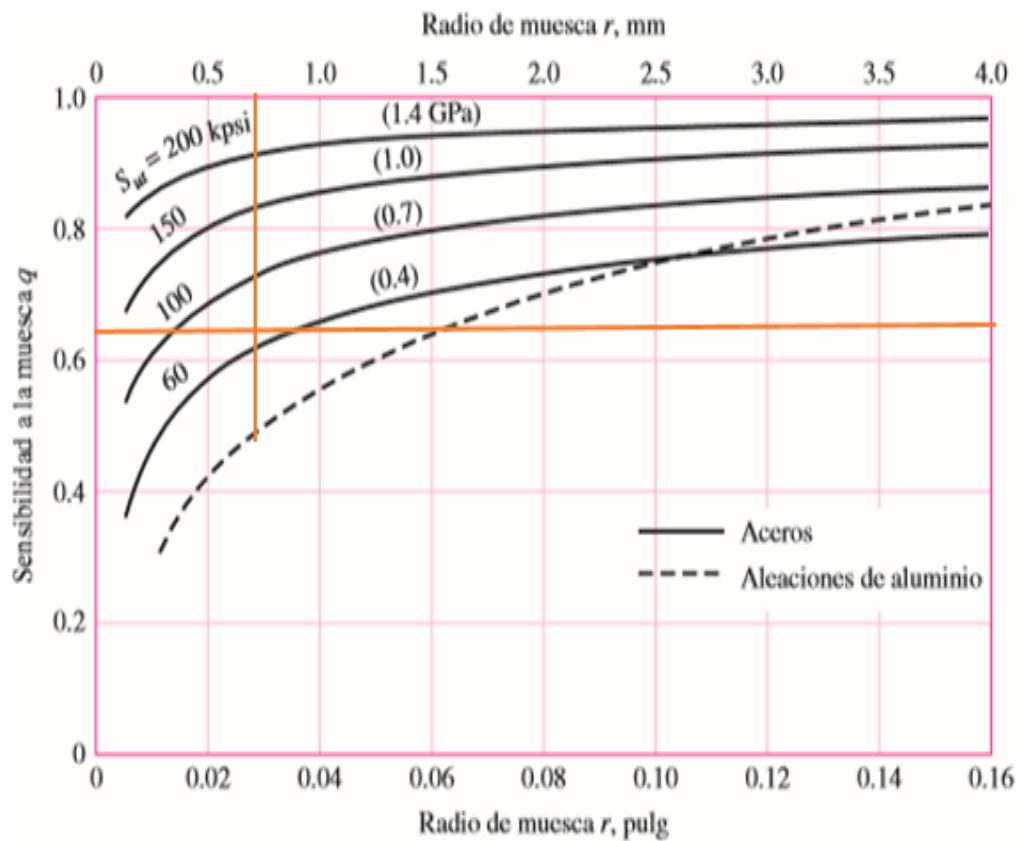
ANEXO 9

Factor de confiabilidad K_e

Confiabilidad, %	Variación de transformación z_a	Factor de confiabilidad k_e
50	0	1.000
90	1.288	0.897
95	1.645	0.868
99	2.326	0.814
99.9	3.091	0.753
99.99	3.719	0.702
99.999	4.265	0.659
99.9999	4.753	0.620

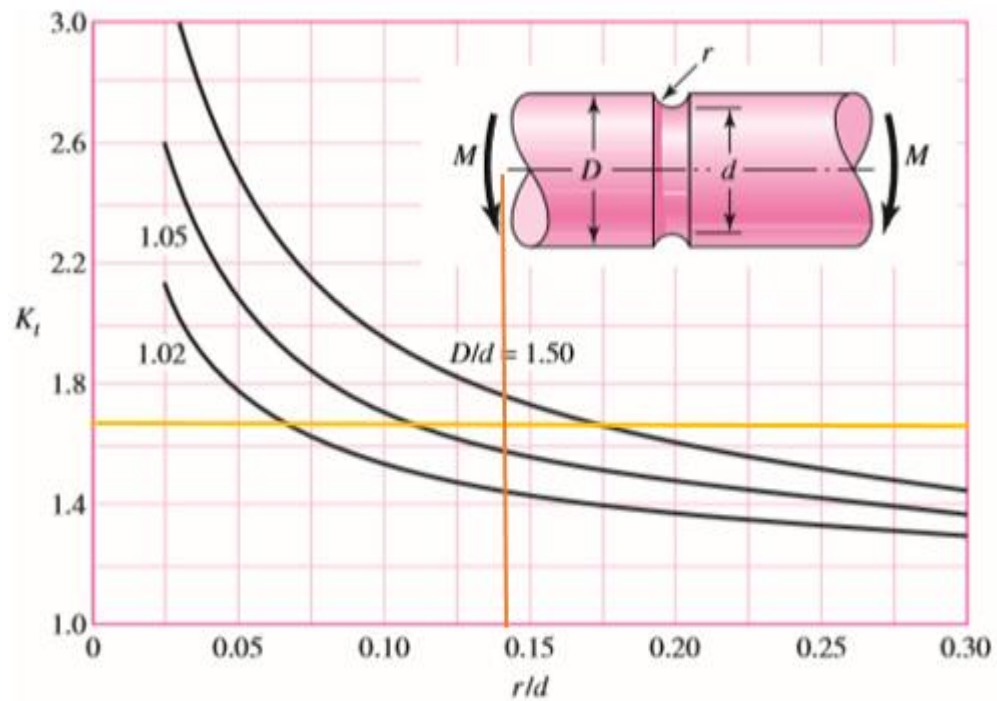
ANEXO 10

Calculo de la sensibilidad de muesca q



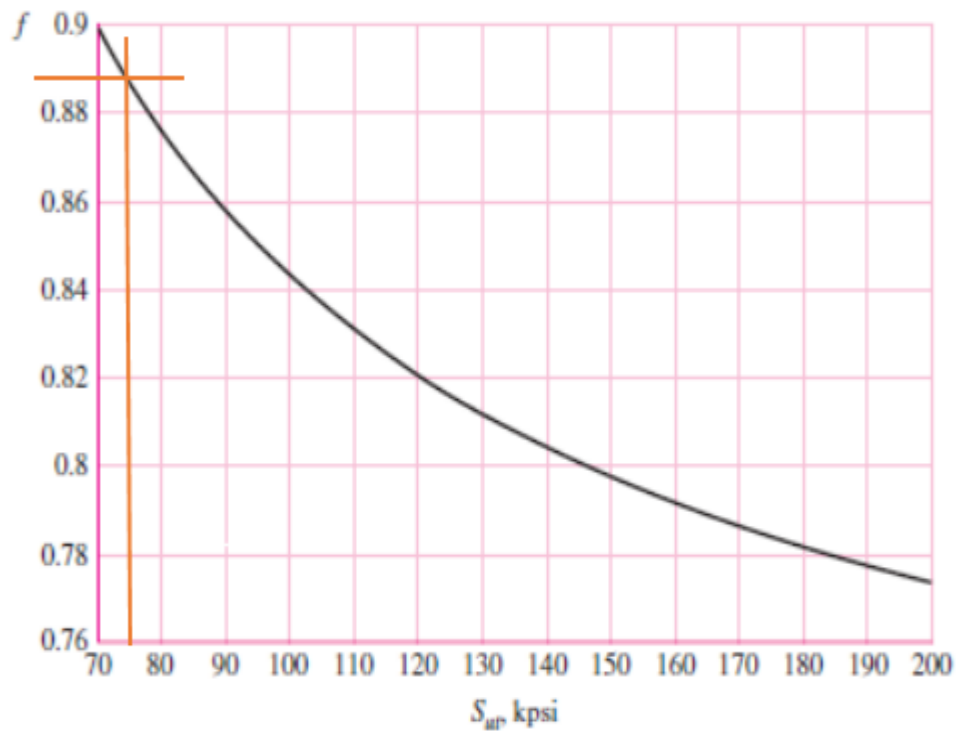
ANEXO 11

Cálculo del K_t para una barra ranurada en flexión



ANEXO 12

Fracción de resistencia a la fatiga



ANEXO 13

Factor de esfuerzos estáticos

$f_s = 1,5 \dots 2,5$ para exigencias elevadas

$f_s = 1,0 \dots 1,5$ para exigencias normales

$f_s = 0,7 \dots 1,0$ para exigencias reducidas

ANEXO 14

Exponente de vida

$p = 3$ para rodamientos de bolas

$p = \frac{10}{3}$ para rodamientos de rodillos

ANEXO 15

Factor de probabilidad de falla

▼ Factor a_1						
Probabilidad de fallo %	10	5	4	3	2	1
Vida a fatiga	L_{10}	L_5	L_4	L_3	L_2	L_1
Factor a_1	1	0,62	0,53	0,44	0,33	0,21

ANEXO 16

Factor de esfuerzos dinámicos

Bombas, ventiladores, compresores

Ventiladores, soplantes
Grandes soplantes

3,5 ... 4,5
4 ... 5

Empuje radial o axial, peso del rotor, masa desequilibrada
Masa desequilibrada = peso del rotor · fz; velocidad nominal
fz = 0,5 para soplantes de aire fresco
fz = 0,8 a 1 para extractores de humos

Bombas de émbolo
Bombas centrífugas
Bombas hidráulicas de émbolo,
axiales y radiales
Transmisiones de bombas
Compresores

3,5 ... 4,5
3 ... 4,5
1 ... 2,5
1 ... 2,5
2 ... 3,5

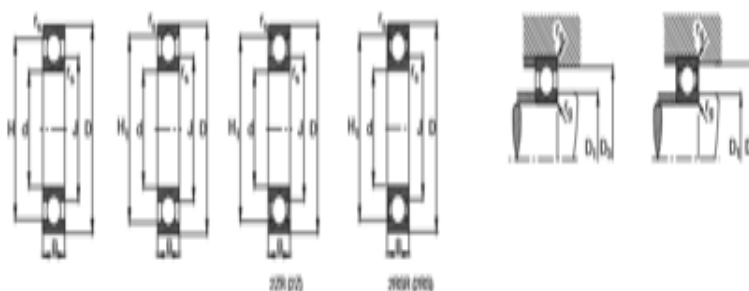
Empuje nominal; velocidad nominal
Empuje axial, peso del rotor; velocidad nominal
Presión nominal; velocidad nominal
Presión en servicio; velocidad nominal
Presión en servicio; fuerzas máxicas; velocidad nominal

ANEXO 17

Catálogo FAG

Rodamientos FAG rígidos de bolas
de una hilera

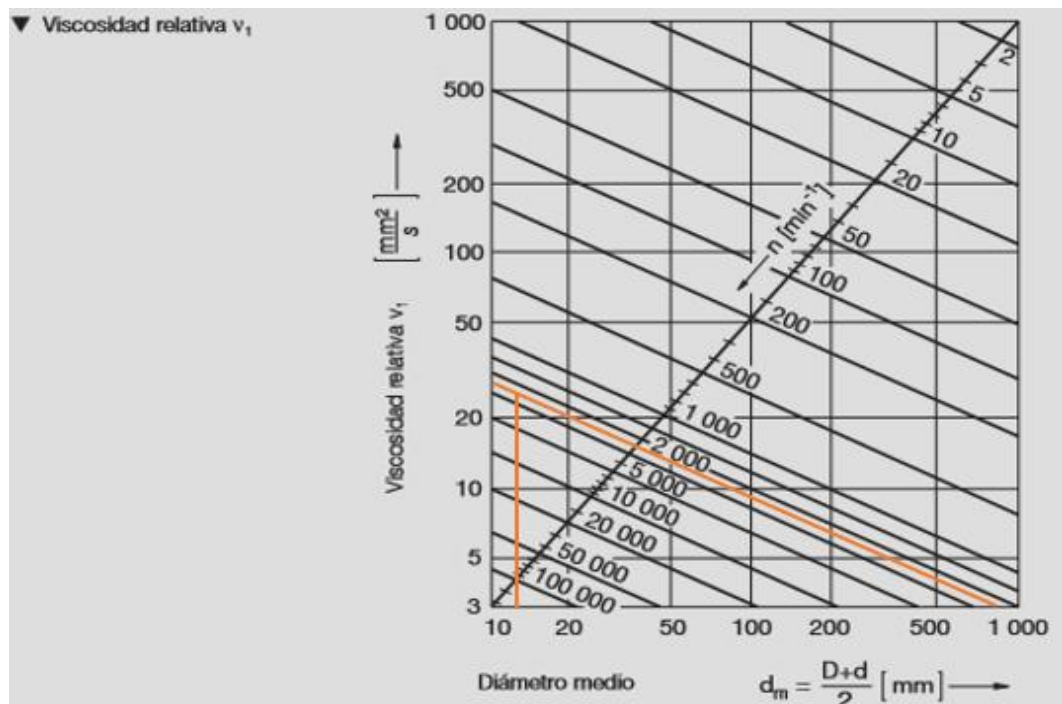
Los valores pueden variar una décima
de milímetros, véase Fig. 41.



Cp	Dimensiones							Peso m	Capacidad de carga		Velocidad límite	Velocidad de referencia	Densificación abreviada	Medidas auxiliares			
	d	D	B	r ₁	H	H ₁	J		d _{yn} C	d _{st} C ₀				Factores	D ₁	D ₂	L ₁
	mm			mm	mm	mm	mm		kg	kN				daN	mm ²	mm	mm
5	5	16	5	0,3	12,5	13,4	8,5	0,06	1,9	0,44	4000	4000	65	7,4	11,6	0,3	
	5	16	5	0,3	12,5	13,4	8,5	0,06	1,9	0,44	3000	4000	65,72	7,4	11,6	0,3	
	5	16	5	0,3	12,5	13,4	8,5	0,06	1,9	0,44	2400		65,765	7,4	11,6	0,3	
	5	19	6	0,3	15,5	16,7	10,0	0,09	2,5	1,04	3000	4000	65	7,4	16,6	0,3	
	5	19	6	0,3	15,5	16,7	10,0	0,09	2,5	1,04	2000	4000	65,72	7,4	16,6	0,3	
	5	19	6	0,3	15,5	16,7	10,0	0,09	2,5	1,04	2700		65,765	7,4	16,6	0,3	

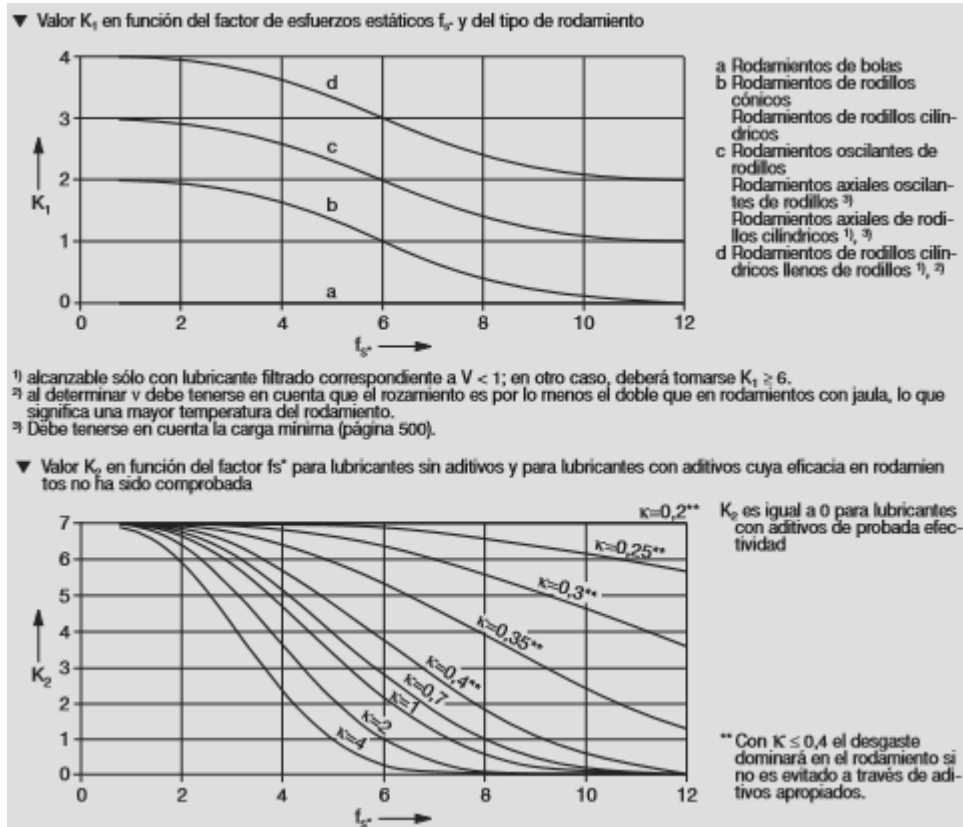
ANEXO 18

Viscosidad relativa



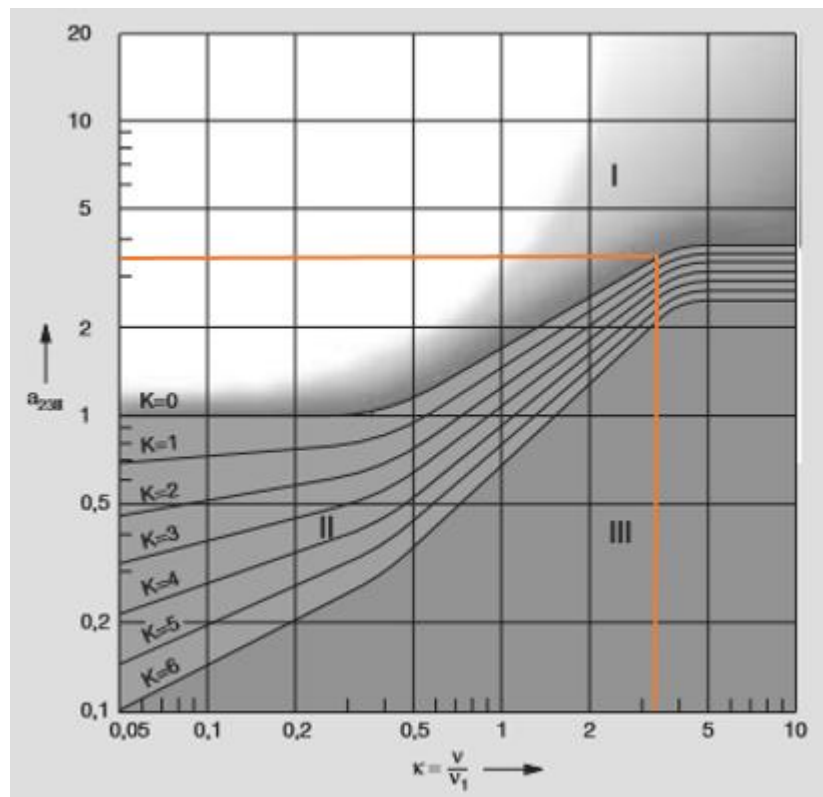
ANEXO 19

Cálculo de k_1 y k_2



ANEXO 20

Factor básico a_{23II}



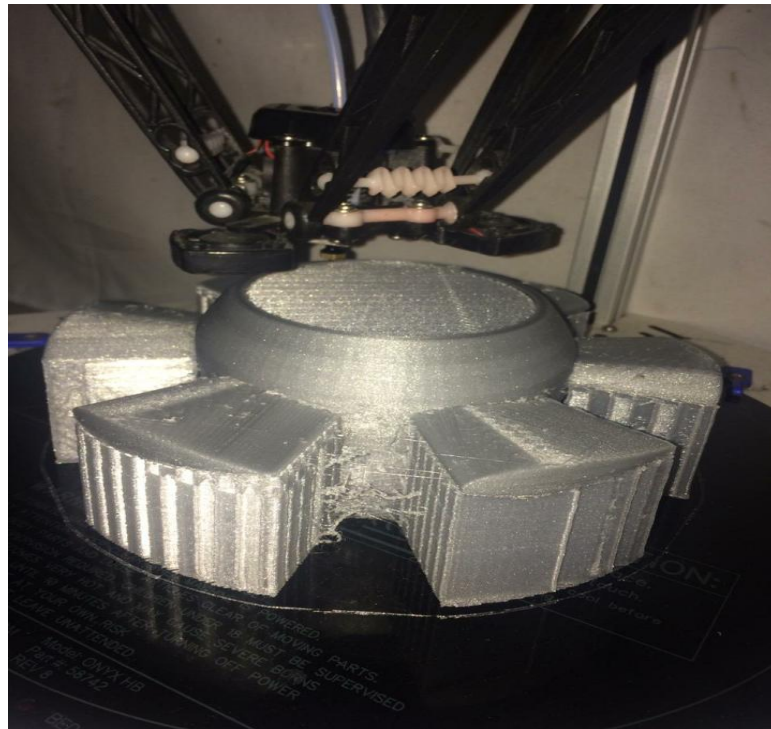
ANEXO 21

Características del generador

SLT-ZPT19						
Specification						
Model	Voltage(V)DC	Rated Current (A)	Rated Speed(r/min)	Rated Power (W)	Rated Torque (N.m)	Length (mm)
80ZYT-01A24	24	8	2500	120	0.45	145
80ZYT-02A24	24	5	1200	55	0.45	145
80ZYT-01A12	12	10	1800	60	0.35	145
80ZYT-03A24	24	8	2300	90	0.5	145
80ZYT-04A24	24	10	3000	120	0.6	145
80ZYT-05A24	24	12	3000	160	0.8	145
General scope:						
Voltage		12 & 24 V DC				
Output Power		0 - 1000 W				
Rated Speed		0-5000 RPM				
Ambient Temperature		-20℃ ~ +40℃				
Insulation class		B、F				
Use occasions		Packing machine, agricultural equipment				

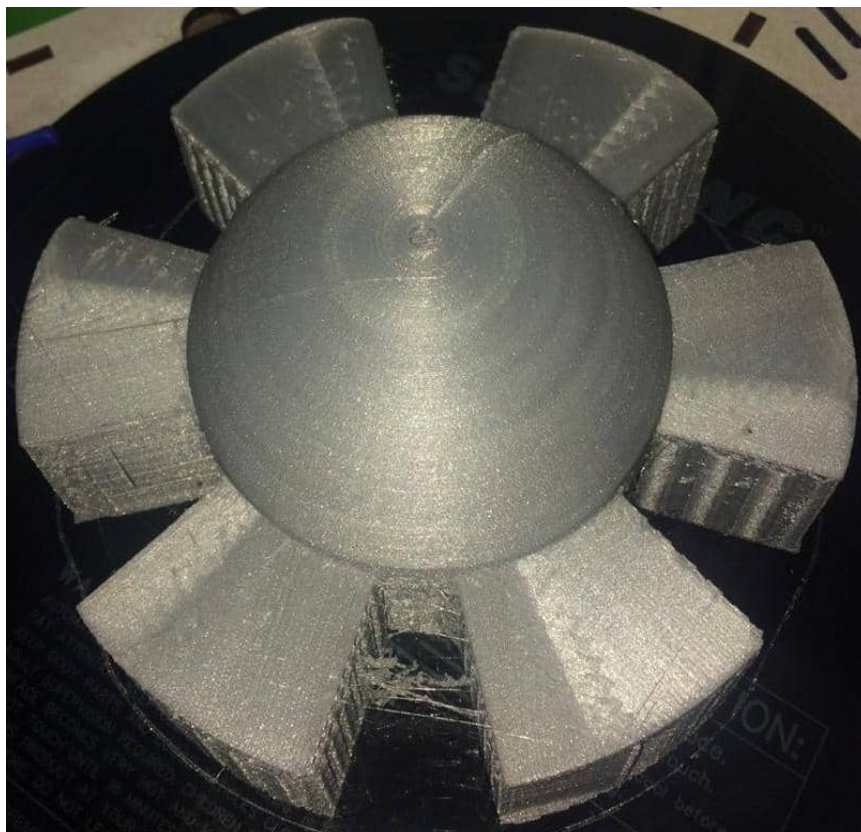
ANEXO 22

Impresión de la turbina Wells



ANEXO 23

Turbina Wells



ANEXO 24

Corte del eje



ANEXO 25

Torneado del eje



ANEXO 26

Tubo PVC de 8 pulgadas de diámetro



ANEXO 27

Corte a laser de los soportes para la turbina



ANEXO 28

Rodamientos de 5 milímetros de diámetro



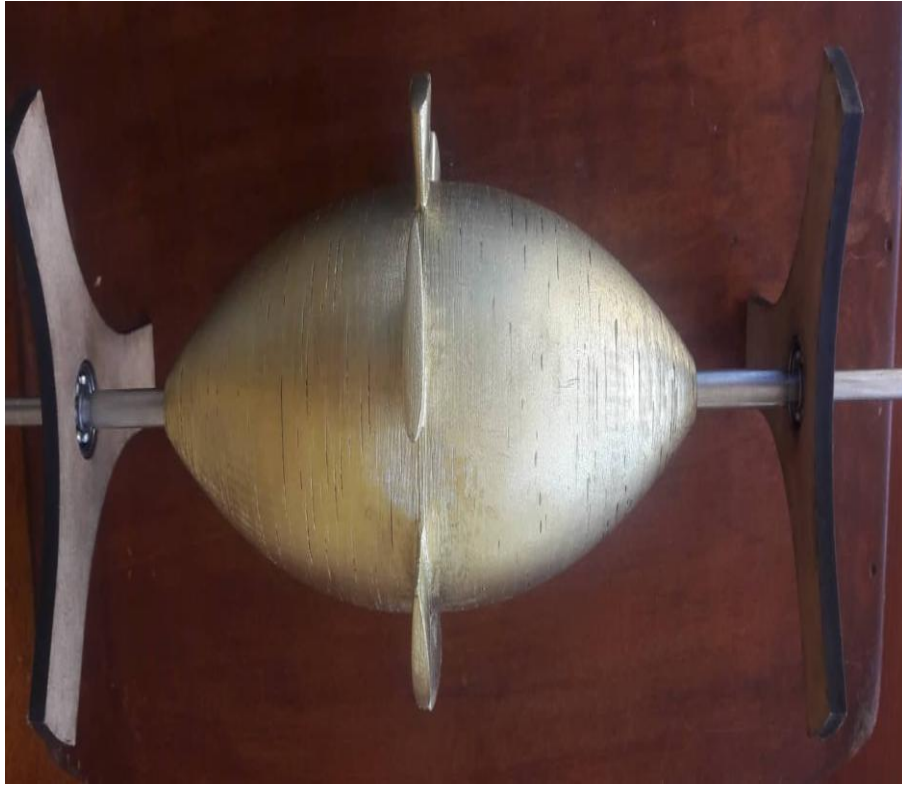
ANEXO 29

Incorporación de los rodamientos en los soportes



ANEXO 30

Instalación de los soportes en el eje con la turbina



ANEXO 31

Banco de pruebas de madera



ANEXO 32

Electroválvulas ½ pulgada



ANEXO 33

Banco de pruebas completo



ANEXO 34

Banco de pruebas en SolidWorks

