

INFORME DE ORIGINALIDAD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-303-2020-UNSAAC)

El que suscribe, **Asesor** del trabajo de investigación/tesis titulada:
... DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UNA MICRO TURBINA A VAPOR TIPO
... TESLA PARA GENERAR UN POTENCIA DE 0.5 KW

Presentado por: ... CESAR AUGUSTO QUIÑONEZ DURAND DNI N° ... 43985625
presentado por: ... WILINTON QUISPE QUISPE DNI N°: ... 43921614
Para optar el título profesional/grado académico de INGENIERO MECANICO

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por ...02... veces, mediante el Software Antiplagio, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso de Sistema Antiplagio de la UNSAAC** y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de09.....%.

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No se considera plagio.	X
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las correcciones.	
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, quien a su vez eleva el informe a la autoridad académica para que tome las acciones correspondientes. Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	

Por tanto, en mi condición de asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y **adjunto** las primeras páginas del reporte del Sistema Antiplagio.

Cusco, ..31.. de JULIO de 2025.....



Firma

Post firma... PERCY MIGUEL RUEDA PUELLES

Nro. de DNI..... 23852830

ORCID del Asesor..... 0000-0001-8141-4405

Se adjunta:

1. Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema Antiplagio: **oid:**

<https://unsaac.turnitin.com/viewer/submissions/oid:27259:477890066?locale=es-MX>

Wilinton y cesar Quispe y Quiñonez

Turbina de vapor tipo tesla

 Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::27259:477890066

Fecha de entrega

1 ago 2025, 10:52 a.m. GMT-5

Fecha de descarga

1 ago 2025, 11:06 a.m. GMT-5

Nombre de archivo

VERSIÓN FINAL_TESIS WILINTON_CESAR_17 julio (1).docx

Tamaño de archivo

7.4 MB

183 Páginas

32.923 Palabras

174.199 Caracteres

9% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- ▶ Bibliografía
- ▶ Texto citado
- ▶ Texto mencionado
- ▶ Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Exclusiones

- ▶ N.º de coincidencias excluidas

Fuentes principales

- 8%  Fuentes de Internet
- 0%  Publicaciones
- 4%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alerta de integridad para revisión

-  **Caracteres reemplazados**
34 caracteres sospechosos en N.º de páginas
Las letras son intercambiadas por caracteres similares de otro alfabeto.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Presentación

SEÑOR DECANO DE LA FACULTAD DE INGENIERIA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA, INFORMÁTICA Y MECÁNICA DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO.

En cumplimiento con las disposiciones del reglamento de grados y títulos vigente regidas en nuestra casa de estudios, damos a conocer el trabajo de investigación intitulado: **DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UNA MICRO TURBINA A VAPOR TIPO TESLA PARA GENERAR UN POTENCIA DE 0.5 KW** para optar el título profesional de Ingeniero Mecánico.

Br. Cesar Augusto Quiñonez Durand

Br. Wilinton Quispe Quispe

Dedicatorias

A mi papá. Esta tesis es un tributo a tu influencia y apoyo en mi educación. Tu amor, consejos y tu ejemplo constante han sido fundamentales en mi búsqueda de conocimiento. Cada sacrificio que hiciste por mi educación es invaluable. Mi éxito académico es un reflejo de tu amor y guía.

A mi valiente mamá. Esta tesis es el resultado de tu amor, apoyo y sacrificio en mi viaje educativo. Tus palabras de aliento, tu perseverancia han sido mi inspiración. Cada día que trabajaste incansablemente y cada vez que me brindaste tu cariño son tesoros que valoro profundamente. Esta tesis es un tributo a ti, mi fuente inagotable de fortaleza y amor en mi búsqueda de conocimiento. A través de tus enseñanzas y cariño, has dejado una huella imborrable en mi vida, y mi éxito académico es un reflejo de tu inquebrantable dedicación. Te amo con todo mi corazón y esta tesis es mi modesta forma de agradecerte por todo lo que has hecho por mí.

A mi hijo Gael Zaid. Cada día que paso a su lado es un regalo que atesoro en mi corazón. Sus risas, curiosidad e infinita capacidad de amar han sido la inspiración, razón y motivo detrás de cada esfuerzo en mi vida. Esta tesis es un pequeño testimonio de todo lo que hago, lo hago pensando en él. Gracias por llenar mi mundo de amor y dulzura.

CESAR AUGUSTO QUIÑONEZ DURAND

A Dios. Que siempre nos acompaña en todo momento, cuidándonos y protegiéndonos en los momentos difíciles, guiándonos en cada paso y decisiones importantes que tomamos en la vida y ayudarnos a alcanzar las metas que deseamos.

A mis padres Luis y Julia, pilares de mi vida, cuyo amor y sacrificio han sido el faro que me ha guiado hasta aquí. Este logro es tanto mío como suyo, porque sin su apoyo condicional, hoy no estaría aquí.

Y a ti, mi amada Ana, por ser mi refugio, mi fuente de inspiración y mi fortaleza. Tu amor ha sido el motor que me impulsó a seguir adelante en los momentos más difíciles. Gracias por estar siempre a mi lado, por creer en mí cuando más lo necesitaba.

A mis hermanos Griselda, Eder, Karina y Yovana, por su incondicional compañía, su apoyo constante y por ser siempre un refugio de cariño y comprensión en cada paso de mi vida.

A mis sobrinos, por su alegría y energía que me inspiran a mantener la curiosidad y el entusiasmo. Espero ser la inspiración que necesiten para su futuro, guiándolos con ejemplo y amor.

A mis docentes, por compartir conmigo su conocimiento, su tiempo y sus valiosas experiencias a lo largo de mi camino universitario. Gracias por ser una guía constante, por sembrar en mí el deseo de aprender y por ayudarme a llegar hasta aquí, permitiéndome culminar este trabajo con éxito.

WILINTON QUISPE QUISPE

Agradecimientos

Mi más profundo agradecimiento a mi asesor Ing. Percy Miguel Rueda Puelles, extendiendo mi sincero agradecimiento por su orientación y apoyo constante mientras fue mi asesor de tesis. Su dirección académica, llena de perspicaces comentarios, ha sido fundamental para dar forma a esta investigación y mi crecimiento como investigador. Ha sido un honor y un privilegio aprender bajo su tutela,

Quisiera expresar mi más sincero agradecimiento a mi compañero de investigación, Wilinton Quispe Quispe, por su invaluable apoyo y colaboración a lo largo de la investigación. Trabajar codo a codo con él ha sido una experiencia de aprendizaje enriquecedora, sino también una fuente de inspiración constante.

Quiero expresar mi más sincera gratitud al Comité de dictaminantes y replicantes de tesis, cuya perspicacia y dirección crítica han sido fundamentales para la culminación de este estudio. Su compromiso y aportaciones constructivas han sido esenciales para afinar y culminar la tesis.

Quisiera expresar mi más sincero agradecimiento a todos mis amigos y compañeros de estudio por su invaluable apoyo y colaboración a lo largo del tiempo de estudio en las aulas. Trabajar codo a codo con ustedes ha sido no solo una experiencia de aprendizaje enriquecedora, sino también una fuente de información e inspiración constante.

CESAR AUGUSTO QUIÑONEZ DURAND

Quiero aprovechar estas líneas para agradecer a todas las personas que han estado conmigo a lo largo de nuestra carrera universitaria en nuestra tan querida y prestigiosa Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, en la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica. Dedico este trabajo de tesis a Dios, por cuidarme y guiar mi camino en todo momento; a mis padres, que son mi fuente de inspiración y mi fuerza, las personas que siempre me brinda su amor y apoyo incondicional. A mi hermano y hermanas, por estar siempre a mi lado, brindándome su apoyo, confianza y amor, ayudándome a superar los retos que la vida me presentó. A toda mi familia, tíos y primos y sobrinos, por su constante respaldo y por sentirse siempre orgullosos de mí.

A mi pareja, por su amor, paciencia y apoyo incondicional. Siempre estuvo a mi lado, en los momentos de duda y también en los de alegría, ayudándome a seguir adelante. Tu compañía ha sido fundamental para poder alcanzar este sueño y este logro.

A mi asesor Percy M. Rueda Puellas y revisores Ing. Edgar A. Catacora Acevedo y Ing. Mario G. Castro Irrarazabal, quienes nos brindaron los conocimientos suficientes para la elaboración de la tesis, y quienes fueron grandes profesionales que tuve el honor de conocer y aprender de ellos, lo que me permitió entender lo que significa ser un verdadero ingeniero mecánico. A todos mis compañeros de clase, con quienes compartí grandes y gratos momentos, y quienes, al igual que yo, hoy celebramos el haber alcanzado esta meta juntos. A los amigos, colegas, compañeros de aula y de distintas escuelas, quienes también contribuyeron a fortalecerme desde distintas perspectivas y puntos de vista, ayudándome a enriquecer y fortalecer mi desarrollo profesional.

WILINTON QUISPE QUISPE

Introducción

El presente trabajo de investigación tiene como finalidad diseñar y construir una microturbina de vapor tipo Tesla que permita generar una potencia de 0.5 Kw. El cual está enfocado en el análisis y diseño de una turbina sin álabes o turbina Tesla con el fin de representar el comportamiento físico de la turbina mediante un modelo matemático que permita describir sus características físicas y obtener un torque teórico que sea capaz de mover un alternador de baja potencia a través del suministro de vapor de agua como fuente de alimentación mediante el uso de una caldera alimentada por bio diésel.

Inicialmente, se realizó una recopilación de información a través de antecedentes históricos sobre las principales características de una turbina Tesla (Turbina no tradicional) y en consecuencia se analizó el funcionamiento de la turbina con el fin de interpretar el fenómeno físico que lleva a cabo con el objetivo de desarrollar un modelo matemático para interpretar el comportamiento del fluido y el rotor a partir de los cuales se desarrolló un análisis a partir de la aplicación del teorema de transporte de Reynolds el cual describe la variación de la cantidad de movimiento de un sistema con respecto al tiempo considerando el principio de conservación de la energía y el teorema del trabajo y la energía cinética.

Se analizó el comportamiento del fluido a través de los discos partiendo del análisis del flujo entre placas planas paralelas infinitas tomando a los discos como dos placas planas con un comportamiento del flujo en estado laminar y completamente desarrollado obtenido un modelo simplificado de lo que sería el comportamiento de la turbina, posteriormente se hizo un análisis similar contemplando al flujo ahora como un vórtice libre el cual describe de mejor manera el comportamiento de la turbina.

Finalmente se determina el costo de la turbina en función de los materiales y la mano de obra.

Resumen

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo principal el diseño y construcción de una microturbina de vapor tipo Tesla capaz de generar una potencia de 0,5 kW, utilizando vapor de agua como fluido de trabajo. La turbina propuesta se integra al sistema térmico del laboratorio de Ingeniería Mecánica de la UNSAAC y se alimenta mediante una caldera impulsada por biodiésel, buscando una solución energética eficiente, económica y sostenible a pequeña escala.

La metodología incluyó el desarrollo de un modelo matemático que describe el comportamiento del fluido entre los discos de la turbina, aplicando el teorema del transporte de Reynolds y el análisis de capa límite. Se analizaron esfuerzos mecánicos en los discos y se diseñaron los componentes principales con base en criterios térmicos, estructurales y geométricos. Además, se realizaron simulaciones computacionales para validar el desempeño del diseño bajo diferentes condiciones de operación.

Los resultados obtenidos a partir de la simulación y el análisis teórico permitieron estimar el torque y la potencia generada, validando la viabilidad del diseño para alcanzar el objetivo de 0,5 kW. La construcción del prototipo confirmó la factibilidad del diseño y permitió realizar pruebas preliminares bajo condiciones controladas.

Se concluye que la microturbina Tesla representa una alternativa viable para la generación de energía eléctrica en entornos residenciales o rurales, destacando por su simplicidad constructiva, bajo mantenimiento, eficiencia aceptable y potencial de adaptación a diversas fuentes térmicas.

Palabras claves, potencia, presión, temperatura, velocidad angular.

Abstract

This research aims to design and construct a Tesla-type micro steam turbine capable of generating 0.5 kW of electrical power, using water vapor as the working fluid. The proposed turbine is integrated into the thermal system of the Mechanical Engineering laboratory at UNSAAC and is powered by a biodiesel-fueled boiler, offering an efficient, low-cost, and sustainable energy solution for small-scale applications.

The methodology involved the development of a mathematical model to describe the fluid behavior between the turbine's disks, applying Reynolds Transport Theorem and boundary layer analysis. Mechanical stress on the rotating disks was also evaluated, and the main components were designed based on thermal, structural, and geometric criteria. Computational simulations were performed to assess the performance of the design under various operating conditions.

Results from both simulation and theoretical analysis allowed for the estimation of torque and output power, confirming the feasibility of achieving the target power output of 0.5 kW. The prototype construction validated the design and enabled preliminary testing under controlled conditions.

It is concluded that the Tesla micro steam turbine presents a viable alternative for electricity generation in residential or rural environments, standing out due to its simple construction, low maintenance requirements, acceptable efficiency, and potential adaptability to various thermal energy sources.

Índice General

Presentación -----	2
Dedicatorias -----	3
Agradecimientos -----	5
Introducción -----	7
Resumen -----	8
Abstract -----	9
Índice General -----	10
Índice de Figuras -----	18
Índice de Tablas -----	20
Índice de Anexos -----	21
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN GENERAL -----	22
1.1. Planteamiento del problema -----	22
1.2. Necesidad de Turbinas más eficientes -----	23
1.3. Formulación del problema -----	23
1.3.1 Problema general	23
1.3.2. Problema específico	23
1.4. Justificación del estudio -----	24
1.4.1. Oportunidades de Optimización en el Diseño de Turbinas.....	25
1.5. Objetivos de la investigación -----	25
1.5.1. Objetivo General.....	25
1.5.2. Objetivos Específicos.....	25

1.6.	Alcances-----	26
1.7.	Limitaciones-----	27
1.7.1.	Limitaciones técnicas del equipo	27
1.7.2.	Limitaciones económicas.....	27
1.8.	Metodología-----	28
1.8.1.	Enfoque de la investigación	28
1.8.2.	Tipo y nivel de investigación	28
1.8.2.1.	Tipo-----	28
1.8.2.2.	Nivel-----	28
1.8.3.	Diseño de investigación	29
1.8.4.	Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	29
1.8.5.	Fases de la Metodología.....	30
1.8.5.1.	Estudio Teórico-----	30
1.8.5.2.	Diseño Termodinámico-----	30
1.8.5.3.	Diseño mecánico-----	30
1.8.5.4.	Protocolo de pruebas-----	31
1.8.5.5.	Especificaciones técnicas-----	31
1.8.5.6.	Evaluación económica-----	31
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO-----		32
2.1.	Turbinas de Vapor-----	32
2.1.1.	Definición de Turbina de Vapor	32
2.1.2.	Principios de Funcionamiento de una Turbina de Vapor.....	33
2.1.3.	Tipos de Turbinas de Vapor.....	34
2.1.3.1.	Turbinas de Impulso-----	34
2.1.3.2.	Turbinas de Reacción-----	36
2.2.	Microturbinas-----	38
2.2.1.	Características Principales de las Microturbinas.....	38

2.2.2.	Principio de Funcionamiento de las Microturbinas	38
2.2.3.	Aplicaciones.....	39
2.3.	Turbina tipo Tesla-----	39
2.3.1.	Historia y Desarrollo.....	39
2.3.2.	Descripción de la Turbina de Vapor Tesla.....	43
2.3.3.	Características de la Turbina de Vapor Tesla	43
2.3.4.	Componentes de la Turbina de Vapor Tesla.....	44
2.3.4.1.	Componentes principales-----	44
2.3.4.2.	Diseños y materiales-----	45
2.3.5.	Ventajas de la Turbina Tesla sobre Turbinas Tradicionales	46
2.3.6.	Aplicaciones de la Turbina Tesla.....	46
2.3.7.	Estudios recientes sobre la turbina tesla.....	47
2.3.8.	Innovaciones y Mejoras en el Diseño de Turbinas de Vapor.....	48
2.3.9.	Uso de Diferentes Fluidos en Turbinas de vapor tipo Tesla	49
2.3.10.	Construcción de la Turbina de Vapor Tesla.....	49
2.3.11.	Principio de Operación de la Turbina de Vapor Tesla.....	50
2.3.12.	Principio de funcionamiento	51
2.3.13.	Capa Límite.....	55
2.3.14.	Velocidad del Fluido.....	57
2.3.15.	Viscosidad dinámica	58
2.3.16.	Esfuerzo y deformación del disco.....	59
2.3.17.	Esfuerzo máximo	61
2.4.	Modelo matemático del fluido entre los discos -----	62
2.4.1.	Modelo matemático que describe el funcionamiento de una turbina Tesla	62

2.4.2.	Análisis del flujo mediante el modelo simplificado.....	65
2.5.	Método del vórtice libre-----	72
2.6.	Vapor de Agua como Fluido Energético -----	76
2.6.1.	Propiedades termodinámicas.....	76
2.6.2.	Ventajas del uso del vapor de agua	78
2.6.3.	Desafíos técnicos y ambientales del uso del vapor de agua.....	78
2.7.	Calderas de vapor -----	79
2.7.1.	Tipos y funcionamiento	79
2.7.2.	Cómo se relacionan con las turbinas Tesla	80
2.8.	Definición de términos -----	80
2.8.1.	Glosario.....	80
CAPÍTULO 3: DISEÑO TERMODINAMICO -----		82
3.1.	Objetivo del diseño -----	82
3.2.	Selección del modelo y configuración-----	83
3.2.1.	Análisis de requisitos de potencia.....	84
3.2.2.	Comparaciones de configuraciones de turbina Tesla y Turbina con alabes.....	86
3.2.3.	Impacto del diseño en el mantenimiento y durabilidad	89
3.2.4.	Análisis teórico de la turbina	90
3.2.5.	Procedimiento de operación de la planta térmica.	93
3.3.	Diseño térmico de la Turbina de vapor tipo Tesla -----	94
3.3.1.	Diseño de componentes	94
3.3.1.1.	Flujo másico (m) -----	95
3.3.1.2.	Caudal volumétrico (Q) -----	95
3.3.1.3.	Velocidad del vapor de agua (V)-----	96

3.3.1.4.	Determinación del tipo de fluido	97
3.3.1.5.	Espacio entre los discos (b)	98
3.3.1.6.	Radio externo (<i>re</i>)	98
3.3.1.7.	Radio interno (<i>ri</i>)	99
3.3.1.8.	Número de discos	100
3.3.1.9.	Torque en el eje de la turbina mediante el método del vórtice libre	102
3.3.1.10.	Potencia en el eje de la turbina	104
3.4.	Eficiencia de la turbina de vapor tipo Tesla	105
3.5.	Simulación computacional	108
3.5.1.	Geometría	109
3.5.2.	Diseño de la turbina Tesla	109
3.5.3.	Configuración de la polea y los soportes	109
3.5.4.	Consideraciones de diseño	111
3.5.5.	Enmallado	111
3.5.5.1.	Configuración de enmallado	111
3.5.5.2.	Calidad de la malla	112
3.5.5.3.	Optimización del enmallado	113
3.5.6.	Configuración y solución	113
3.5.6.1.	Modelos físicos	113
3.5.7.	Condiciones de frontera	114
3.5.8.	Métodos numéricos	115
3.5.9.	Iniciación y tiempo de simulación	115
3.5.10.	Iniciación y tiempo de simulación	116
3.5.11.	Variación de velocidad (Temperatura de ambiente: 300 K)	116
3.5.12.	Variación de velocidad (Temperatura de ambiente: 300 K)	118
CAPÍTULO 4: DISEÑO MECANICO		123
4.1.	Diseño mecánico en el eje	123

4.2.	Análisis estático para la determinación de reacciones en los puntos d soporte-----	124
4.3.	Análisis y diseño de la deflexión en el eje de la Turbina -----	125
4.4.	Ecuación diferencial de la viga relacionada con el momento flector -----	127
4.5.	Momento de inercia-----	130
4.6.	Momento de inercia polar -----	131
4.7.	Angulo de torsión en el eje de la turbina de vapor Tesla -----	132
4.8.	Especificaciones técnicas para la selección de la chaveta en el eje de la turbina --	132
4.8.1.	Transmisión de par de torsión.....	132
4.8.2.	Dimensiones de la chaveta.....	133
4.8.3.	Tipo de chaveta	134
4.8.4.	Zonas de tolerancia	134
4.8.5.	Bordes redondeados	134
4.8.6.	Materiales y normas aplicables.....	134
4.8.7.	Mecanizado	134
4.9.	Análisis vibracional en el eje de la microturbina Tesla -----	135
4.9.1.	Ecuación de los modos de vibración.....	135
4.9.2.	Solución para modos naturales (sin amortiguamiento y sin fuerza externa:.....	135
4.9.2.	Amplitudes de vibración	136
4.9.3.	Velocidad critica	136
4.10.	Análisis vibracional en el eje de la microturbina Tesla -----	136
4.10.1.	Frecuencias naturales	136
4.10.2.	Amplitudes en resonancia:	137
4.10.3.	Efecto giroscópico:	137

4.11.	Análisis vibracional mediante elementos finitos FEN -----	137
4.11.1.	Resultados del estudio.....	151
4.11.2.	Frecuencias naturales obtenidas:.....	151
4.11.3.1.	Los resultados muestran frecuencias en Hz y rad/s:	151
4.11.3.2.	Amplitudes máximas reportadas:	151
CAPÍTULO 5: PROTOCOLO DE PRUEBAS -----		152
5.1.	Redacción de protocolo de pruebas -----	152
5.2.	Análisis de la relación entre la velocidad angular y la potencia mecánica generada en el eje-----	153
5.3.	Análisis de la relación entre la presión y la velocidad angular del eje-----	155
5.4.	Análisis de la relación entre la presión del vapor de agua y la temperatura -----	156
5.5.	Integración -----	157
5.1.1.	Conexión con la caldera.....	157
5.1.2.	Sistemas de control	158
CAPÍTULO 6: ESPECIFICACIONES TECNICAS-----		160
6.1.	Materiales y equipos seleccionados -----	160
6.2.	Fabricación de componentes principales -----	160
6.2.1.	Discos.....	160
6.2.2.	Separadores.....	161
6.2.3.	Eje	161
6.2.4.	Carcasa.....	162
6.3.	Especificaciones técnicas de la construcción -----	162
6.3.1.	Montaje del rotor.....	162

6.3.2. Instalación en la carcasa.....	163
6.3.3. Entrada de vapor	164
6.4. Fluido de trabajo -----	164
CAPÍTULO 7: EVALUACION ECONÓMICO -----	166
7.1. Costos del proyecto-----	166
7.2. Costos de fabricación y operación-----	166
7.2. Costos de materiales y construcción -----	167
7.3. Costos de materiales consumibles-----	168
7.4. Costos de materiales consumibles-----	168
7.5. Costos de Ingeniería -----	169
CONCLUSIONES -----	171
RECOMENDACIONES -----	173
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS -----	175
ANEXOS -----	178

Índice de Figuras

Figura 1. Turbina Tesla original	42
Figura 2. Nomenclatura de la Turbina Tesla.....	51
Figura 3. Fluido viscoso entre dos placas	52
Figura 4. Trayectoria de flujo en una turbina Tesla.....	53
Figura 5. Sistema de coordenadas.....	54
Figura 6. Elementos de fluido orientación de fuerzas y velocidades.....	55
Figura 7. Representación conceptual de flujos laminares y turbulentos en la capa límite.....	56
Figura 8. Velocidad entre dos discos de una turbina Tesla.....	56
Figura 9. Triángulo de velocidades de una turbina Tesla	58
Figura 10. El esfuerzo cortante	59
Figura 11. Geometría de disco más eficiente.....	60
Figura 12. Geometría rotatorio y esfuerzos en el disco	60
Figura 13. Fuerza total que actúa sobre un volumen de control está formada por fuerzas de cuerpo y fuerzas de superficie.....	63
Figura 14. Volumen de control para el análisis de flujo entre dos placas infinitas paralelas estacionarias.....	66
Figura 15. Representación del esfuerzo cortante entre los discos.....	67
Figura 16. Representación del sistema del disco.	69
Figura 17. Representación de la entrada del fluido en 2 posiciones diferentes	71
Figura 18. Modelo del vórtice libre	73
Figura 19. Diagrama de temperatura y entropía	77
Figura 21. Partes de la planta térmica.....	92
Figura 22. Tanque de combustible y válvula principal de agua.....	93
Figura 23. Radio interno de los discos.....	100
Figura 24. Relación del torque con respecto al radio para diferentes valores de b	102
Figura 25. Diámetro de entrada y salida de la tobera.....	103

Figura 26. Diagrama de Mollier Entalpia y Entropía.....	107
Figura 27. Estructura del analisis Fluid Flow (Fluent)	108
Figura 28. Vista de perfil diagonal del diseño CAD que muestra la turbina Tesla, las poleas y el soporte de fijación.....	110
Figura 29. Enmallado del fluido. Se aprecia que el enmallado en los bordes fue redimensionado para no superar el límite de la versión Estudiante.....	112
Figura 30. Potencia generada con una variación de la velocidad de ingreso del fluido. Temperatura 300K - 26°C (temperatura ambiente)	118
Figura 31. Distribución del vapor de agua. Mapa de calor de la velocidad del fluido.....	119
Figura 32. Distribución de presión del fluido dentro de la turbina	120
Figura 33. Potencia generada con una variación de Temperatura 300K.....	121
Figura 34. Potencia generada con una variación de cantidad de discos. Temperatura 300K y velocidad 100 m/s.	122
Figura 35. Diagrama de fuerzas en el eje de la turbina Tesla	124
Figura 36. Diseño de la deflexión para una distancia cerca de 210 mm.	125
Figura 37. Diagrama de esfuerzo cortante y momento flector en el eje.....	127
Figura 38. Chaveta paralela S/DIN-6885/1.....	133
Figura 39. Relación entre la velocidad angular y la potencia mecánica generada en el eje ..	154
Figura 40. Relación entre la presión y la velocidad angular	155
Figura 41. Relación entre la presión del vapor de agua y la temperatura	156
Figura 42. Discos, separadores en el eje de la turbina Tesla.....	163
Figura 43. Carcasa con los discos, separadores y eje de la Turbina Tesla.....	164
Figura 44. Turbina Tesla en funcionamiento	165

Índice de Tablas

Tabla 1 Resumen comparativo técnico de las turbinas a vapor	87
Tabla 2 Resumen de características de las turbinas a vapor	88
Tabla 3 Parámetros para el diseño de la Turbina Tesla.	94
Tabla 4 Datos de la tobera de la Turbina Tesla.....	94
Tabla 5 Propiedades del vapor de agua.....	96
Tabla 6 Condiciones de trabajo para el flujo entre discos	101
Tabla 7 Resultados de variación de la velocidad de ingreso del fluido	117
Tabla 8 Resultados de variación de la temperatura del fluido	120
Tabla 9 Variación de cantidad de discos.....	121
Tabla 10 Propiedades de estudio.....	138
Tabla 11 Unidades de medida.....	138
Tabla 12 Propiedades del material	139
Tabla 13 Cargas y sujeciones.....	141
Tabla 14 Definiciones de conector de pasador/perno/rodamiento	142
Tabla 15 Información de interacción	143
Tabla 16 Información de malla	144
Tabla 17 Propiedades de estudio.....	145
Tabla 18 Lista de modos	150
Tabla 19 Participación de masa (Normalizada)	150
Tabla 20 Valores de presión, temperatura, velocidad angular y potencia en el eje	152
Tabla 21 Costo total de fabricación y operación de la micoturbina de vapor tipo Tesla	167
Tabla 22 Metrado de materiales para fabricación.....	167
Tabla 23 Metrado de materiales para experimentación	168
Tabla 24 Metrado de costo total de operación de la microturbina Tesla	169
Tabla 25 Metrado de costo total de ingeniería de microturbina tesla	170

Índice de Anexos

Planos de ensamble isométrico de la turbina vapor tesla (Anexo A).....	178
Planos de discos y separadores de discos de la turbina (Anexo B).....	179
Planos del eje y chaveta de la turbina (Anexo C)	180
Planos de las dimensiones de la carcasa de la turbina (Anexo D)	181
Planos y dimensiones de la volanda de apriete y tuerca de ajuste (Anexo E).....	182
Panel fotográfico del proceso de construcción y pruebas de la turbina (Anexo F).....	183



CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1. Planteamiento del problema

En la actualidad, la búsqueda de soluciones energéticas alternativas es una prioridad global debido a la creciente demanda de energía, los altos costos asociados a las fuentes tradicionales y los impactos ambientales negativos derivados del uso de combustibles fósiles. Dentro de este contexto, las microturbinas de vapor representan una opción prometedora, especialmente en aplicaciones de pequeña escala donde se requiere una generación de energía eficiente, sostenible y de bajo costo.

La presente investigación se enfoca en el diseño y construcción de una microturbina de vapor tipo Tesla, capaz de generar una potencia mecánica de 0,5 kW. Este tipo de turbina resalta por su diseño simple, sin álabes, lo que reduce los costos de fabricación y mantenimiento, a la vez que ofrece una operación más silenciosa y eficiente en comparación con las turbinas de vapor tradicionales. Sin embargo, las microturbinas tipo Tesla no han sido ampliamente explotadas en el ámbito de la generación de energía a pequeña escala, lo que plantea desafíos técnicos y de diseño.

El problema central que aborda esta investigación es la falta de estudios aplicados que demuestren la viabilidad de utilizar una microturbina de vapor tipo Tesla para la generación de energía mecánica en potencias bajas, como 0,5 kW. Además, se busca determinar si es posible optimizar el diseño y los materiales de la turbina para alcanzar un rendimiento eficiente en términos de conversión de energía térmica en energía mecánica, y posteriormente en energía eléctrica, con un enfoque en su aplicación en entornos residenciales o rurales, donde las opciones energéticas son limitadas.

Por tanto, el problema radica en diseñar y construir una microturbina de vapor tipo Tesla que cumpla con los requisitos técnicos y operativos para generar 0,5 kW de potencia mecánica experimental, garantizando la estabilidad y bajo costo en su fabricación y mantenimiento.



1.2. Necesidad de Turbinas más eficientes

El problema del sistema de la caldera de vapor en el caso específico del laboratorio térmico de Ingeniería Mecánica UNSAAC-CUSCO es que no existe una turbina de vapor tipo Tesla que aproveche la energía térmica de la caldera (KW, KG/H), la potencia y/o presión de vapor pueden ser aprovechadas por una turbina de vapor tesla para originar una potencia térmica útil.

El uso de un montaje de una turbina de vapor Tesla en el sistema de vapores en la caldera del laboratorio de Ingeniería Mecánica (UNSAAC) será beneficioso para producir otro tipo de energía mecánica que pueda alimentar nuevos sistemas que requieran una fuente de potencia calorífica; por ejemplo: para un sistema de aire acondicionado, ventilación, refrigeración y/o calefacción; así como, para el ambiente de los estudiantes universitarios y como un modelo de prototipo para instalaciones similares en otras instituciones nacionales o privadas.

Por las consideraciones mencionadas, la presente investigación pretende responder a la siguiente interrogante:

¿De qué manera el diseño de una microturbina de vapor tipo Tesla de 0,5 kW de potencia aprovechará la energía de los vapores de una caldera?

1.3. Formulación del problema

1.3.1 *Problema general*

¿Cómo determinar el diseño y la construcción de una microturbina de vapor tipo Tesla para generar una potencia de 0,5 kW que esté integrada a la planta térmica del laboratorio de Ingeniería Mecánica?

1.3.2 *Problema específico*

¿De qué manera se podría efectuar el diseño térmico de la turbina de vapor tipo tesla?

¿Cómo desarrollar el diseño mecánico de la turbina de vapor?

¿Cómo desarrollar el protocolo de pruebas experimentales?



¿Es posible determinar los costos directos e indirectos del diseño y fabricación de la turbina?

1.4. Justificación del estudio

La creciente demanda energética, el agotamiento de recursos fósiles y el impacto ambiental asociado al uso de fuentes tradicionales de energía hacen indispensable la búsqueda de alternativas sostenibles, eficientes y de bajo costo. En este contexto, el desarrollo de tecnologías orientadas a la generación descentralizada y a pequeña escala resulta crucial, especialmente en regiones donde el acceso a redes eléctricas es limitado o económicamente inviable.

La presente investigación se centra en el diseño y construcción de una microturbina de vapor tipo Tesla, de una potencia de 0,5 kW, como una propuesta innovadora para la generación de energía a partir de vapor de agua. A diferencia de las turbinas de vapor tradicionales, la turbina Tesla se caracteriza por su diseño sin álabes, el cual reduce significativamente el desgaste mecánico, los costos de fabricación y mantenimiento, además de permitir un funcionamiento más silencioso y compacto. Estas cualidades la convierten en una alternativa viable y atractiva para aplicaciones domésticas, rurales o institucionales.

La turbina Tesla ofrece, además, una plataforma didáctica de gran valor para la investigación y la formación de estudiantes en temas de transferencia de calor, mecánica de fluidos, diseño de máquinas térmicas y eficiencia energética. Su integración al sistema térmico del laboratorio de Ingeniería Mecánica de la UNSAAC no solo permitirá aprovechar el potencial energético del vapor generado en calderas existentes, sino también servirá como modelo replicable en otras instituciones educativas o centros de innovación tecnológica. Este estudio no solo busca validar la factibilidad técnica y económica de la microturbina, sino también abrir nuevas líneas de investigación en el diseño de turbomáquinas basadas en el efecto de capa límite, contribuyendo así al avance de soluciones energéticas más limpias, asequibles y adaptadas a las necesidades locales.



1.4.1. Oportunidades de Optimización en el Diseño de Turbinas

Una de las principales ventajas de la turbina Tesla radica en su potencial para mejorar la eficiencia en la conversión de energía. Su diseño sin álabes minimiza las pérdidas por fricción y turbulencia, lo que se traduce en un mejor aprovechamiento de la energía térmica del fluido. Esta característica, combinada con su estructura de discos paralelos, permite una mayor flexibilidad operativa y adaptabilidad a diferentes condiciones de flujo.

La turbina Tesla también presenta una notable versatilidad en cuanto al tipo de fluido de trabajo, ya que puede operar con agua, vapor, aire, gases e incluso algunos líquidos especiales. Esta capacidad la posiciona como una opción aplicable a diversas industrias, desde la generación eléctrica hasta sistemas de propulsión o recuperación de calor.

Además, su diseño innovador y sencillo facilita su análisis, comprensión y adaptación para otras aplicaciones tecnológicas. La experiencia obtenida con esta investigación servirá de base para el estudio y rediseño de calderas en instituciones públicas y privadas, impulsando el desarrollo de tecnologías energéticas locales a partir de recursos disponibles y accesibles.

1.5. Objetivos de la investigación

1.5.1. Objetivo General

Diseñar y construir una microturbina de vapor tipo Tesla de 0.5 kW de potencia que esté integrada a la planta de generación del laboratorio de Ingeniería Mecánica.

1.5.2. Objetivos Específicos

- Efectuar el diseño térmico de la turbina Tesla.
- Desarrollar el diseño mecánico de la turbina tipo Tesla.
- Efectuar Protocolo de pruebas
- Evaluación económica



1.6. Alcances

El presente estudio abarca el diseño y la construcción de un prototipo funcional de microturbina de vapor tipo Tesla, con la capacidad de generar una potencia mecánica en el eje de 0.5 kW. El trabajo se centra en la determinación de los parámetros térmicos, geométricos y mecánicos fundamentales que permitan alcanzar la capacidad operativa esperada, incluyendo el desarrollo de modelos matemáticos que describen el comportamiento del flujo de vapor entre los discos y la transferencia de energía mediante el efecto de capa límite. Además, se busca llegar a desarrollar el análisis termodinámico detallado y la producción de energía mecánica transmitida al eje de la turbina Tesla, como parte fundamental para verificar su desempeño energético.

Se realizará una simulación numérica utilizando el software ANSYS Fluent. Esta herramienta de dinámica de fluidos computacional (CFD) permitirá modelar el comportamiento del flujo de vapor dentro de la turbina, evaluando variables clave como la distribución de presiones, velocidades, temperaturas y la transferencia de momento entre el fluido y los discos. De esta manera, ANSYS Fluent será fundamental para complementar los resultados obtenidos en los modelos matemáticos y pruebas físicas, permitiendo una mejor comprensión del fenómeno físico y una mejora en la eficiencia y confiabilidad del sistema.

Se realizará una evaluación básica del análisis vibracional en el eje de la microturbina de vapor tipo Tesla con el objetivo de identificar las frecuencias naturales y posibles modos de vibración durante su operación. Este análisis permitirá detectar condiciones que puedan generar resonancias o esfuerzos dinámicos excesivos que comprometan la integridad estructural del eje. La evaluación se efectuará mediante métodos analíticos simplificados y mediciones experimentales preliminares, proporcionando información esencial para garantizar la estabilidad y confiabilidad mecánica del sistema bajo las condiciones de trabajo previstas.



1.7. Limitaciones

1.7.1. Limitaciones técnicas del equipo

La investigación se realizó en un entorno académico con recursos limitados. La falta de instrumentación especializada para medir el flujo másico de vapor obligó a utilizar métodos indirectos, los cuales, aunque funcionales, introdujeron incertidumbre en las mediciones del caudal. Esta limitación impactó la precisión en la evaluación de la eficiencia energética y el rendimiento de la turbina.

1.7.2. Limitaciones económicas

La investigación se realizó dentro de un contexto académico donde los recursos financieros eran limitados. Este factor influyó directamente en las decisiones sobre la selección de materiales y la implementación de ciertas tecnologías avanzadas. Debido a las restricciones presupuestarias, se optó por utilizar materiales de bajo costo, como el acero inoxidable SAE 304 L, y procesos de fabricación menos costosos, como el corte y ensamblaje manual. Aunque estos materiales y métodos son adecuados para el desarrollo de un prototipo funcional, no permiten alcanzar el nivel de eficiencia y durabilidad que sería necesario para aplicaciones.

El presupuesto también condicionó la elección de herramientas y equipos para las simulaciones computacionales. Se utilizó la versión estudiante del software ANSYS, lo que limitó la cantidad de celdas en la malla y el acceso a modelos avanzados.

El presente estudio no abordará el análisis de la producción de energía eléctrica generada del funcionamiento de la microturbina de vapor tipo Tesla. La investigación se centra exclusivamente en el diseño, construcción y análisis térmico y mecánico de la turbina.



1.8. Metodología

1.8.1. *Enfoque de la investigación*

La presente investigación adopta un enfoque cuantitativo debido a que se fundamenta en la recolección y análisis de datos numéricos para validar experimentalmente el desempeño de una microturbina de vapor tipo Tesla. A través de mediciones de presión, temperatura, velocidad angular y potencia generada, se busca comprobar si el diseño propuesto cumple con el objetivo de entregar 0.5 kW de potencia mecánica en el eje.

1.8.2. *Tipo y nivel de investigación*

1.8.2.1. *Tipo*

El tipo de investigación que se lleva a cabo en esta tesis es de carácter aplicada. Esto se debe a que se enfoca en resolver un problema práctico relacionado con la generación de energía a pequeña escala utilizando una microturbina de vapor tipo Tesla. La investigación tiene como objetivo diseñar y construir un prototipo funcional de una turbina que pueda generar 0.5 kW de potencia mecánica. Esta investigación es tecnológica, dado que se centra en el desarrollo de un equipo que transforma energía térmica en energía mecánica.

1.8.2.2. *Nivel*

En cuanto a su nivel, la investigación es:

- **Descriptiva**, porque detalla las características, dimensiones, materiales y condiciones operativas del sistema diseñado.
- **Explicativa**, dado que analiza las relaciones causa-efecto entre las variables de entrada (como presión y temperatura del vapor) y la potencia generada.



- **Experimental**, puesto que se lleva a cabo una validación práctica y controlada en laboratorio para comprobar los resultados del diseño.

1.8.3. Diseño de investigación

El diseño de la investigación es experimental para la evaluación funcional del prototipo, dado que parte de una hipótesis técnica fundamentada en los principios físicos del efecto Tesla en turbinas de vapor. Esta hipótesis se prueba mediante la fabricación y puesta en marcha de un prototipo funcional de microturbina de vapor tipo Tesla.

El desempeño del sistema se evalúa a partir de variables cuantitativas clave, tales como:

- Presión de entrada del vapor
- Temperatura del vapor
- Velocidad angular del eje
- Potencia mecánica entregada en el eje de la turbina

El análisis de estas variables permite comprobar internamente si el prototipo alcanza la potencia mecánica de 0.5 kW. Este diseño permite comprobar la factibilidad técnica y el comportamiento operativo del prototipo, vinculando los resultados experimentales con los modelos teóricos y simulaciones previas.

1.8.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Para la recolección de datos experimentales, se utilizaron:

- Termómetro para medir la temperatura ($^{\circ}\text{C}$)
- Manómetros para medir la presión (Psi)
- Tacómetros digitales para medir velocidad de rotación (rpm)
- Cálculos indirectos para estimar la potencia en el eje

Los datos fueron registrados en hojas de cálculo y posteriormente analizados para determinar los parámetros del sistema y admitir el cumplimiento del objetivo principal.



1.8.5. Fases de la Metodología

1.8.5.1. Estudio Teórico

- Revisión bibliográfica sobre turbinas Tesla, fundamentos de mecánica de fluidos, transferencia de energía y termodinámica aplicada al vapor de agua.

1.8.5.2. Diseño Termodinámico

- Desarrollo de modelos matemáticos para cálculo de torque y potencia, basados en la teoría de capa límite y método del vórtice libre.
- Determinación de parámetros de diseño clave: diámetro y número de discos, separación entre discos, condiciones de entrada de vapor (presión, temperatura y flujo másico).
- Modelado y mallado en software ANSYS Fluent para análisis CFD.
- Simulación del flujo de vapor y su interacción con discos, análisis de presiones, velocidades y torque esperado.
- Evaluación de variables operativas para optimizar diseño (velocidad del vapor, temperatura, cantidad de discos).
- Ajuste y validación preliminar del diseño basado en resultados simulados

1.8.5.3. Diseño mecánico

- Análisis estático en los puntos de soporte
- Diseño de la deflexión en el eje de la turbina
- Análisis de esfuerzo cortante y momento flector en el eje
- Dimensiones de la chaveta



1.8.5.4. Protocolo de pruebas

- Definición del protocolo de pruebas: medición de presión, temperatura, velocidad angular y potencia mecánica en el eje.
- Realización de pruebas controladas para registrar el desempeño bajo diferentes condiciones de operación.
- Cálculo y comprobación interna de la potencia mecánica generada, verificando el cumplimiento del objetivo de 0.5 kW.
- Análisis de resultados experimentales en comparación con los datos teóricos y simulados para evaluar concordancia y desempeño.

1.8.5.5. Especificaciones técnicas

- Selección y adquisición de materiales adecuados.
- Fabricación de componentes principales (discos, separadores, eje) mediante técnicas de corte plasma, torneado y soldadura.
- Montaje y ensamblaje del rotor, asegurando el espaciamiento y alineación correcta entre discos.

1.8.5.6. Evaluación económica

- Análisis de metrado de presupuesto.
- Costos fijos de la construcción y el consumo variable del combustible en las pruebas.



CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1. Turbinas de Vapor

- Las turbinas de vapor han sido una pieza central en la generación de energía desde su invención en el siglo XIX. Utilizadas en plantas de energía, industrias y transporte, estas máquinas rotativas convierten la energía térmica del vapor en energía mecánica, que luego se puede utilizar para generar electricidad o realizar trabajo mecánico.

2.1.1. *Definición de Turbina de Vapor*

Una turbina de vapor es una turbomáquina que convierte la energía térmica del vapor en energía mecánica mediante un intercambio de movimiento de la expansión del vapor a alta presión y temperatura a través de una serie de álabes o palas que están montados en un eje rotatorio. Este proceso de expansión y la consecuente transferencia de energía al eje permite que la turbina realice trabajo mecánico, que puede utilizarse para generar electricidad en una planta de energía, accionar maquinaria industrial, o en aplicaciones de propulsión en buques.

Las turbinas de vapor son ampliamente utilizadas en plantas de energía termoeléctrica. El vapor generado se dirige a la turbina de vapor, donde su energía se transforma en energía mecánica que, a su vez, acciona un generador. Una turbina de vapor es un dispositivo mecánico que extrae energía cinética del vapor presurizado y la convierte en trabajo útil como movimiento rotatorio. Consta de ejes, carcasas, álabes fijos y álabes móviles, siendo el proceso teórico isentrópico y de flujo constante. Las turbinas de vapor juegan un papel crucial en la generación de electricidad al convertir el vapor de alta temperatura de las calderas en energía mecánica a través de los álabes del rotor. El diseño de un rotor de turbina de vapor puede incluir aletas integradas para mejorar los coeficientes de fricción para la estabilidad. En general, las turbinas de vapor son componentes esenciales en las centrales eléctricas, que utilizan vapor de alta presión y velocidad para impulsar el rotor y generar electricidad de manera eficiente.



2.1.2. Principios de Funcionamiento de una Turbina de Vapor

El funcionamiento de una turbina de vapor se basa en la conversión de la energía térmica del vapor a energía mecánica. Los principios fundamentales detrás de esta conversión son la expansión del vapor y la transferencia de energía cinética. Los pasos clave que explican estos principios son:

1. Generación de Vapor:

- El proceso comienza con la generación de vapor en una caldera, donde el agua se calienta mediante la combustión de combustibles fósiles, energía nuclear, o fuentes de calor alternativas.
- El agua se convierte en vapor a alta presión y alta temperatura.

2. Entrada de Vapor a la Turbina:

- El vapor de alta presión y alta temperatura se dirige hacia la entrada de la turbina.
- La entrada está diseñada para dirigir el flujo de vapor de manera eficiente hacia los álabes o palas de la turbina.

3. Expansión del Vapor:

- Al entrar en la turbina, el vapor se expande a través de una serie de álabes fijos y móviles.
- Los álabes fijos dirigen el flujo de vapor hacia los álabes móviles, lo que causa una aceleración del vapor y un cambio en su dirección.

4. Transferencia de Energía:

- La energía cinética del vapor en movimiento se transfiere a los álabes móviles, causando que estos giren.
- Los álabes móviles están montados en un eje rotatorio, por lo que el giro de los álabes resulta en la rotación del eje.

5. Conversión de Energía Mecánica:

- La energía cinética del vapor se convierte en energía mecánica rotacional en el eje de la turbina.



- Este eje puede estar acoplado a un generador eléctrico, maquinaria industrial, o cualquier otro dispositivo que requiera trabajo mecánico.

6. Salida de Vapor:

- Después de pasar por los álabes de la turbina, el vapor se ha expandido y enfriado considerablemente.
- El vapor a baja presión y baja temperatura se dirige hacia un condensador, donde se enfría y se convierte de nuevo en agua para ser recirculado al sistema de generación de vapor.

2.1.3. Tipos de Turbinas de Vapor

2.1.3.1. Turbinas de Impulso

La turbina de impulso es un tipo de turbina conocido como turbina autorrectificadora, lo que significa que gira en una única dirección independientemente de la dirección del flujo de aire. Estas turbinas autor rectificadoras han sido desarrolladas para satisfacer la necesidad de aprovechar la energía de los flujos de aire que pueden ser bidireccionales, especialmente en aplicaciones relacionadas con la energía de las olas.

La turbina de impulso tiene toberas fijas en las que la alta entalpía del vapor a alta temperatura y presión se convierte en energía cinética de chorros de alta velocidad antes de que el vapor interactúe con los álabes de la turbina. En estas turbinas, el vapor llega a los álabes con alta velocidad, y los álabes, al recibir el impulso del vapor, generan trabajo mecánico. Asimismo, los chorros fluyen hacia las palas del rotor en forma de cubo cambiando la dirección del flujo. La caída de presión se produce en la tobera con un aumento de la velocidad. A medida que el vapor fluye a través de los cubos giratorios, su presión no cambia. El valor absoluto de la velocidad también permanece invariable, pero su dirección cambia. El vapor que sale de los cubos giratorios tiene una gran cantidad de energía cinética. Esta alta velocidad de salida es la causa de la llamada pérdida de salida.

Principios de Funcionamiento de las Turbinas de Impulso



Expansión del Vapor en Tobera:

- El vapor de alta presión y temperatura se dirige hacia una serie de toberas.
- En las toberas, el vapor se expande y su presión disminuye, mientras que su velocidad aumenta considerablemente, convirtiendo la energía térmica en energía cinética.

Impacto del Vapor en los Álabes:

- El vapor a alta velocidad sale de las toberas y choca contra los álabes de la turbina.
- Los álabes de la turbina están diseñados para cambiar la dirección del flujo del vapor, generando una fuerza que impulsa el movimiento de los álabes y por ende, del eje de la turbina.

Transferencia de Energía:

- La energía cinética del vapor se transfiere a los álabes móviles, haciendo que estos giren.
- El eje de la turbina, al cual están acoplados los álabes, también gira, convirtiendo la energía cinética en energía mecánica rotacional.

Salida del Vapor:

- Después de interactuar con los álabes, el vapor sale de la turbina a una presión y velocidad más bajas.
- El vapor se dirige luego a un condensador o a la siguiente etapa del ciclo si es una turbina de varias etapas.

Ejemplo:

Turbinas de vapor tipo Pelton, donde el fluido (agua) se acelera antes de golpear las palas, y la energía se convierte en trabajo a través de la velocidad del fluido.



2.1.3.2. Turbinas de Reacción

Las turbinas de reacción utilizan álabes móviles y fijos para expandir el vapor y generar energía. En estas turbinas, tanto los álabes móviles como los fijos actúan como toberas, permitiendo la expansión del vapor y la generación de fuerza de reacción (Kearton, 2007). La energía de presión del vapor se convierte parcialmente en energía cinética en cada fila de álabes, y la diferencia de presión entre los álabes móviles y fijos genera la rotación del rotor. Este diseño permite una operación más suave y eficiente a diversas velocidades de flujo.

Estas turbinas son comúnmente usadas en aplicaciones de generación de energía y en motores de aviones.

2.1.3.2.1. Principios de Funcionamiento de las Turbinas de Reacción

En las turbinas de reacción, el fluido (normalmente vapor o gas) entra en la turbina con alta presión y temperatura. A medida que el fluido pasa a través de las palas estacionarias (estatores) y las palas móviles (rotores), su presión y velocidad disminuye, y esta caída de energía se convierte en trabajo mecánico que hace girar el rotor.

2.1.3.2.2. Tipos de Turbinas de Reacción

Las turbinas de reacción se dividen en varias categorías, siendo las más comunes:

1. Turbinas Francis: Desarrolladas por James B. Francis, estas turbinas combinan flujos radiales y axiales y son versátiles, capaces de operar en un amplio rango de saltos y caudales, desde 10 metros hasta varios cientos de metros.
2. Turbinas Kaplan: Son turbinas de flujo axial que se utilizan en saltos de baja altura. Cuentan con álabes ajustables que permiten un funcionamiento eficiente en diferentes caudales.
3. Turbinas Bulbo: También de tipo axial, se aplican en centrales de baja presión y mareomotrices, siendo adecuadas para situaciones donde el caudal y el salto son constantes



2.1.3.2.3. Ventajas

1. Eficiencia: Las turbinas de reacción pueden ser muy eficientes, especialmente en aplicaciones de ciclo combinado.
2. Suavidad de Operación: Debido a la distribución más uniforme de la fuerza a lo largo del rotor, estas turbinas operan de manera más suave y con menos vibraciones.

2.1.3.2.4. Desventajas

1. Costo: Son más complejas y caras de fabricar comparadas con las turbinas de impulso.
2. Mantenimiento: Pueden requerir un mantenimiento más frecuente y especializado.

2.1.3.2.5. Aplicaciones

- Generación de Energía: Son ampliamente usadas en plantas de energía eléctrica, tanto en turbinas de vapor como de gas.
- Aviación: En motores de reacción para aviones, especialmente en la parte de la turbina de gas.

Las turbinas de reacción son una tecnología clave en la conversión de energía térmica a energía mecánica y eléctrica, y continúan evolucionando con mejoras en materiales y diseños para incrementar su eficiencia y fiabilidad.



2.2. Microturbinas

Las microturbinas son unidades de generación de energía a pequeña escala que desempeñan un papel crucial en los sistemas de energía descentralizados debido a su adaptabilidad, alta disponibilidad operativa, tamaño compacto y capacidad de responder rápidamente a las fluctuaciones en la demanda de energía, ofrecen una solución confiable y rentable para respaldar la red, especialmente en conjunto con fuentes de energía renovables o en operaciones fuera de la red. Están diseñadas para producir de manera eficiente energía térmica y eléctrica a partir de recursos disponibles localmente, lo que contribuye significativamente al desarrollo de sistemas de cogeneración de micro energía. Las unidades de microturbinas se utilizan para el suministro autónomo de edificios e instalaciones de ingeniería con calor y energía eléctrica, y la investigación en curso se centra en mejorar su eficiencia operativa y reducir las emisiones nocivas a través de diseños innovadores de cámaras de combustión.

2.2.1. *Características Principales de las Microturbinas*

1. **Tamaño Reducido:** Las microturbinas son compactas y pueden ser instaladas en espacios reducidos.
2. **Alta Eficiencia:** Pueden alcanzar eficiencias eléctricas del 25% al 30%, y cuando se usan en aplicaciones de cogeneración, las eficiencias totales pueden superar el 80%.
3. **Baja Emisión de Contaminantes:** Emiten menos contaminantes en comparación con otros generadores de energía fósil, gracias a tecnologías avanzadas de combustión.
4. **Mantenimiento Reducido:** Tienen menos partes móviles y requieren menos mantenimiento en comparación con otros generadores de energía.

2.2.2. *Principio de Funcionamiento de las Microturbinas*

Las microturbinas funcionan de manera similar a las grandes turbinas de gas, pero a una escala menor. El proceso típico incluye:

1. **Compresión de Aire:** El aire ambiente es aspirado y comprimido.



2. Combustión: El aire comprimido se mezcla con el combustible y se quema en la cámara de combustión.
3. Expansión en la turbina: Los gases calientes resultantes de la combustión se expanden a través de la turbina, haciendo girar el rotor.
4. Generación de Electricidad: La energía mecánica del rotor se convierte en electricidad a través de un generador acoplado.

2.2.3. Aplicaciones

1. Generación Distribuida: Para proporcionar electricidad y calor a instalaciones comerciales, industriales y residenciales.
2. Respaldo Energético: Como fuente de energía de respaldo en casos de cortes de energía.
3. Recuperación de Energía de Residuos: En aplicaciones industriales donde se puede aprovechar el calor residual para generar electricidad.

Las microturbinas son una opción prometedora para la generación de energía limpia y eficiente en una amplia variedad de aplicaciones, y su uso está creciendo a medida que las tecnologías de energía distribuida y sostenible ganan importancia.

2.3. Turbina tipo Tesla

2.3.1. Historia y Desarrollo

Nikola Tesla, el padre de la corriente alterna. Tesla fue un inventor prodigioso que aplicó su genio a una amplia gama de problemas prácticos. En total, poseía 272 patentes en 25 países, 112 de ellas en los Estados Unidos. En 1913, Tesla recibió una patente para lo que describió como su invento más importante. Ese invento fue una turbina, conocida hoy como la turbina Tesla, la turbina de capa límite o la turbina de disco plano.



La turbina de Tesla no tiene aspas, sino una serie de discos paralelos muy juntos unidos a un eje y dispuestos dentro de una cámara sellada. Cuando se permite que un fluido entre en la cámara y pase entre los discos, estos giran, lo que a su vez hace girar el eje. Este movimiento rotatorio se puede utilizar de diversas formas, desde accionar bombas, sopladores y compresores hasta hacer funcionar automóviles y aviones. De hecho, Tesla afirmó que la turbina era el motor rotatorio más eficiente y de diseño más simple jamás diseñado.

El nuevo motor de Tesla era una turbina sin aspas, que seguiría utilizando un fluido como vehículo de energía, pero sería mucho más eficiente a la hora de convertir la energía del fluido en movimiento. Contrariamente a la creencia popular, Tesla no inventó la turbina sin aspas, sino que tomó el concepto básico, patentado por primera vez en Europa en 1832, y le hizo varias mejoras. Refinó la idea a lo largo de casi una década y, de hecho, recibió tres patentes relacionadas con la máquina:

- Patente número 1.061.142, "Propulsión por fluidos", presentada el 21 de octubre de 1909 y patentada el 6 de mayo de 1913
- Patente número 1.061.206, "Turbina", presentada el 17 de enero de 1911 y patentada el 6 de mayo de 1913
- Patente número 1.329.559, "Conducto valvular", presentada el 21 de febrero de 1916, renovada el 18 de julio de 1919 y patentada el 3 de febrero de 1920

En la primera patente, Tesla presentó su diseño básico sin aspas configurado como una bomba o compresor. En la segunda patente, Tesla modificó el diseño básico para que funcionara como una turbina. Y finalmente, con la tercera patente, realizó los cambios necesarios para que la turbina funcionara como un motor de combustión interna.



Tesla, al igual que muchos científicos e industriales contemporáneos, creía que su nueva turbina sería revolucionaria por una serie de características: era pequeña y fácil de fabricar, sólo tenía una pieza móvil y era reversible. Para demostrar estos beneficios, Tesla mandó construir varias máquinas. Juilus C. Czito, hijo del maquinista de Tesla durante muchos años, construyó varias versiones. La primera, construida en 1906, tenía ocho discos, cada uno de seis pulgadas (15,2 centímetros) de diámetro. La máquina pesaba menos de 10 libras (4,5 kilogramos) y desarrollaba 30 caballos de fuerza. También reveló una deficiencia que dificultaría el desarrollo posterior de la máquina. El rotor alcanzaba velocidades tan altas (35.000 revoluciones por minuto (rpm)) que los discos de metal se estiraban considerablemente, lo que perjudicaba la eficiencia.

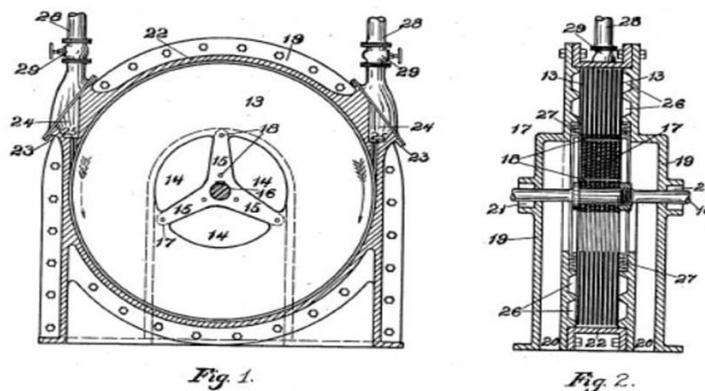
En 1910, Czito y Tesla construyeron un modelo más grande con discos de 12 pulgadas (30,5 centímetros) de diámetro. Giraba a 10.000 rpm y desarrollaba 100 caballos de fuerza. Luego, en 1911, la pareja construyó un modelo con discos de 9,75 pulgadas (24,8 centímetros) de diámetro. Esto redujo la velocidad a 9.000 rpm pero aumentó la potencia de salida a 110 caballos de fuerza.

Alentado por estos éxitos a pequeña escala, Tesla construyó una unidad doble más grande, que planeaba probar con vapor en la central eléctrica principal de la New York Edison Company. Cada turbina tenía un rotor con discos de apoyo de 18 pulgadas (45,7 centímetros) de diámetro. Las dos turbinas estaban colocadas en línea sobre una única base. Durante la prueba, Tesla fue capaz de alcanzar el 9.000 rpm y generar 200 caballos de fuerza. Sin embargo, algunos ingenieros presentes en la prueba, leales a Edison, afirmaron que la turbina era un fracaso basándose en un malentendido sobre cómo medir el par en la nueva máquina.

En su último intento por comercializar su invento, Tesla convenció a la empresa manufacturera Allis-Chalmers de Milwaukee para que construyera tres turbinas. Dos de ellas tenían 20 discos de 18 pulgadas de diámetro y desarrollaban velocidades de 12.000 y 10.000 rpm respectivamente. La tercera tenía 15 discos de 60 pulgadas (1,5 metros) de diámetro y estaba diseñada para funcionar a 3.600 rpm, generando 675 caballos de fuerza. Durante las pruebas, los ingenieros de Allis-Chalmers empezaron a preocuparse tanto por la eficiencia mecánica de las turbinas como por su capacidad para soportar un uso prolongado. Descubrieron que los discos se habían deformado en gran medida y concluyeron que la turbina habría acabado fallando.

Incluso en los años 70, los investigadores tuvieron dificultades para reproducir los resultados informados por Tesla. Warren Rice, profesor de ingeniería en la Universidad Estatal de Arizona, creó una versión de la turbina Tesla que funcionaba con una eficiencia del 41 por ciento. Algunos argumentaron que el modelo de Rice se desviaba de las especificaciones exactas de Tesla. Pero Rice, un experto en dinámica de fluidos y en la turbina Tesla, realizó una revisión bibliográfica de investigaciones realizadas en los años 90 y descubrió que ninguna versión moderna de la invención de Tesla superaba el 30 o 40 por ciento de eficiencia. Esto, más que nada, impidió que la turbina Tesla se utilizara más ampliamente.

Figura 1. Turbina Tesla original



Nota. Adaptado de construcción de la turbina tesla, por Gingery V. 2014



- | | |
|------------------------------|-------------------------------|
| 13. Juego de platos de disco | 22. Brecha del anillo central |
| 14. Orificios de escape | 23. Extensiones con bridas |
| 15. Radios de apoyo | 24. Entrada |
| 16. Eje | 25. Boquillas |
| 17. Tapa | 26. Ranuras circulares |
| 18. Espaciadores | 27. Laberinto de sellos |
| 19. Fundiciones | 28. Tubos de suministro |
| 20. Rodamientos | 29. Válvulas |

2.3.2. Descripción de la Turbina de Vapor Tesla

La turbina Tesla, patentada en 1913 por Nikola Tesla, es una turbomáquina rotativa que se distingue por emplear discos lisos en lugar de álabes para transformar la energía de un fluido en energía mecánica. Su principio de funcionamiento se basa en el efecto de capa límite, aprovechando la fricción viscosa entre el fluido y las superficies de los discos. El fluido ingresa tangencialmente al conjunto de discos y sigue una trayectoria helicoidal hacia el centro, lo que induce el movimiento rotacional del eje. Este diseño elimina componentes complejos como palas o toberas, reduciendo el desgaste mecánico y simplificando su construcción. En comparación con las turbinas de vapor tradicionales, la turbina Tesla ofrece ventajas significativas en términos de robustez, bajo mantenimiento, operación silenciosa y capacidad de trabajar con diversos tipos de fluidos. Su concepción innovadora la convierte en una alternativa eficiente para aplicaciones de generación de energía a pequeña escala, especialmente en contextos donde se requiere una solución compacta, versátil y de bajo costo.

2.3.3. Características de la Turbina de Vapor Tesla

Las turbinas de vapor Tesla poseen varias características únicas que las distinguen de otros tipos de turbinas:



- **Diseño Sin Álabes:** La ausencia de álabes reduce significativamente el desgaste mecánico y los problemas de cavitación, aumentando la vida útil de la turbina (Miller, 2007).
- **Simplicidad y Robustez:** La construcción simple y robusta reduce los costos de fabricación y mantenimiento, y permite una mayor fiabilidad en diversas condiciones operativas (Lundin, 2011).
- **Versatilidad de Fluidos:** Las turbinas Tesla pueden operar eficientemente con una variedad de fluidos, incluidos gases y líquidos, lo que las hace adecuadas para múltiples aplicaciones industriales (Durbin, 2008).
- **Operación Silenciosa y Suave:** La ausencia de componentes móviles complejos y el flujo suave del vapor resultan en una operación más silenciosa y con menos vibraciones (Rice, 1991).
- **Eficiencia en Diversas Condiciones:** Las turbinas Tesla mantienen una alta eficiencia en una amplia gama de velocidades y presiones de flujo, lo que las hace altamente adaptables (Kim, 2013).

Estas características únicas hacen que las turbinas de vapor Tesla sean una opción atractiva para aplicaciones donde la simplicidad, la durabilidad y la eficiencia son cruciales.

2.3.4. Componentes de la Turbina de Vapor Tesla

2.3.4.1. Componentes principales

Una turbina Tesla se compone de varios componentes clave, como demuestra la Figura 2.1, que trabajan en conjunto para convertir la energía térmica del vapor en energía mecánica (Martínez Sánchez, 2015):

1. **Rotor:** El rotor de una turbina Tesla es típicamente un disco liso o una serie de discos apilados con espaciadores entre ellos. Estos discos giran cuando el vapor pasa a través de ellos, creando un movimiento rotatorio.
2. **Carcasa (estator):** La carcasa es la estructura externa que encapsula los discos y dirige el vapor hacia los espacios entre los discos. La carcasa también puede contener las boquillas que inyectan el vapor de manera precisa para maximizar la eficiencia de la turbina.



3. Sellos: Los sellos son esenciales para mantener la integridad del sistema, evitando fugas de vapor y asegurando que toda la energía del vapor se utilice para generar movimiento.
4. Eje: Es el componente que conecta los discos y transmite el trabajo mecánico generado a un generador o cualquier otro dispositivo de aprovechamiento de energía. El eje gira cuando los discos son impulsados por el flujo del vapor.
5. Boquillas de Entrada: Las boquillas son las encargadas de dirigir el vapor a alta velocidad hacia los discos de la turbina. Estas boquillas convierten la energía térmica del vapor en energía cinética, enfocando el flujo de vapor en los bordes de los discos.
6. Orificios de Escape: Una vez que el vapor ha pasado a través de los discos y ha transferido la mayor parte de su energía cinética al eje, el vapor se expulsa por los orificios de escape situados cerca del centro de los discos.
7. Separadores: Los separadores son pequeñas piezas que mantienen los discos separados a una distancia precisa. Esto es crucial para asegurar que el flujo del vapor mantenga la fricción adecuada con los discos y no cause turbulencias innecesarias.

2.3.4.2. Diseños y materiales

El diseño y la selección de materiales para los componentes de una turbina Tesla son cruciales para su rendimiento y durabilidad:

1. Selección de Materiales: Los materiales deben ser resistentes a altas temperaturas y a la corrosión. Los aceros inoxidables y aleaciones especiales como el Inconel son comunes por su resistencia y durabilidad (Navarro García, 2017).
2. Diseño Innovador: El diseño de los discos y la configuración general de la turbina pueden optimizarse para maximizar la eficiencia de conversión de energía térmica a mecánica. La aerodinámica de los discos, por ejemplo, es crucial para minimizar las pérdidas de energía debido a la fricción y la resistencia del aire.



2.3.5. Ventajas de la Turbina Tesla sobre Turbinas Tradicionales

1. **Eficiencia:** La turbina Tesla puede lograr una alta eficiencia debido a la reducción de pérdidas mecánicas y menor resistencia aerodinámica, lo que la hace más efectiva en la conversión de energía (Wang L. , 2014).
2. **Bajo Mantenimiento:** La ausencia de álabes y el diseño simple implican menos desgaste mecánico y, por lo tanto, menores costos de mantenimiento. (Anderson D. L., 2010).
3. **Resistencia a la Cavitación:** A diferencia de las turbinas tradicionales, la Turbina Tesla muestra una mayor resistencia a la cavitación, un fenómeno que puede causar daños significativos en las turbinas tradicionales (Ackeret, 1952).
4. **Operación Silenciosa:** El diseño sin álabes y la operación basada en la fricción viscosa resultan en una operación más silenciosa en comparación con las turbinas tradicionales (Wik, 1999).
5. **Facilidad de Fabricación:** La construcción de discos lisos es más sencilla y económica en comparación con la fabricación de álabes complejos, lo que reduce los costos de producción (Lundin, 2011).

2.3.6. Aplicaciones de la Turbina Tesla

Aun cuando la turbina Tesla no ha sido ampliamente adoptada en la industria moderna, sigue siendo un objeto de interés para investigadores y entusiastas debido a su diseño único y su potencial teórico.

Algunas aplicaciones experimentales incluyen:

1. **Generación de energía:** La turbina de Tesla puede utilizarse en sistemas de generación eléctrica, aprovechando vapor o gases de combustión. Su capacidad para funcionar con fluidos a altas temperaturas la hace adecuada para instalaciones que requieren un manejo eficiente del calor residual.
2. **Sistemas de calefacción:** Puede integrarse en sistemas de calefacción donde el vapor se utiliza para transferir calor, aprovechando su diseño para maximizar la eficiencia térmica.



3. Pequeñas centrales hidroeléctricas: Debido a su diseño compacto y su capacidad para operar con caudales relativamente bajos, la turbina Tesla es adecuada para aplicaciones en pequeñas plantas hidroeléctricas, donde el espacio y el costo son consideraciones importantes.
4. Bombas y compresores: La turbina puede adaptarse para funcionar como bomba o compresor, siendo útil en aplicaciones industriales donde se manejan fluidos con sólidos o mezclas.
5. Aplicaciones en la industria: Su diseño simple y la posibilidad de usar diversos fluidos sin dañar los discos la hacen útil en procesos industriales que requieren la conversión de energía de fluidos en trabajo mecánico.
6. Tecnologías de energía renovable: La turbina Tesla ha sido considerada para aplicaciones en tecnologías renovables, como en sistemas que utilizan energía geotérmica o biomasa.
7. Turbinas de Vapor: En sistemas de energía de ciclo Rankine, la Turbina Tesla puede reemplazar las turbinas de vapor tradicionales, mejorando la eficiencia del ciclo (Spence, Estudio sobre la eficiencia de las turbinas Tesla: Comparativa con turbinas convencionales, 2011).

La turbina de vapor Tesla es un fascinante ejemplo de innovación en la ingeniería, aunque no ha logrado desplazar a las turbinas de palas más tradicionales, sigue siendo una parte importante de la historia de la tecnología y un área activa de investigación y experimentación.

2.3.7. Estudios recientes sobre la turbina tesla

En los últimos años, se han realizado numerosos estudios para evaluar y mejorar la eficiencia y aplicaciones de las turbinas Tesla. Un estudio de Wang (2014) comparó la eficiencia de las turbinas Tesla con las turbinas tradicionales, encontrando que las primeras pueden alcanzar una eficiencia comparable o incluso superior en ciertas condiciones operativas. Asimismo, investigaciones de Kim (2013) han demostrado que las turbinas Tesla son particularmente efectivas en aplicaciones de bombeo y compresión, debido a su resistencia a la cavitación y su operación silenciosa.



Un estudio realizado por (García & López, 2021) demostró un creciente interés en las turbinas Tesla debido a sus ventajas únicas y su versatilidad en diferentes aplicaciones. El estudio encontró que ajustar el espaciado de los discos y utilizar materiales con mayor resistencia al calor y menor fricción puede mejorar significativamente el rendimiento de las turbinas Tesla en aplicaciones de generación de energía.

Otro estudio importante realizado por Anderson (2010) evaluó la durabilidad y los costos de mantenimiento de las turbinas Tesla, concluyendo que su diseño simple y la ausencia de álabes resultan en una menor necesidad de mantenimiento y una mayor vida útil en comparación con las turbinas tradicionales. Además, Rice (1991) realizó un análisis detallado del rendimiento de las turbinas Tesla en diferentes condiciones de flujo, destacando su capacidad para manejar una variedad de fluidos y su eficiencia en aplicaciones industriales.

2.3.8. Innovaciones y Mejoras en el Diseño de Turbinas de Vapor

Las turbinas Tesla han sido objeto de diversas innovaciones y mejoras en su diseño, especialmente en el contexto de las turbinas de vapor. Spence (2011) estudió la implementación de turbinas Tesla en ciclos Rankine, encontrando que su uso puede mejorar significativamente la eficiencia del ciclo debido a su capacidad para operar eficientemente a bajas y altas velocidades de flujo. Además, Lundin (2011) destacó mejoras en los materiales utilizados para los discos de las turbinas Tesla, lo que ha permitido aumentar su durabilidad y resistencia a altas temperaturas.

Una innovación clave en el diseño de las turbinas Tesla es la optimización del espacio entre los discos. Miller(2007) investigó cómo la variación en la distancia entre discos afecta la eficiencia de la turbina, concluyendo que una distancia óptima puede maximizar la transferencia de energía del fluido a los discos, mejorando así la eficiencia general de la turbina. Asimismo, las mejoras en la técnica de fabricación, como el uso de técnicas avanzadas de corte y acabado de superficies, han permitido reducir las pérdidas mecánicas y aumentar la precisión del ensamblaje de los discos Lundin (2011).



2.3.9. Uso de Diferentes Fluidos en Turbinas de vapor tipo Tesla

La versatilidad de las turbinas Tesla para operar con diferentes fluidos es una de sus características más destacadas. Valenti (2005) exploró el uso de diferentes tipos de vapor y gases en las turbinas Tesla, encontrando que pueden mantener una alta eficiencia incluso cuando se utilizan con fluidos no tradicionales. Esta capacidad permite que las turbinas Tesla sean aplicables en una variedad de industrias, desde la generación de energía hasta la propulsión de vehículos y sistemas de refrigeración.

Un estudio realizado por Durbin (2008) evaluó el rendimiento de las turbinas Tesla utilizando mezclas de fluidos refrigerantes, concluyendo que su diseño sin álabes permite una operación eficiente y una mejor gestión del calor en comparación con las turbinas tradicionales. Además, investigaciones de Reynolds (2002) han mostrado que las turbinas Tesla pueden ser optimizadas para operar con fluidos viscosos, lo que amplía su aplicación en procesos industriales donde se utilizan aceites y otros líquidos de alta viscosidad.

La capacidad de las turbinas Tesla para manejar diferentes tipos de fluidos también ha sido confirmada por investigaciones sobre su aplicación en sistemas de energía renovable. Ackeret (1952) demostró que las turbinas Tesla pueden operar eficientemente con vapor generado a partir de fuentes de energía solar y geotérmica, lo que las convierte en una opción viable para aplicaciones de energía sostenible.

2.3.10. Construcción de la Turbina de Vapor Tesla

La construcción de la turbina de vapor Tesla es notablemente diferente de las turbinas de vapor tradicionales. En lugar de utilizar álabes para capturar la energía del vapor, la turbina Tesla emplea una serie de discos lisos y paralelos montados en un eje común. Estos discos están separados por pequeños espacios y están contenidos dentro de una carcasa (Rice, 1991). El vapor entra tangencialmente a la carcasa y fluye entre los discos, transfiriendo su energía a través de la fricción viscosa y el arrastre.

Los componentes principales de una turbina Tesla incluyen:



- Discos: Hechos de materiales resistentes a altas temperaturas y presiones, los discos son lisos y están espaciados uniformemente.
- Carcasa: Contiene los discos y dirige el flujo de vapor hacia ellos.
- Entrada de Vapor: Permite la entrada tangencial del vapor a alta presión.
- Salida de Vapor: Ubicada en el centro de la carcasa, permite la salida del vapor después de haber transferido su energía a los discos (Valenti, 2005).

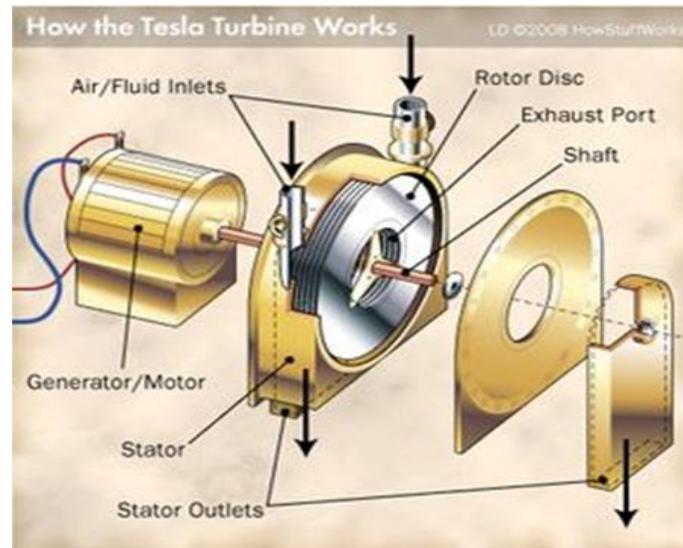
Esta simplicidad en la construcción reduce los costos de fabricación y mantenimiento, al tiempo que aumenta la durabilidad y confiabilidad de la turbina (Kim H, 2013)

2.3.11. Principio de Operación de la Turbina de Vapor Tesla

El principio de operación de la turbina de vapor Tesla se basa en el uso de la fricción viscosa y el arrastre para transferir la energía del vapor a los discos. A diferencia de las turbinas tradicionales que utilizan álabes para redirigir el flujo de vapor, la turbina Tesla permite que el vapor fluya entre los discos, donde la fricción entre el vapor y las superficies de los discos transfiere la energía cinética al rotor (Anderson D, 2010).

El vapor entra tangencialmente en la carcasa y fluye en espiral hacia el centro, perdiendo gradualmente su energía cinética y transfiriéndola a los discos. Este proceso es altamente eficiente debido a la minimización de las pérdidas de energía por turbulencia y separación de flujo, características comunes en las turbinas de álabes (Spence, 2011).

El flujo continuo y suave del vapor a través de la turbina Tesla también permite una operación más silenciosa y con menos vibraciones en comparación con las turbinas tradicionales (Wang L, 2014). La capacidad de manejar una amplia gama de velocidades de flujo y presiones sin perder eficiencia es otra ventaja significativa.

Figura 2. Nomenclatura de la Turbina Tesla

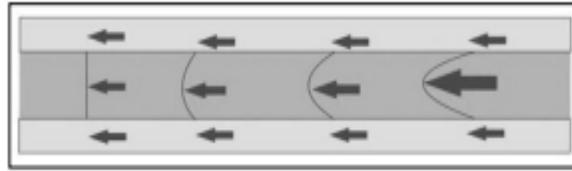
Nota. New York Herald Tribune. (1911, 15 de octubre)

2.3.12. Principio de funcionamiento

El funcionamiento de una turbina de álabes tradicional se desarrolla a través de la energía cinética del fluido en movimiento cuando hace contacto con las aspas del ventilador de la turbina. Sin embargo, la turbina Tesla elimina las palas y en su lugar utiliza una serie de discos.

El rotor de una turbina Tesla no solo gira, sino que gira rápidamente. La razón de esto se puede encontrar en dos propiedades fundamentales de todos los fluidos: la adhesión y la viscosidad. La adhesión es la tendencia de moléculas diferentes a unirse entre sí debido a fuerzas de atracción. La viscosidad es la resistencia de una sustancia a fluir. Estas dos propiedades trabajan juntas en la turbina Tesla para transferir energía del fluido al rotor o viceversa.

A continuación, se explica cómo:

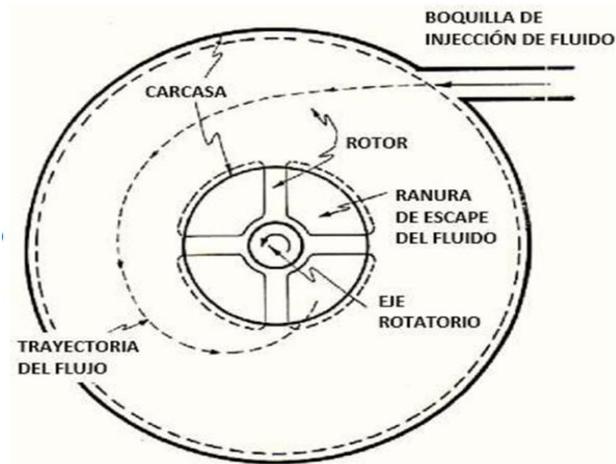
**Figura 3. Fluido viscoso entre dos placas**

1. A medida que el fluido pasa por cada disco, las fuerzas adhesivas hacen que las moléculas de fluido que se encuentran justo encima de la superficie del metal disminuyan su velocidad y se adhieran.
2. Las moléculas que están justo encima de las de la superficie disminuyen su velocidad cuando chocan con las moléculas adheridas a la superficie.
3. Estas moléculas a su vez ralentizan el flujo que se encuentra justo por encima de ellas.
4. Cuanto más nos alejamos de la superficie, menos colisiones se producen en la superficie del objeto.
5. Al mismo tiempo, las fuerzas viscosas hacen que las moléculas del fluido resistan la separación.
6. Esto genera una fuerza de tracción que se transmite al disco, haciendo que éste se mueva en la dirección del fluido.

La fina capa de fluido que interactúa de esta manera con la superficie del disco se denomina capa límite, y la interacción del fluido con la superficie sólida se denomina efecto de capa límite. Como resultado de este efecto, el fluido propulsor sigue una trayectoria espiral rápidamente acelerada a lo largo de las caras del disco hasta que llega a una salida adecuada. Debido a que el fluido se mueve en trayectorias naturales de menor resistencia, libre de las restricciones y fuerzas disruptivas causadas por álabes o paletas, experimenta cambios graduales en la velocidad y la dirección. Esto significa que se entrega más energía a la turbina. De hecho, Tesla afirmó que la eficiencia de la turbina era del 95 por ciento, mucho más alta que otras turbinas de la época.

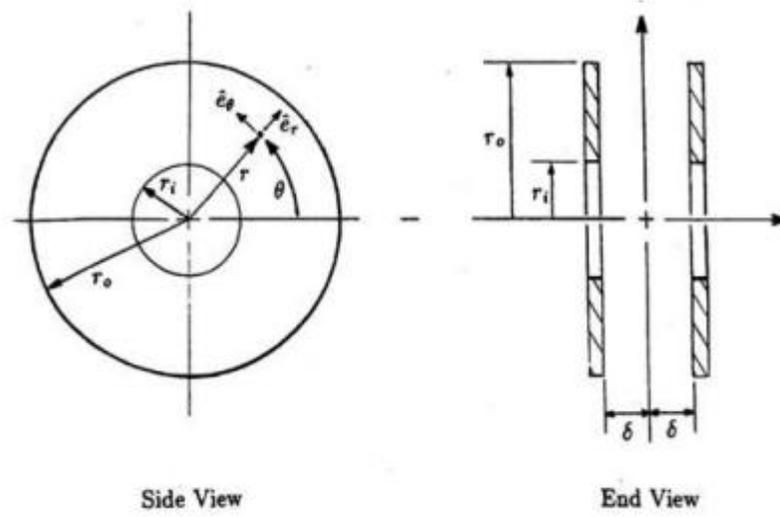
La turbina Tesla es una máquina rotativa que puede funcionar con dos tipos de fluidos: los compresibles y los incompresibles. Los fluidos compresibles pueden cambiar de volumen cuando se les aplica una fuerza, mientras que los incompresibles mantienen su volumen constante sin importar la fuerza que se les aplique.

Figura 4. Trayectoria de flujo en una turbina Tesla



Nota. González Berrones, J. (2020). Estudio sobre turbinas de fluido (p. 11).

Sistema de coordenadas de rotor de la turbina, Para entender mejor la turbina Tesla, uno debería detallar los aspectos de su funcionamiento. El sistema de coordenadas cilíndricas (r, θ, z) se define en la Figura 2.3.4, donde los vectores de velocidad son v_r , v_θ , v_z para las direcciones radial, tangencial y axial, respectivamente. De la misma forma, los parámetros para el rotor se definen como el radio externo r_o , radio interior r_i , espacio entre discos 2δ y el número de discos N [14].

Figura 5. Sistema de coordenadas

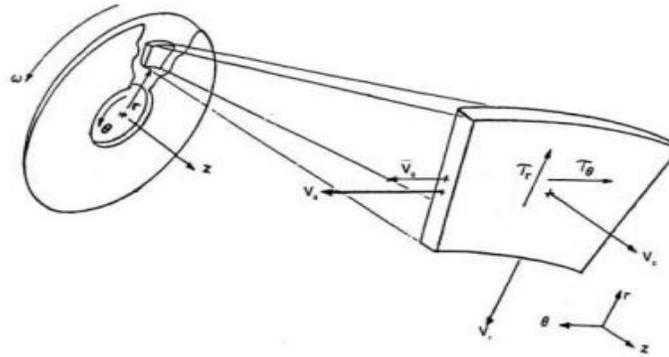
Nota:

González

Berrones, J.

(2020). *Parámetros para el rotor en turbinas*. Nombre de la revista, volumen(número), p. 12.

Además, se considera un fluido entre los discos, para ilustrar el esfuerzo cortante como se muestra en la Figura 2.3.5. El esfuerzo cortante es τ_r y τ_θ para las direcciones radiales y tangenciales, respectivamente. Los esfuerzos cortantes resultan de la diferencia de velocidades entre el fluido y los discos a través de la capa límite, lo que resulta en transferencia de energía.

Figura 6. Elementos de fluido orientación de fuerzas y velocidades

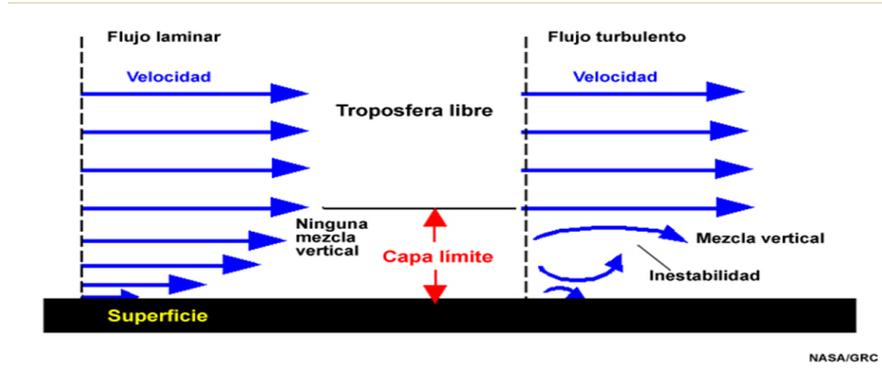
Nota. González Berrones, J. (2020). El esfuerzo cortante en sistemas de fluidos. Revista de Ingeniería Mecánica, 22(1), 12.

2.3.13. Capa Límite

La capa límite es una región de transición que se desarrolla cuando un fluido en movimiento interactúa con una superficie sólida, como los discos de una microturbina Tesla. Esta capa se caracteriza por la presencia de un gradiente de velocidad desde cero en la superficie sólida hasta alcanzar la velocidad del flujo principal fuera de la capa límite. Es crucial en el diseño de turbinas, ya que afecta tanto la fricción superficial como las pérdidas energéticas del sistema. En el caso de las turbinas Tesla, el espesor de la capa límite es particularmente relevante, ya que el fluido se mueve entre discos paralelos, y una mayor fricción en esta zona puede disminuir la eficiencia de la conversión de energía (Schlichting & Gersten, 2016).

Las capas límite pueden ser laminares o turbulentas dependiendo del valor del número de Reynolds. Para los números de Reynolds más bajos, la capa límite es laminar y la velocidad de la corriente cambia uniformemente a medida que uno se aleja de la pared, como se muestra en el lado izquierdo de la Figura 7. Para números más altos de Reynolds, la capa límite es laminar y la velocidad de la corriente se caracteriza por flujos de remolinos inestables (que cambian con el tiempo) dentro de la capa límite, lo que incrementa las pérdidas por fricción y afecta negativamente el rendimiento de la microturbina (Munson B & Okiishi T, 2013).

Figura 7. Representación conceptual de flujos laminares y turbulentos en la capa límite



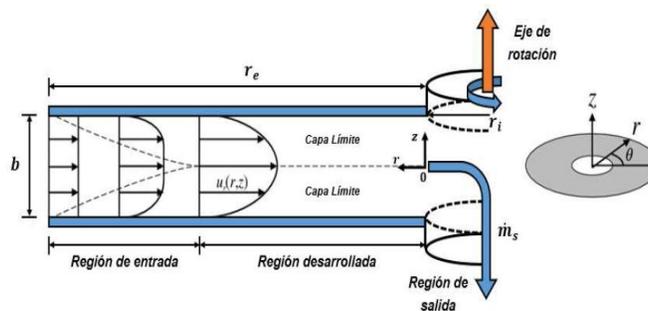
Nota. The

Comet

Program. (s.f.). Efecto de la capa límite.

El principio de funcionamiento básico de la turbina Tesla se debe al efecto de la capa límite entre el fluido y las paredes de los discos del rotor. Cuando el fluido ingresa entre los espacios de los discos, las fuerzas adhesivas tienden a que el fluido disminuya su velocidad a medida que las moléculas tienden a adherirse a las paredes de los discos en ese momento. La viscosidad del fluido también ayuda a disminuir aún más su velocidad. Pero la velocidad en la cual es direccionada el fluido obliga a los discos a moverse en la misma dirección describiendo así el principio básico de funcionamiento de la turbina Tesla.

Figura 8. Velocidad entre dos discos de una turbina Tesla.



Nota. Capa límite entre los discos, las fuerzas viscosas y por fricción se activan provocando que el fluido se adhiera a la superficie de los discos por J. González Berrones, mayo 2020, p. 18.



Según Warren Rice, la mayor eficiencia en la turbina ocurre cuando la distancia entre los discos es igual a dos veces el grosor de la capa límite. Por lo tanto, las condiciones del flujo y las propiedades físicas del fluido de trabajo deben tomarse en cuenta para tener un espaciado entre discos óptimo.

Para determinar el espaciado óptimo entre discos, Pohlhausen demostró que el desarrollo de la capa límite juega un papel importante. El espaciado entre discos óptimo para mantener la capa límite se determina a partir de la siguiente ecuación:

$$b = \pi * \sqrt{\frac{\nu}{\omega}}$$

Donde:

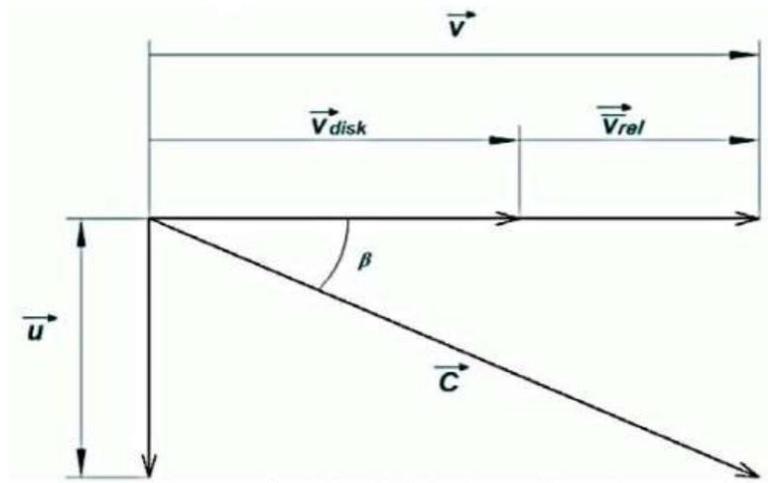
b = espaciado entre discos (m)

ω = *velocidad angular (rad/s)*

ν = viscosidad cinemática (m^2/s)

2.3.14. Velocidad del Fluido

El fluido ingresa en la turbina por las boquillas o válvulas y es inyectado dentro de los espacios entre discos en una dirección aproximadamente tangencial a la periferia del rotor, en un ángulo de incidencia β de la boquilla. A continuación, se muestra el triángulo de velocidades para el flujo que incide sobre un disco de la turbina Tesla a un ángulo determinado de la boquilla Figura 9. La velocidad es la que tiene el flujo a la salida de la tobera, cuando el flujo entra en contacto con los discos, esta velocidad se puede descomponer a partir de un sistema de coordenadas rectangulares en una velocidad radial, y una velocidad tangencial a la periferia del disco, cuyos valores dependen del ángulo de incidencia. Debido a que la velocidad tangencial del fluido es mayor a la velocidad lineal del disco, se tiene una velocidad relativa, la cual favorece a la transferencia de energía entre el fluido de trabajo y los discos causada por las fuerzas viscosas.

Figura 9. Triángulo de velocidades de una turbina Tesla

Nota. Velocidad de salida de la tobera y descomposición en componentes radial y tangencial por J.

González Berrones, mayo 2020, p. 14.

2.3.15. Viscosidad dinámica

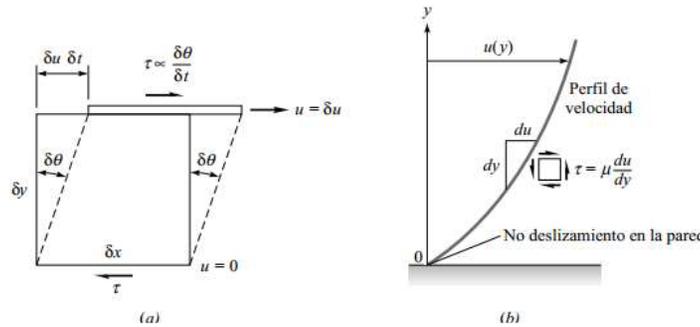
Esta propiedad se refiere a la resistencia que ejercen un fluido al ser deformado cuando a este se aplica un mínimo de esfuerzo cortante, y es particularmente relevante en el caso del vapor de agua, que es el fluido utilizado en la microturbina (Cengel & Boles, 2015).

La viscosidad dinámica está directamente relacionada con la temperatura y presión del vapor. En una microturbina Tesla, el control de la temperatura y presión del vapor es esencial para optimizar el rendimiento. A temperaturas más altas, la viscosidad del vapor de agua disminuye, permitiendo que el fluido fluya con menos resistencia sobre la superficie de los discos (Cengel & Boles, 2015).

Los fluidos se pueden clasificar en newtonianos y no newtonianos. Se considera un fluido newtoniano si su viscosidad varía solamente en respuesta a los cambios de temperatura o presión, en estos fluidos existe una relación lineal entre la magnitud del esfuerzo cortante aplicado y la rapidez de deformación resultante. En un fluido no newtoniano su viscosidad no es definida por lo tanto no existe una relación lineal entre el esfuerzo cortante aplicado y su deformación resultante.

Se considera una partícula fluida sometida a un esfuerzo cortante de valor τ en un plano, como indica la Figura 2.1.2, el ángulo $\delta\theta$ de la deformación aumentará continuamente con el tiempo mientras siga actuando el esfuerzo τ , moviéndose la superficie superior con una velocidad δu mayor que la de la inferior. Los fluidos comunes como el agua, el aceite y el aire presentan una relación lineal entre el esfuerzo aplicado y la velocidad de deformación resultante.

Figura 10. El esfuerzo cortante



Nota. (a) Esquema de esfuerzo cortante y deformación en el fluido. (b) Perfil de velocidad sin deslizamiento en la pared por J. González Berrones, mayo 2020, p. 14.

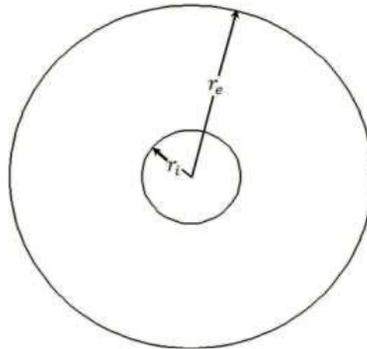
2.3.16. Esfuerzo y deformación del disco

En el diseño de una microturbina de vapor tipo Tesla, uno de los aspectos críticos a considerar es el esfuerzo y la deformación que experimentan los discos durante su operación. Dado que los discos están sometidos a altas velocidades de rotación y al impacto del fluido, el análisis del esfuerzo es crucial para garantizar que el material del disco pueda soportar las fuerzas centrífugas sin deformarse de manera significativa. El esfuerzo radial y el esfuerzo tangencial son los principales tipos de esfuerzo que se desarrollan en los discos rotativos; estos esfuerzos varían a lo largo del radio del disco y pueden ser mayores en la periferia debido al incremento de la velocidad lineal (Shigley, Mischke, & Budynas, 2015). Los esfuerzos tangencial y radial así determinados están sujetos a las siguientes restricciones.

- El radio exterior del anillo, o disco, es grande en comparación con su espesor $re \geq 10e$.
- El espesor del disco o anillo es constante.
- Los esfuerzos son constantes sobre el espesor.

Se basará el estudio en la siguiente configuración de la Figura 3.1 debido a que es la más eficiente para la transferencia energética entre el fluido y el disco.

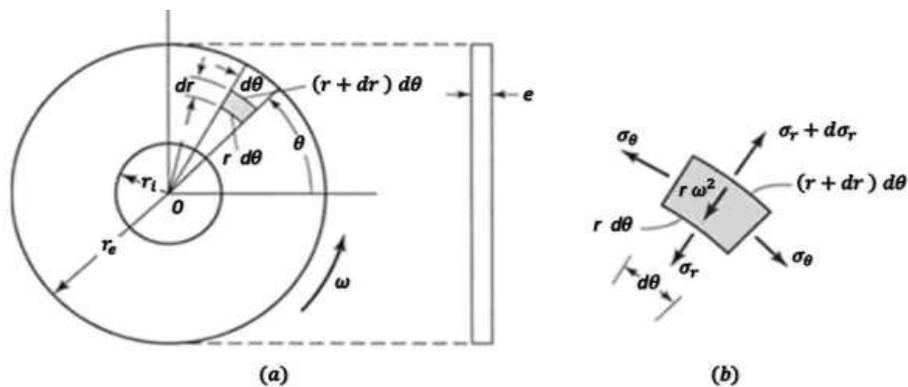
Figura 11. Geometría de disco más eficiente



Nota. La configuración de la figura es más eficiente según Rice y Davydov Sherstyuk citado por Hoya y Guha

Para que el disco pueda ser tratado como delgado, el radio externo (r_e) debe ser al menos 25 veces más grandes que el espesor (e). También se asume que el disco tiene espesor constante, y que el radio interno (r_i) es mucho menor comparado con el radio externo.

Figura 12. Geometría rotatorio y esfuerzos en el disco



Nota: (a) Geometría del disco anular rotatorio (b) Esfuerzos en un elemento infinitesimal



Los esfuerzos y desplazamientos en un disco anular rotatorio son:

$$\sigma_r = \frac{3+\nu}{8} \left(r_i^2 + r_e^2 - r^2 - \frac{r_i^2 r_e^2}{r^2} \right) \rho \omega^2 \quad (2.1)$$

$$\sigma_\theta = \frac{3+\nu}{8} \left(r_i^2 + r_e^2 - \frac{1+3\nu}{3+\nu} r^2 + \frac{r_i^2 r_e^2}{r^2} \right) \rho \omega^2 \quad (2.2)$$

$$U = \frac{(3+\nu)(1-\nu)}{8E} \left(r_i^2 + r_e^2 - \frac{1+\nu}{3+\nu} r^2 + \frac{1+\nu}{1-\nu} \frac{r_i^2 r_e^2}{r^2} \right) \rho \omega^2 r \quad (2.3)$$

Las ecuaciones (2.1 a 2.3) sirven para determinar el esfuerzo radial, el esfuerzo tangencial y el desplazamiento para un determinado valor de r respectivamente con el fin de proporcionar un diseño que garantice tanto su integridad estructural como la holgura adecuada que evite que los discos rocen con la carcasa.

2.3.17. Esfuerzo máximo

El esfuerzo máximo en los discos de una microturbina Tesla ocurre principalmente debido a las altas velocidades de rotación, lo que provoca la acumulación de esfuerzos centrífugos y tangenciales. El esfuerzo máximo se produce en las regiones periféricas del disco, donde la velocidad lineal es mayor y las fuerzas centrífugas alcanzan su punto más alto. Este esfuerzo máximo es un factor determinante en el diseño, ya que si excede el límite elástico del material, puede inducir deformaciones plásticas o fracturas. Para prevenir esto, es fundamental utilizar materiales con alta resistencia a la tracción, como aceros de baja aleación o aceros inoxidables, que puedan soportar estos esfuerzos sin comprometer la integridad estructural del disco (Shigley, Mischke, & Budynas, 2015).

Para encontrar el esfuerzo radial máximo aplicamos la condición $\frac{d\sigma_r}{dr} = 0$, y al desarrollar encontramos que es máximo cuando $r = \sqrt{r_i r_e}$ sustituyendo este valor de r en la ecuación (2.1) se obtiene.

$$(\sigma_r)_{max} = \frac{3+\nu}{8} \rho \omega^2 r_e^2 \left(1 - \frac{r_i}{r_e} \right)^2 \quad (2.4)$$

Para el esfuerzo tangencial máximo se observa de la ecuación (2.2) que cuando $r \rightarrow r_i$ luego $\sigma_\theta \rightarrow (\sigma_\theta)_{max}$, por lo que el esfuerzo será máximo cuando $r = r_i$. Sustituyendo este valor se obtiene:



$$(\sigma_{\theta})_{max} = \frac{3+\nu}{8} \rho \omega^2 r_e^2 \left(1 + \frac{1-\nu r_i^2}{3+\nu r_e^2} \right) \quad (2.5)$$

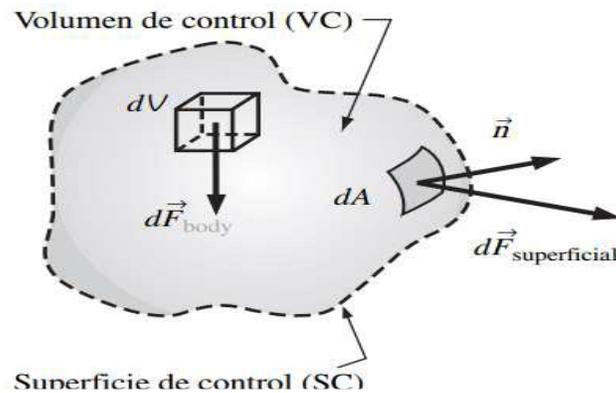
2.4. Modelo matemático del fluido entre los discos

2.4.1. Modelo matemático que describe el funcionamiento de una turbina Tesla

Para estudiar el flujo de fluidos en sistemas cerrados o abiertos. Se utilizan los principios de continuidad, impulso y energía para analizar el movimiento de fluidos. Una vez que se ha creado el volumen de control y su límite incluyen las diferentes formas de energía que atraviesan el límite con el fluido. Pueden ser expresadas en forma de ecuación para encontrar la solución al problema en particular. Dado que el fluido la turbina cruza los límites de volumen de control, el enfoque de control de volumen. es conocido como un análisis de sistema "abierto".

En la mecánica de fluidos, con frecuencia es más conveniente trabajar con volúmenes de control y por lo tanto, surge la necesidad de relacionar los cambios en un volumen de control con los cambios en un sistema (Figura 13). La relación entre las razones de cambio respecto del tiempo de una propiedad extensiva para un sistema y para un volumen de control se expresa por el teorema del transporte de Reynolds.

Figura 13. Fuerza total que actúa sobre un volumen de control está formada por fuerzas de cuerpo y fuerzas de superficie.



Nota. Análisis del fluido entre los discos. Recuperado de <https://mecanica-de-fluidos-2.webnode.mx//aventurate/>

La característica principal es la adherencia del fluido a la superficie de los discos debido al principio de viscosidad y la fricción en las capas límite. El vapor de agua, al entrar tangencialmente entre los discos, genera una fuerza de arrastre que pone en movimiento al conjunto de discos acoplados a un eje. Para que la transferencia de momento sea más efectiva el flujo debe ser laminar.

El análisis del flujo en tuberías es fundamental para caracterizar el comportamiento del fluido entre discos y ayuda a determinar el grosor de la capa límite, lo que a su vez es indicativo del espaciamiento del disco teniendo en cuenta que para que un fluido se considere laminar $Re < 2300$.

El espacio entre discos y la velocidad de entrada del vapor son variables determinantes en la eficiencia del sistema, ya que un espacio demasiado grande disminuiría la interacción fluido-disco, mientras que uno demasiado pequeño aumentaría la fricción interna y las pérdidas energéticas (Schlichting & Gersten, 2016).



$$flam = \frac{64 \mu}{\rho D_{eff} V} = \frac{64}{Re_D} \quad (2.6)$$

Donde

μ = viscosidad dinámica del fluido [kg/s^2]

ρ = densidad del fluido [kg/m^3]

D_{eff} = Diámetro efectivo [m]

V = Velocidad promedio del fluido [m/s]

H. Couto et al., mencionan que el número de Reynolds (Re_D) está basado en el diámetro del conducto como longitud característica para el flujo entre discos consecutivos. Se requiere determinar un diámetro efectivo (D_{eff}) con el fin de obtener un diámetro representativo de un conducto imaginario que tendrá las mismas condiciones de flujo que el de la turbina.

$$D_h = \frac{4 A_f}{P} \quad (2.7)$$

Donde

D_h : Diámetro hidráulico de un conducto representativo.

A_f : Área de sección transversal efectiva del flujo

P : Perímetro húmedo

La teoría ofrece una precisión razonable cuando se hace uso del diámetro hidráulico, siendo bastante preciso si se usa el diámetro efectivo. Usando la distancia de separación entre discos (b) se puede escribir como

$$D_h = \frac{4(\pi D_e b)}{2(\pi D_e + b)} \quad (2.8)$$



Donde De es el diámetro externo del disco por lo tanto $b < De$

$$D_h \cong 2b$$

La suposición del diámetro hidráulico tomada es apropiada para el flujo a través de un conducto rectangular ancho. El diámetro efectivo se puede calcular como una fracción del diámetro hidráulico.

$$D_{eff} = \frac{4}{3}b \quad (2.9)$$

Por lo tanto, al sustituir la ecuación (2.8) en (2.9) el número de Reynolds puede ser escrito como

$$Re_D = \frac{4\rho Vb}{3\mu} = \frac{vD_{eff}}{\nu} \quad (2.10)$$

2.4.2. *Análisis del flujo mediante el modelo simplificado*

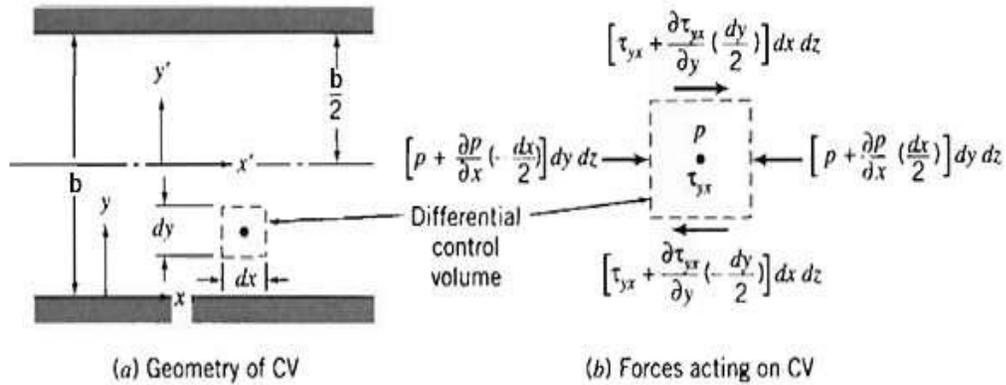
Para un flujo completamente desarrollado se sabe que el perfil de velocidad en el flujo es de naturaleza parabólico y puede expresarse como:

$$u = \frac{b^2}{2\mu} \left(\frac{\partial P}{\partial X} \right) \left[\left(\frac{y}{b} \right)^2 - \left(\frac{y}{b} \right) \right] \quad (2.11)$$

Para describir el fenómeno físico de la turbina se considera el análisis como un flujo entre dos placas paralelas infinitas, como el flujo está completamente desarrollado, la velocidad no puede variar con x y por lo tanto depende únicamente de y de modo que $u = \frac{du}{dy}$

Además, no hay componente de velocidad en la dirección y ó z ($v = w = 0$). Para un flujo completamente desarrollado únicamente la presión puede cambiar en dirección x .

Figura 14. Volumen de control para el análisis de flujo entre dos placas infinitas paralelas estacionarias.



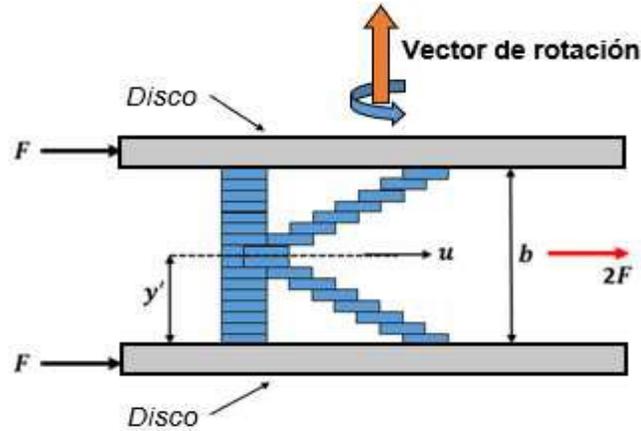
Nota. Para un flujo laminar completamente desarrollado, se sabe que el perfil de velocidad desarrollado en el flujo es de naturaleza parabólica por J. González Berrones, mayo 2020, p. 29.

Para un fluido newtoniano. El efecto viscoso de Newton estipula que el esfuerzo cortante en el fluido es proporcional a la rapidez de cambio de la velocidad con respecto a "y"

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (2.12)$$

El esfuerzo cortante presentado en el fluido se puede representar e interpretar como el deslizamiento entre una lámina de fluido y otra (Figura 15) debido a una fuerza neta aplicada, misma fuerza que genera el empuje de los discos debido a la condición del no-deslizamiento a causa de los efectos viscosos y en consecuencia provocando la rotación de los discos del rotor debido a la transferencia de energía por parte del fluido.

Figura 15. Representación del esfuerzo cortante entre los discos



Nota. Deslizamiento entre láminas de fluido que genera el empuje de los discos y provoca su rotación debido a la transferencia de energía por J. González Berrones, mayo 2020, p. 29.

A partir de la figura 15 se puede decir que los esfuerzos máximos presentes en el fluido están ubicados en la superficie superior e inferior del fluido mientras que el centro es nulo.

De acuerdo con Alan McDonald la velocidad promedio V del fluido es:

$$V = -\frac{1}{12\mu} \left(\frac{\partial P}{\partial x} \right) b^2 \quad (2.13)$$

Despejando $\left(\frac{\partial P}{\partial x} \right)$ se obtiene.

$$\left(\frac{\partial P}{\partial x} \right) = -\frac{12\mu V}{b^2} \quad (2.14)$$

Se puede expresar el esfuerzo de corte en términos de la velocidad promedio

$$\frac{d\mu}{dy} = \frac{b^2}{2\mu} \left(\frac{\partial P}{\partial x} \right) \left[\left(\frac{2y}{b^2} \right) - \left(\frac{1}{b} \right) \right] \quad (2.15)$$

Entonces:

$$\frac{d\mu}{dy} = \frac{b}{4\mu} \left(\frac{\partial P}{\partial x} \right) \quad (2.16)$$

Sustituyendo la ecuación 2.15 en la ecuación 2.16 obtenemos en términos de la velocidad promedio.



$$\frac{d\mu}{dy} = \frac{3V}{b} \quad (2.17)$$

Al sustituir la ecuación 2.16 en la ecuación 2.17 obtenemos el esfuerzo cortante promedio o resultante

$$\tau = \frac{3V\mu}{b} \quad (2.18)$$

El esfuerzo cortante τ es la relación entre la fuerza y el área a través de la cual se origina el deslizamiento, en este caso el fluido se considera como unas láminas delgadas deslizándose una tras otra debido a una fuerza externa aplicada, provocando la rotación inmediata de los discos a causa del fenómeno físico de la adhesión y viscosidad. Por lo tanto, el esfuerzo cortante puede definirse como.

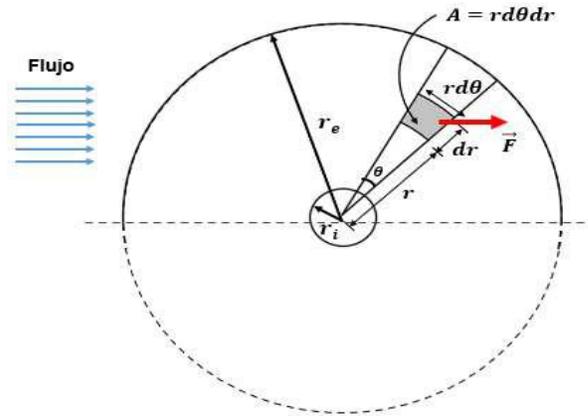
$$\tau = \frac{F}{A} = \mu \frac{du}{dy} \quad (2.19)$$

Al conocer τ y despejar F de la ecuación 2.19 podemos obtener la fuerza aplicada por el fluido entre los discos teniendo en cuenta que la fuerza total está distribuida en la parte superior e inferior de las placas (discos) como se mostró en la figura 15 por lo tanto para encontrar la fuerza de empuje que existe en cada una (un disco) se hace un análisis considerando la mitad de la distancia que las separa puesto que se desea conocer la fuerza de empuje existente en cada disco.

$$F = \tau * A \quad (2.20)$$

El análisis se concentrará únicamente en un disco de la turbina considerándolo como una placa plana, con un fluido actuando en línea recta como se muestra en la Figura 16.

Figura 16. Representación del sistema del disco.



Nota. El análisis se concentrará únicamente en un disco de la turbina por J. González Berrones, mayo 2020, p. 31.

Se considera un elemento de área diferencial A sobre el disco a una distancia r desde el centro del disco y un ángulo θ . El área de un elemento diferencial está dada por:

$$A = r d\theta dr \tag{2.21}$$

Recordando que la fuerza de empuje que actúa sobre un disco se define como $F = \tau \cdot A$ donde A es el área de contacto del fluido sobre la superficie del disco y τ es el esfuerzo cortante existente en el fluido, el torque generado está dado por:

$$T = F \cdot r \tag{2.22}$$

Mediante el uso de la doble integral, desde $r = 0$ hasta r , donde r es el radio del disco y desde $\theta = 0$ a π , se calcula el torque total actuando únicamente sobre el lado lateral de un solo disco. Sustituyendo la ecuación 2.21 y 2.22 en 2.23 obtenemos:

Página | 32

$$T = \tau \cdot A \cdot r \tag{2.23}$$

$$T = (\tau \cdot r d\theta dr)(r) = (\tau \cdot r^2 d\theta dr) \tag{2.24}$$



$$T = \tau \int_0^\pi d\theta \int_0^r r^2 dr \quad (2.25)$$

Resolviendo la integral obtenemos:

$$T = \frac{\tau \pi r^3}{3} \quad (2.26)$$

Si $\tau = \frac{3V\mu}{b}$ teniendo en cuenta la distribución del esfuerzo cortante del fluido y considerando a los discos como dos placas paralelas estacionarias entonces la distribución de fuerzas representadas en el diagrama de la Figura 4.3.2 contempla la mitad de la distancia que separa a los discos entonces el valor de b será $\frac{b}{2}$ por lo tanto $\tau = \frac{6V\mu}{b}$ sustituyendo en la ecuación 4.3.16 obtenemos.

$$T = \frac{2V\mu\pi r^3}{b} \quad (2.27)$$

Este torque ha sido calculado para la mitad del disco únicamente debido a las restricciones que presenta el modelo propuesto y para un lado del disco únicamente. Sabiendo que el fluido fluye en ambos lados del disco el torque deberá ser el doble que este, por lo tanto, el torque total presentado en un solo disco del rotor es igual a:

$$T_{DISCO} = \frac{4V\mu\pi r^3}{b} \quad (2.28)$$

Donde:

V : velocidad promedio del fluido [m/s]

μ : viscosidad dinámica [kg/m*s]

r : radio del disco [m]

b : separación entre discos [m]

En consecuencia, el torque de salida en el eje del rotor será la multiplicación de T_{Disco} por el número total de discos N :

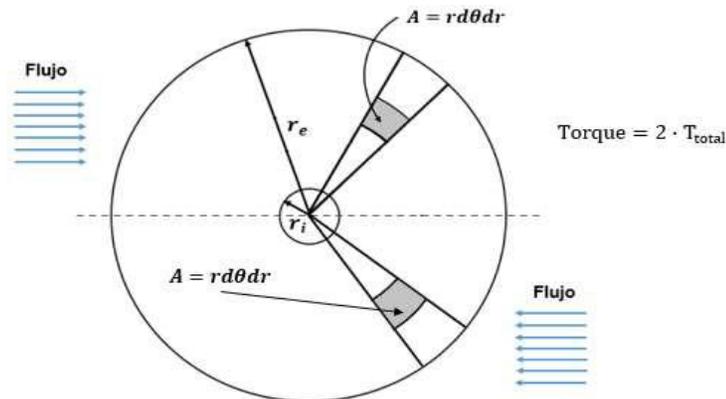
$$T_{total} = T_{Disco} \cdot N \quad (2.30)$$

La potencia de salida puede obtenerse a partir del torque total calculado y la velocidad angular de la turbina en óptimas condiciones mediante la siguiente ecuación:

$$P_s = \omega \cdot T_{total} \quad (2.31)$$

La dirección del flujo no es óptima en este análisis ya que simplemente fluye en línea recta (de izquierda a derecha) y las condiciones de entrada del fluido en la realidad no representan exactamente estas características, asumiendo que el fluido debe mantenerse en estado laminar para velocidades de entrada más altas determina número de Reynolds > 2300 por lo que este modelo dejaría de ser válido; sin embargo, se trata de interpretar el fenómeno físico con el fin de obtener de manera analítica un torque teórico que represente el comportamiento del sistema bajo ciertas condiciones de trabajo para cuestiones de diseño. Cabe mencionar que si se considera un flujo entrante en dirección opuesta en la mitad inferior del disco cubriendo ambos lados del disco el torque será 2 veces mayor que el calculado anteriormente Figura 17.

Figura 17. Representación de la entrada del fluido en 2 posiciones diferentes



Nota. La dirección del flujo para el análisis del disco por J. González Berrones, mayo 2020, p. 33.



Para conocer el torque desarrollado en la turbina mediante el modelo simplificado ecuación (4.3.16) se realiza un análisis contemplando diferentes valores de b tomando en cuenta las diferentes condiciones de trabajo que involucran mantener el perfil de velocidad del fluido completamente desarrollado en estado laminar, con el objetivo de analizar el desempeño de la turbina bajo ciertas condiciones de trabajo y como estas características influyen en el rendimiento de la turbina.

El modelo matemático toma en cuenta el torque desarrollado en un solo disco y contempla la velocidad promedio del fluido V entre discos (contemplándolos como dos placas paralelas), la viscosidad del fluido μ , el radio del disco r y la distancia entre discos b . Por lo tanto, para hacer valido este análisis el fluido se debe encontrar en estado laminar.

2.5. Método del vórtice libre

Del modelo matemático desarrollado anteriormente las líneas de flujo actuando sobre los discos fue de manera uniforme simplificando el comportamiento que presenta el fluido entre los discos. En este modelo se consideran a las líneas de flujo blafes (líneas concéntricas) que van desde el exterior del disco hasta el centro del disco donde tienen salida, esto puede ser modelado como un vórtice libre ya que el sistema representa dicho fenómeno físico debido a que ninguna fuerza externa desarrolla la formación de un vórtice en el interior de la turbina es por eso que esta condición representa de mejor manera el comportamiento del fluido dentro de la turbina.

De acuerdo a Munson et al, el flujo en un vórtice libre es dado por:

$$\phi = \left[\left(\frac{\Gamma}{2\pi} \right) \cdot \theta \right] - \left[\left(\frac{m}{2\pi} \right) \cdot \ln r \right] \quad (2.5.1)$$

Donde:

$\left(\frac{\Gamma}{2\pi} \right) \cdot \theta$ = representa la velocidad potencial en un vórtice libre

$\left(\frac{m}{2\pi} \right) \cdot \ln r$ = representa la velocidad potencial en un vórtice con un sumidero central



En la ecuación:

Γ = representa la circulación del vórtice

m = es la constante de la componente de velocidad radial del fluido.

En un movimiento puramente circulatorio (flujo de vórtice libre), la velocidad tangencial y radial se puede escribir como :

$$v = \frac{\Gamma}{2\pi r} = \frac{C}{r} \quad (2.5.2)$$

$$v = 0 \quad (2.5.3)$$

Donde Γ es la circulación del flujo y r es la distancia radial desde el centro del vórtice hasta donde la velocidad está siendo considerada en otras palabras la velocidad tangencial en un vórtice libre será inversamente proporcional a la distancia radial r siendo C una constante. El modelo del vórtice libre será representado mediante el siguiente diagrama el cual será una representación física del sistema como puede apreciarse en la siguiente figura 18.

Figura 18. Modelo del vórtice libre



Nota. Velocidad tangencial en un vórtice libre por J. González Berrones, mayo 2020, p. 36

Considerando el análisis anterior en donde el esfuerzo cortante del fluido es $\tau = \frac{3V\mu}{b}$ Sustituyendo V por la velocidad tangencial $V\theta$ se obtiene la siguiente ecuación para el modelo del vórtice libre.

$$\tau = \frac{3\Gamma\mu}{2\pi r b} = \frac{3\mu V\theta}{b} \quad (2.5.4)$$



Si la fuerza de empuje que actúa sobre el disco se define como $F = \tau \cdot A$. Donde A es el área de contacto del fluido sobre la superficie del disco y τ es el esfuerzo cortante existente en el fluido, el torque desarrollado en una sola cara del disco a partir de la ecuación 2.5.4 será

$$T = \tau \cdot A \cdot r \quad (2.5.5)$$

Si para un elemento diferencial de área $A = r d\theta dr$, sustituyendo en la ecuación (2.5.5)

$$T = \tau \cdot r d\theta dr \cdot r \quad (2.5.6)$$

Aplicando la doble integral, desde $r = r_i$ hasta r_e y desde $\theta = 0$ a 2π lo que representa el área de contacto del fluido con el disco, se calcula el torque total actuando únicamente sobre el lado lateral de un solo disco.

$$T = \tau \cdot r \left[\iint r d\theta dr \right]$$
$$T = \tau \cdot r \left[\int_0^{2\pi} d\theta \int_{r_i}^{r_e} r dr \right]$$

Resolviendo la integral

$$T = \tau \cdot r \left(\frac{r_e - r_i}{2} * 2\pi \right) \quad (2.5.7)$$

Si $\tau = \frac{3\mu V\theta}{b}$ teniendo en cuenta la distribución del esfuerzo cortante a partir de la Figura 18 el análisis contempla la mitad de la distancia que separa a los discos entonces el valor de b será $\frac{b}{2}$ por lo tanto

$\tau = \frac{6\mu V}{b}$ sustituyendo en la ecuación (2.5.7)

$$T = \frac{6V\theta}{b} * r \left(\frac{r_e^2 - r_i^2}{2} * 2\pi \right)$$

$$T = \frac{6V\theta\pi r(r_e^2 - r_i^2)}{b} \quad (2.5.8)$$



Como resultado se obtiene únicamente el torque expuesto en una sola cara del disco considerando que el fluido fluye en ambas caras del disco el torque calculado anteriormente será el doble para un solo disco, por lo tanto.

$$T_{DISCO} = \left(\frac{6V\theta\pi r(r_e^2 - r_i^2)}{b} \right) * 2 \quad (2.5.9)$$

Donde:

$V\theta$: velocidad tangencial del fluido [m/s]

μ : viscosidad dinámica [kg/m·s]

r : distancia radial desde el centro del vórtice hasta donde la velocidad está siendo considerada [m]

r_e : radio exterior [m]

r_i : radio interior [m]

b : separación entre discos [m]

En consecuencia, el torque de salida en el eje del rotor será la multiplicación de T_{Disco} por el número total de discos N obteniendo así un torque teórico para la turbina:

$$T_{total} = T_{Disco} \cdot N \quad (2.5.10)$$

La potencia de salida puede obtenerse a partir del torque total calculado y la velocidad angular de la turbina en óptimas condiciones ecuación (2.4.11)

$$P_s = \omega \cdot T_{total} \quad (2.5.11)$$

A diferencia del modelo simplificado, el método del vórtice libre describe de mejor manera el comportamiento del fluido en el interior de la turbina. Para conocer el comportamiento de la turbina mediante el modelo matemático vórtice libre ecuación (4.3.20) se realiza un análisis para una turbina con enfoque en la micro generación de energía.



2.6. Vapor de Agua como Fluido Energético

El vapor de agua es un fluido energético ampliamente utilizado en la generación de energía debido a sus excepcionales propiedades termodinámicas. Se considera un pilar en la generación de energía desde la Revolución Industrial. Su capacidad para transferir energía de manera eficiente lo hace ideal para su uso en turbinas de vapor y otros sistemas de conversión de energía.

2.6.1. *Propiedades termodinámicas*

El vapor de agua tiene propiedades termodinámicas excepcionales que lo hacen adecuado para la generación de energía. Estas propiedades incluyen alta capacidad calorífica, alta entalpía de vaporización y un amplio rango de temperaturas y presiones en las que puede existir (Cengel & Boles, 2015).

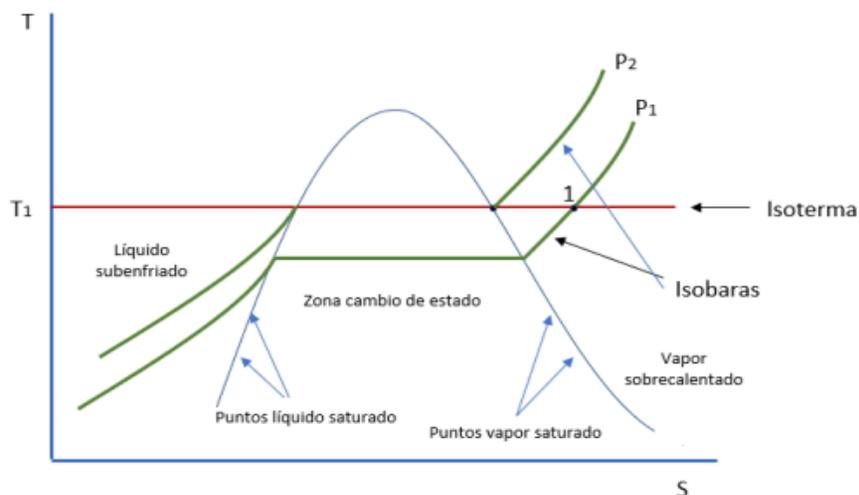
1. **Capacidad Calorífica:** El vapor de agua puede almacenar y transferir grandes cantidades de energía térmica, lo que es esencial para su uso en turbinas de vapor y calderas (Cengel & Boles, 2015)
2. **Entalpía de Vaporización:** La alta entalpía de vaporización del agua permite una eficiente transferencia de energía durante la fase de cambio de líquido a vapor, proporcionando una fuente potente de energía térmica (Moran & Shapiro, 2010).
3. **La entropía (s):** Es una magnitud termodinámica que mide el grado de desorden o irreversibilidad en un sistema energético. En el contexto de una microturbina de vapor, la entropía es fundamental para analizar la eficiencia del proceso de expansión del vapor y determinar las pérdidas energéticas debido a irreversibilidades internas como fricción, turbulencia y transferencia de calor no deseada.
4. **La calidad del vapor:** También conocida como título de vapor, es un parámetro termodinámico que indica la proporción de vapor seco en una mezcla de vapor y agua líquida. Se expresa generalmente como un porcentaje o fracción.
5. **Amplio Rango de Temperaturas y Presiones:** El vapor de agua puede operar en un amplio rango de condiciones de temperatura y presión, lo que lo hace versátil para diversas aplicaciones industriales (Cengel & Boles, 2015)

Propiedades Críticas del Vapor de Agua para la Transferencia de Energía

Las propiedades críticas del vapor de agua, como el punto crítico y el comportamiento de la fase supercrítica, son fundamentales para su eficiencia en la transferencia de energía en turbinas.

1. Punto Crítico: El punto crítico del agua es de $374\text{ }^{\circ}\text{C}$ y 221 bar . Más allá de este punto, el agua se comporta como un fluido supercrítico, lo que permite una mayor eficiencia en la transferencia de calor y una reducción en el tamaño de los equipos necesarios (Kestin, *The thermodynamics of water in supercritical states*, 1978).
2. Fase Supercrítica: En la fase supercrítica, el vapor de agua no distingue entre líquido y gas, lo que permite una transferencia de calor más eficiente y una operación más estable en las turbinas (Kestin, *The thermodynamics of water in supercritical states*, 1978)
3. Densidad y Viscosidad: La densidad y la viscosidad del vapor de agua en condiciones críticas y supercríticas facilitan la transferencia de energía y reducen las pérdidas por fricción, mejorando la eficiencia global de las turbinas (Wagner & Kretzschmar, 2008).

Figura 19. Diagrama de temperatura y entropía



Nota. Velázquez Martí, Borja.



2.6.2. Ventajas del uso del vapor de agua

El uso del vapor de agua como fluido energético presenta varias ventajas sobre otros medios, como los aceites térmicos y los gases. El objeto de esta investigación es identificar también las ventajas y desafíos que se puedan atravesar en el diseño y construcción de una microturbina a vapor tipo Tesla para generar energía.

1. **Abundancia y Disponibilidad:** El agua es abundante y fácilmente disponible, lo que la hace económica y accesible para su uso en grandes volúmenes (Cengel & Boles, 2015). En el caso puntual de la Universidad San Antonio de Abad del Cusco, las reservas de agua potable no serían una limitante ni tendrían un impacto negativo institucional.
2. **Capacidad Calorífica Elevada:** Comparado con otros fluidos, el agua tiene una capacidad calorífica más alta, lo que permite una mayor transferencia de energía por unidad de masa (Moran & Shapiro, 2010)
3. **No Tóxico y Seguro:** El vapor de agua es no tóxico y no inflamable, lo que reduce los riesgos de seguridad y el impacto ambiental en comparación con otros fluidos térmicos (Cengel & Boles, 2015).
4. **Compatibilidad con Materiales:** El agua no requiere materiales especiales o costosos para su contención y transporte, a diferencia de otros fluidos que pueden ser corrosivos o reaccionar con ciertos materiales (Kestin, The thermodynamics of water in supercritical states, 1978).

2.6.3. Desafíos técnicos y ambientales del uso del vapor de agua

A pesar de sus numerosas ventajas, el uso del vapor de agua como fluido energético también presenta desafíos técnicos y ambientales.

1. **Corrosión y Escalado:** La generación y el manejo de vapor de agua pueden causar problemas de corrosión y escalado en las tuberías y equipos, lo que requiere tratamientos químicos y mantenimientos regulares (Kim H, 2013).



2. **Eficiencia Energética:** La eficiencia de los sistemas de generación de vapor puede verse afectada por las pérdidas de calor y la necesidad de mantener altas presiones y temperaturas, lo que puede incrementar los costos operativos (Valenti, 2005). Sin embargo, en el caso puntual de la Universidad San Antonio de Abad del Cusco, esto sería un limitante ya que la energía eléctrica no genera costos por ser una universidad nacional que le pertenece al estado peruano.
3. **Impacto Ambiental:** La generación de vapor de agua a menudo implica la quema de combustibles fósiles, lo que contribuye a la emisión de gases de efecto invernadero y otros contaminantes. Sin embargo, la integración de tecnologías de energía renovable puede mitigar estos impactos (Wang L. , 2014).
4. **Gestión de Agua:** El uso intensivo de agua en sistemas de generación de vapor requiere una gestión cuidadosa para evitar el agotamiento de recursos hídricos y garantizar la sostenibilidad a largo plazo (Cengel & Boles, 2015).

2.7. Calderas de vapor

2.7.1. Tipos y funcionamiento

Las calderas de vapor son dispositivos críticos en la generación de vapor, utilizados comúnmente en aplicaciones industriales y de generación de energía. Se clasifican principalmente en tres tipos: calderas de tubos de fuego, calderas de tubos de agua y calderas eléctricas según (González, 2008).

1. **Calderas de Tubos de Fuego:** El calor para la generación de vapor proviene de la combustión de combustibles, y los gases calientes pasan a través de tubos sumergidos en agua. Son adecuadas para operaciones de baja a mediana presión y tienen una estructura simple, lo que las hace económicas y fáciles de operar.
2. **Calderas de Tubos de Agua:** En estas calderas, el agua circula a través de tubos y es calentada por gases que pasan alrededor de los mismos. Están diseñadas para altas presiones y son eficientes en la transferencia de calor debido a su área de superficie aumentada.



3. Calderas Eléctricas: Utilizan resistencias eléctricas para calentar el agua y generar vapor. Son extremadamente eficientes y limpias, pero el costo de operación puede ser alto dependiendo del precio de la electricidad.

2.7.2. *Cómo se relacionan con las turbinas Tesla*

Las calderas de vapor juegan un papel crucial en el suministro de vapor a las turbinas Tesla. La eficiencia de una turbina Tesla depende significativamente de la calidad y la presión del vapor suministrado de la siguiente manera:

1. Integración del Sistema: Para maximizar la eficiencia energética, la caldera debe estar bien integrada con la turbina, asegurando que el vapor generado tenga la presión y temperatura óptimas que la turbina Tesla necesita para operar eficientemente.
2. Control de Calidad del Vapor: Debe mantenerse una supervisión constante sobre la calidad del vapor para prevenir problemas como la cavitación o el desgaste excesivo en los componentes de la turbina (López Pérez & Martín López, 2012) como en la Figura 3.1.

2.8. Definición de términos

2.8.1. *Glosario*

1. **Álabes:** Componentes de una turbina que dirigen o modifican el flujo de fluidos (usualmente vapor o gas) para extraer energía del movimiento del fluido. En el contexto de las turbinas de vapor tradicionales, los álabes son esenciales para transformar la energía térmica del vapor en energía mecánica rotacional.
2. **Cavitación:** Fenómeno que ocurre cuando la presión en un fluido cae por debajo de su presión de vapor, formando cavidades de vapor que pueden causar daño físico cuando colapsan. Es una consideración importante en el diseño de turbinas.



3. Entalpía: Medida de la energía total contenida en un sistema termodinámico, que se transfiere durante un proceso térmico. La entalpía del vapor es crucial en las operaciones de las turbinas de vapor, pues indica cuánta energía puede ser transformada en trabajo mecánico.
4. Efecto de Capa Límite: Fenómeno en la mecánica de fluidos donde el fluido que fluye próximo a una superficie sólida adhiere a la superficie, y su velocidad se reduce comparada con el fluido en movimiento libre. Este efecto es fundamental en el diseño de las turbinas Tesla, donde la transferencia de energía se realiza a través del arrastre entre los discos y el fluido.
5. Rotor: Componente de una turbina que gira para convertir la energía cinética del fluido en trabajo mecánico. En las turbinas Tesla, el rotor consiste en una serie de discos lisos que rotan debido al flujo del fluido a través de ellos.
6. Estator: Parte estática en una turbina que, junto con el rotor, ayuda a convertir la energía del fluido en energía mecánica. Los estatores dirigen el flujo del vapor hacia los rotores de manera controlada.
7. Turbina de Impulso: Tipo de turbina donde el cambio de presión del fluido (y por lo tanto, la conversión de energía térmica en cinética) ocurre principalmente en la tobera fija antes de que el fluido entre en contacto con los álabes móviles.
8. Turbina de Reacción: Turbina que utiliza la reacción producida por el flujo de fluido para generar movimiento. A diferencia de las turbinas de impulso, las turbinas de reacción permiten que el fluido se expanda y acelere en los álabes móviles, así como en los álabes fijos.
9. Microturbinas: Pequeñas turbinas de gas que funcionan en el mismo principio que las grandes turbinas de gas, pero son mucho más pequeñas y pueden ser utilizadas en aplicaciones de generación de energía descentralizada.
10. Turbinas Tesla: Tipo especial de turbina sin álabes diseñada por Nikola Tesla. Utiliza discos lisos y depende del efecto de capa límite para transferir energía del fluido a los discos, lo que permite un diseño más simple y menos susceptible a la cavitación.



CAPÍTULO 3: DISEÑO TERMODINAMICO

3.1. Objetivo del diseño

El objetivo principal, es desarrollar un sistema eficiente de conversión de energía térmica en energía mecánica mediante la utilización de una microturbina, basada en el diseño hidráulico y mecánico de la turbina Tesla, que pueda generar 0.5 kW de potencia. Este proyecto busca optimizar el aprovechamiento de vapor agua y de la energía térmica de una caldera, transformándola en energía útil de manera efectiva, contribuyendo así a la generación de electricidad o energía mecánica en aplicaciones de pequeña escala.

Uno de los desafíos clave en cualquier sistema de generación de energía es maximizar el aprovechamiento de la energía térmica disponible. En este caso, la caldera genera vapor a partir de una fuente de calor, que puede ser un combustible fósil, biomasa, energía solar o incluso calor residual de procesos industriales. Este vapor, al pasar por la microturbina, debe ser capaz de transferir su energía cinética de manera eficiente a los discos de la turbina, logrando así la generación de energía mecánica.

Para lograr esto, el diseño de la turbina de Tesla debe optimizarse para asegurar una transferencia máxima de energía desde el vapor a los discos. Esto implica ajustar parámetros como la presión y temperatura del vapor, el diámetro y grosor de los discos, la distancia entre ellos, y la velocidad de rotación. La elección de estos parámetros es crucial para asegurar que la microturbina sea capaz de generar los 0.5 kW de potencia de manera estable y eficiente.

Asimismo, es fundamental considerar el ciclo térmico en el que opera la turbina. Este ciclo, denominado ciclo Rankine, debe ser optimizado para minimizar las pérdidas de calor y maximizar la conversión de energía térmica a trabajo útil. Esto implica el uso de intercambiadores de calor, aislantes térmicos, y un control preciso de las condiciones de operación de la caldera y la turbina.



3.2. Selección del modelo y configuración

La turbina Tesla se basa en un principio de conversión de energía que difiere significativamente de las turbinas tradicionales. Mientras que las turbinas tradicionales dependen de álabes o paletas para transferir energía del fluido en movimiento al rotor, la turbina Tesla utiliza un conjunto de discos lisos, que están situados en paralelo y colocados en un eje central. La energía del fluido se transfiere a los discos a través de fricción y adherencia, más que por impacto directo, lo que genera el movimiento rotatorio.

Según Tesla (1913), el fluido, ya sea vapor o gas, entra en la turbina tangencialmente a través de una tobera y se mueve en forma espiral entre los discos. A medida que el fluido pasa entre los discos, la fricción entre el fluido y la superficie de los discos hace que estos giren. Una vez que el fluido ha transferido la mayor parte de su energía, es expulsado por la parte central de la turbina.

Este diseño simple tiene ventajas claves, como la reducción de las pérdidas por impacto y la capacidad de operar a bajas presiones, lo que la hace adecuada para diversas aplicaciones energéticas (Hunter & Bryant, 2020). Además, presenta una mayor resistencia a la cavitación, un problema común en las turbinas tradicionales (Ackeret, 1952)

La configuración mecánica de la turbina Tesla involucra varios parámetros clave que afectan su funcionamiento, incluyendo el número y el diámetro de los discos, la distancia entre ellos, la presión y la velocidad del fluido de entrada, y la geometría de las toberas de entrada. Cada uno de estos factores juega un papel fundamental en la eficiencia general de la turbina.



3.2.1. *Análisis de requisitos de potencia*

Para diseñar una turbina Tesla que genere 0.5 kW se debe comenzar con la configuración adecuada de los discos, ya que son el componente principal en la transferencia de energía. El número de discos, su diámetro y el espacio entre ellos son factores clave que determinan la eficiencia de la turbina. Según Eldridge et al. (2019), una mayor cantidad de discos mejora la capacidad de la turbina para capturar energía del fluido, ya que aumenta la superficie de contacto. Sin embargo, si agregamos demasiados discos puede generar pérdidas por fricción y aumentar el peso del rotor, lo que reduce la eficiencia del sistema.

Requisitos de las partes de una turbina Tesla:

Diámetro y grosor de los discos: Los discos deben tener un diámetro adecuado para permitir una transferencia eficiente de energía. El grosor de estos también influye en la eficiencia, siendo más favorable el uso de discos delgados para reducir las pérdidas de fricción interna, siempre que el material sea lo suficientemente resistente para soportar las fuerzas de arrastre.

Distancia entre discos: La distancia entre los discos debe permitir que el fluido se desplace sin restricciones, pero también maximizar la fricción necesaria para generar el movimiento rotacional. La distancia óptima varía según el tipo de fluido utilizado y la presión de entrada, pero generalmente se recomienda una separación de entre 0.4 y 1 mm (Hunter & Bryant, 2020). Esto asegura que el fluido mantenga un flujo laminar, lo cual es crucial para el funcionamiento de la turbina Tesla.

Discos: El número de discos en una turbina Tesla puede variar, pero generalmente se encuentran entre 10 y 30 discos, dependiendo del tamaño de la turbina y de su aplicación. Los discos suelen ser delgados y hechos de acero o materiales resistentes al calor y la corrosión.

Tobera de entrada: La tobera de entrada en una turbina Tesla está diseñada para dirigir el fluido hacia los discos de manera tangencial, optimizando el contacto entre el fluido y la superficie del disco. La eficiencia del sistema depende de cómo se controla la velocidad del fluido y la distribución de presión en esta fase. Estudios recientes han mostrado que una configuración adecuada de la tobera puede mejorar significativamente la eficiencia de la turbina (Eldridge et al., 2019).



Material de los discos: El material del que están hechos los discos debe ser resistente a la corrosión y al desgaste mecánico, especialmente si se utiliza vapor a alta presión como fluido de trabajo. Según (Smith & Roberts, 2020), el acero inoxidable es uno de los materiales más utilizados debido a su durabilidad y resistencia a la oxidación.

Materiales y diseño estructural: Los materiales utilizados en la construcción de la turbina Tesla deben resistir altas temperaturas y presiones, así como el desgaste mecánico. El acero inoxidable es comúnmente utilizado debido a su alta durabilidad y resistencia a la corrosión. Además, la turbina debe ser diseñada para minimizar las pérdidas por fricción interna y maximizar el aprovechamiento de la energía del fluido. Este equilibrio es difícil de alcanzar, lo que ha llevado a diversas investigaciones sobre cómo optimizar el diseño de los discos y las superficies internas de la turbina (Kotas et al., 2021).

Características del fluido de entrada: El tipo de fluido utilizado y sus características son esenciales para obtener la potencia deseada. En una turbina Tesla, la eficiencia depende en gran medida de la velocidad y la viscosidad del fluido, así como de la presión y temperatura a las que se introduce en la turbina.

Velocidad del fluido: Para generar 0.5 kW de potencia, se requiere que el fluido entre en la turbina con una velocidad considerable. Estudios sugieren que para turbinas Tesla de baja potencia, la velocidad del vapor debe estar entre 50 y 100 m/s para garantizar una transferencia efectiva de energía (Carpenter, 2017). A estas velocidades, el fluido tiene suficiente impulso para generar el movimiento rotacional de los discos sin perder demasiada energía en el proceso.

Presión y temperatura: Para generar la potencia deseada, el vapor debe introducirse a una presión y temperatura específicas. Según Harrison y Ward (2019), la presión óptima para una turbina Tesla que produzca 0.5 kW está en el rango de 2 a 5 bares, con una temperatura de aproximadamente 200 °C. Estas condiciones aseguran que el vapor tenga suficiente energía cinética y térmica para ser aprovechada por los discos de la turbina.



Viscosidad del fluido: La viscosidad del fluido también influye en la transferencia de energía. Un fluido con alta viscosidad generará más fricción con los discos, lo que puede ser beneficioso, pero también puede aumentar las pérdidas por resistencia interna. Para turbinas Tesla, el vapor de agua es el fluido ideal debido a su baja viscosidad y alta capacidad térmica (Kotas et al., 2021).

Condiciones operativas y transferencia de energía: Para obtener 0.5 kW de potencia, es crucial optimizar la transferencia de energía entre el fluido y los discos. Esto implica controlar cuidadosamente las condiciones operativas, como el caudal de vapor y la velocidad de rotación de los discos.

Caudal de vapor: El caudal de vapor es uno de los parámetros más importantes para determinar la potencia de salida. Un caudal más alto significa que se está introduciendo más energía en el sistema, pero también puede aumentar las pérdidas por fricción y turbulencia. Estudios han mostrado que para generar 0.5 kW, el caudal de vapor debe estar en el rango de 0.02 a 0.05 kg/s, dependiendo de la presión de entrada (Bansal & Shakya, 2018).

Velocidad de rotación: La velocidad de rotación de los discos debe ser alta para que la energía del fluido se transfiera eficientemente. Para turbinas Tesla, la velocidad de rotación óptima se encuentra entre 10,000 y 20,000 revoluciones por minuto (rpm), dependiendo del diseño específico de la turbina y el fluido utilizado (Hunter & Bryant, 2020). Sin embargo, es importante garantizar que la estructura de la turbina pueda soportar estas altas velocidades sin comprometer la integridad mecánica.

Estos requisitos técnicos reflejan los desafíos de diseñar una turbina Tesla para aplicaciones de baja potencia, pero también demuestran su viabilidad en sistemas de micro generación de energía. Con el diseño adecuado y la optimización de las condiciones operativas, la turbina Tesla puede ofrecer una solución eficaz y de bajo mantenimiento para la generación de energía en aplicaciones especializadas.

3.2.2. Comparaciones de configuraciones de turbina Tesla y Turbina con alabes

En esta parte del capítulo, realizaremos una comparación de trabajo entre dos turbinas de vapor, del ciclo Rankine y de la microturbina de vapor tipo Tesla, las cuales trabajan con vapor de agua.



Tabla 1

Resumen comparativo técnico de las turbinas a vapor

Ítem	Características técnicas	Microturbina vapor tesla	Turbina vapor ciclo Rankine
1	Eficiencia ciclo	7%	11%
2	Potencia entregada	642.55 watts	746.0 watts
3	Número de revoluciones	4690 rpm	1762 rpm
4	Cantidad de elementos	14 discos	92 alabes
5	Distancia de separación	0.004 m entre discos	0.01m entre alabes

Nota. Estos datos fueron recopilados de las fuentes de tesis de Diseño de sistema de ciclo Rankine (M.

Chevarría M. & H. Chuchullo) y Microturbina vapor Tesla (W. Quispe Q. & C. A. Quiñonez D.).



Tabla2

Resumen de características de las turbinas a vapor

Criterio	Turbina tipo Tesla	Turbinas con alabes
Principio de funcionamiento	de Fricción viscosa y efecto de capa límite entre discos lisos	Expansión del vapor a través de álabes fijos y móviles
Complejidad del diseño	Requiere de un mecanizado simple (cortes de discos)	Compleja, requiere de mecanizados precisos y componentes aerodinámicos exactos (cortes de alabes)
Mantenimiento	Mantenimientos prolongados, por ausencia de álabes y diseño simple	Mantenimiento Frecuentes, por desgaste de álabes, oxidación y cavitación a causas de acumulación de fluidos en los alabes
Versatilidad de uso (Fluidos de trabajo)	Alta, adaptable a varios fluidos y contextos (Agua, vapor, aire, gases, incluso líquidos viscosos)	Limitada principalmente al sistema de diseño específico (vapor de agua)
Eficiencia en grandes potencias	Media, entre 40–60% en prototipos funcionales	Alta (mayor al 85% en plantas termoeléctricas)
Aplicaciones típicas	Laboratorios, descentralizada, educativos, entornos rurales	Plantas termoeléctricas, generación industrial, navales

Nota. Elaboración propia



3.2.3. *Impacto del diseño en el mantenimiento y durabilidad*

El diseño de mantenimiento de una turbina Tesla tiene un impacto significativo en su funcionamiento a largo plazo. Al carecer de álabes, uno de los principales beneficios de esta turbina es la reducción de los componentes mecánicos que requieren mantenimiento regular. En turbinas de álabes tradicionales, los problemas comunes incluyen la erosión y el desgaste de los álabes debido a la alta velocidad del fluido. En contraste, la turbina Tesla, al utilizar discos planos, experimenta menos desgaste mecánico, lo que se traduce en menores intervenciones de mantenimiento (Hunter & Bryant, 2020)

Uno de los aspectos más atractivos del diseño de mantenimiento es la facilidad de acceso a los componentes. Los discos de la turbina Tesla son fáciles de desmontar y reemplazar si es necesario, lo que reduce los costos y tiempos de mantenimiento.

El mantenimiento preventivo en la turbina Tesla generalmente implica inspecciones periódicas de los discos y del sistema de entrada de fluido para garantizar que no haya bloqueos o signos de desgaste inusual. Si se utiliza vapor de agua como fluido de trabajo, es esencial controlar la calidad del vapor para evitar la acumulación de minerales o la corrosión, lo que podría acortar la vida útil de los discos (Smith & Roberts, 2020).

La durabilidad de una turbina Tesla está directamente relacionada con los materiales utilizados en su construcción y las condiciones de operación. Como los discos de la turbina están expuestos a fricción constante con el fluido, el material de estos discos juega un papel crucial en la vida útil de la turbina. Materiales como el acero inoxidable o aleaciones de titanio, que resisten la corrosión y el desgaste, son comúnmente recomendados para la construcción de discos (Eldridge et al., 2019).

Otra consideración importante para la durabilidad es la temperatura y presión del fluido. Si la turbina opera con vapor de agua a alta presión y temperatura, los materiales de los discos deben ser capaces de soportar estas condiciones sin deformarse ni deteriorarse prematuramente.



Además, la durabilidad de la turbina Tesla también se ve afectada por la velocidad de rotación. Dado que la turbina opera a altas velocidades, es crucial que los discos sean lo suficientemente fuertes para resistir las fuerzas centrífugas. Una falla en este aspecto podría causar deformaciones o incluso la ruptura de los discos

Optimizar tanto el diseño de mantenimiento como la durabilidad de la turbina Tesla requiere un enfoque integral que considere el diseño de los componentes, la selección de materiales y las condiciones de operación.

Las investigaciones actuales sugieren que el uso de recubrimientos protectores en los discos puede extender significativamente su vida útil al reducir el desgaste por fricción y la corrosión

Otra estrategia para optimizar el mantenimiento es la implementación de sistemas de monitoreo en tiempo real que detecten cambios en la vibración o en la temperatura de los componentes clave. Estos sistemas pueden alertar sobre posibles fallos antes de que ocurran, lo que permite realizar un mantenimiento preventivo más eficiente y prolonga la vida útil de la turbina (Hunter & Bryant, 2020).

Por último, el diseño modular de la turbina Tesla facilita su mantenimiento y mejora su durabilidad. Los discos y otras piezas clave pueden ser reemplazados de manera individual sin tener que desmontar la turbina completa, lo que reduce significativamente el tiempo de inactividad y los costos asociados al mantenimiento.

3.2.4. *Análisis teórico de la turbina*

Para el diseño del rotor y demás componentes de la turbina, a continuación, se presentan las condiciones en las cuales estará sujeto el funcionamiento del dispositivo donde el fluido de trabajo es vapor de agua generado mediante una caldera para micro generación, así como la determinación de las dimensiones de la turbina con la capacidad de generar una potencia de 0.5 wW a partir del análisis del fluido utilizando el método del vórtice libre.



Figura 20. Partes del generador de vapor



Nota. Partes del generador para no tener inconvenientes al momento de realizar las pruebas de laboratorio.

- 7. Quemador.
- 8. Caja de interruptor de energía principal.
- 9. Manómetro.
- 10. Válvula de alivio.
- 11. Válvula de salida de vapor.
- 12. Válvula de ingreso de agua.
- 13. Bomba de agua.
- 14. Válvula de drenaje.
- 15. Válvula check.
- 16. Chimenea.
- 17. Tubería de alimentación de agua.
- 18. Hand Holle.

Figura 20. Partes de la planta térmica

Nota: Es importante conocer las partes de la planta térmica, para no tener inconvenientes al momento de realizar las pruebas de laboratorio.

- 19. tubería de vapor.
- 20. Válvula de ingreso de vapor a la turbina.
- 21. Tobera.
- 22. Chumacera.
- 23. Eje.
- 24. Rodamiento.
- 25. Faja.
- 26. Polea de la turbina.
- 27. Polea del alternador.
- 28. Alternador.
- 29. Tanque de condensados.
- 30. Tanque con salmuera o agua ablandada.



31. Tanque de agua.

3.2.5. Procedimiento de operación de la planta térmica.

Para comenzar con la operación de la planta térmica, asegurarse de que el tanque de combustible este lleno con al menos 3.5 galones de diésel para luego abrir la válvula principal de ingreso de agua a los tanques, para comenzar con el tratamiento de agua.

Figura 21. Tanque de combustible y válvula principal de agua



Nota: Para el abastecimiento de agua al tanque de ablandamiento, condensado y generador debemos aperturar la válvula principal de agua y que el tanque de combustible este abastecido por lo menos $\frac{1}{2}$ tanque de combustible.

En el tanque de la salmuera se almacena una solución altamente concentrada de sal, o se puede utilizar potasio como una alternativa libre de sal. Este procedimiento es una técnica que se utiliza en el proceso de ablandamiento que pasa el agua para la eliminación de los iones que hacen que el agua sea dura, seguidamente, procedemos a llenar el tanque de condensado como mínimo hasta los $\frac{3}{4}$ de su volumen total antes de encender el tablero de control del generador de vapor, para no tener inconvenientes en el abastecimiento de agua al generador de vapor mientras este se va llenando.



3.3. Diseño térmico de la Turbina de vapor tipo Tesla

3.3.1. Diseño de componentes

Para el diseño de la Turbina Tesla se consideraron parámetros que permitirán alcanzar el desarrollo de diseño del rotor, eje y demás componentes que integran.

Para este proyecto el factor importante es la cantidad de flujo másico que es generado por la caldera de 10 BHP a partir de este parámetro encontraremos el camino para el diseño térmico y mecánico.

Tabla 3

Parámetros para el diseño de la Turbina Tesla.

Flujo másico	0.043 Kg/s
Presión	340 Kpa
Temperatura	138 °C

Nota. Esta tabla nos muestra valores para el diseño. Fuente: *Chevarria Moscoso & Chuchullo Laucata, 2005.*

Tabla 4

Datos de la tobera de la Turbina Tesla

Diámetro en la entrada de la tobera	1.07 cm
Diámetro en la salida de la tobera	1.25 cm
Longitud de la tobera desde la entrada hasta la salida	4 cm

Nota. Dimensiones de la tobera Fuente: *Chevarria Moscoso & Chuchullo Laucata, 2005*



3.3.1.1. Flujo másico (\dot{m})

El flujo másico representa a la masa de vapor que pasa a través de un sistema por unidad de tiempo. A partir de la caldera de 10 BHP que genera un flujo másico cuya finalidad es importante para el inicio del diseño.

$$\dot{m} = 0.043 \frac{Kg}{s}$$

3.3.1.2. Caudal volumétrico (Q)

El caudal másico de vapor saturado a través de la tubería está en función de la densidad y la velocidad.

$$Q = \frac{\dot{m}}{\rho} \quad (3.1)$$

\dot{m} : Es el flujo másico $\left(\frac{Kg}{s}\right) = 0.043 \left(\frac{Kg}{s}\right)$

ρ : Es la densidad $\left(\frac{Kg}{m^3}\right) = 1.86 \left(\frac{Kg}{m^3}\right)$ de acuerdo a los valores de la tabla 3

Q : es el caudal volumétrico $\left(\frac{m^3}{s}\right)$

$$Q = \frac{0.043 \frac{Kg}{s}}{1.86 \frac{Kg}{m^3}}$$

$$Q = 0.023 \frac{m^3}{s}$$



Tabla 5

Propiedades del vapor de agua

°C	Temp. absoluta (bar)	Presión absoluta (bar)	Entalpía específica (kWh/kg)	Densidad (kg/m ³)	Volumen específico (m ³ /kg)	Viscosidad dinámica (cP 10 ⁻³)	Visc cinemática 10 ⁻⁶)
137	3.32	3.32	0.758202	1.814673	0.551064	0.013543	7.46
138	3.42	3.42	0.758567	1.864195	0.536425	0.013578	7.28
139	3.51	3.51	0.758930	1.914796	0.522249	0.013612	7.10
140	3.62	3.62	0.759290	1.966494	0.508519	0.013647	6.93
141	3.72	3.72	0.759648	2.019307	0.495220	0.013681	6.77
142	3.82	3.82	0.760003	2.073251	0.482334	0.013716	6.61
143	3.93	3.93	0.760356	2.128345	0.469849	0.013750	6.46
144	4.04	4.04	0.760707	2.184608	0.457748	0.013785	6.30
145	4.16	4.16	0.761055	2.242057	0.446019	0.013819	6.16
146	4.27	4.27	0.761400	2.300711	0.434648	0.013854	6.02

Nota. Tablas de vapor

3.3.1.3. Velocidad del vapor de agua (*V*)

La velocidad del vapor de agua se puede medir a partir del caudal y el área de la tubería.

$$V = \frac{Q}{A} \quad (3.2)$$

Q: Es el caudal volumétrico ($\frac{m^3}{s}$) = 0.023 ($\frac{m^3}{s}$)



D: Diámetro de la tubería (m) = 3/4 plg. = (0.01905)

V: Velocidad ($\frac{m}{s}$)

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

$$V = \frac{0.023 \frac{m^3}{s}}{\frac{\pi}{4} \times (0.01905m)^2} \quad V = 29.20 \frac{m}{s}$$

3.3.1.4. Determinación del tipo de fluido

El número de Reynolds se calcula a partir de la velocidad del vapor, las dimensiones características del sistema (como el espesor de los discos o la distancia entre ellos) y las propiedades termodinámicas del vapor, específicamente su viscosidad dinámica y densidad según indica (Çengel & Boles, 2015). De acuerdo a la tabla 5 tenemos los valores de la densidad y la viscosidad dinámica.

ρ : Es la densidad ($\frac{Kg}{m^3}$) = 1.86 ($\frac{Kg}{m^3}$)

V: Es la velocidad ($\frac{m}{s}$) = 29.20 ($\frac{m}{s}$)

b: Es la separación entre discos (m) = (0.0004 m)

μ : Es la viscosidad dinámica ($\frac{Kg \cdot s}{m \cdot s^2}$) = 1.3578×10^{-5} ($\frac{Kg \cdot s}{m \cdot s^2}$)

R_e : Numero de Reynolds

$$R_e = \frac{4\rho * V * b}{3 * \mu}$$

$$R_e = \frac{4 * 1.86 \frac{Kg}{m^3} * 29.20 \frac{m}{s} * 0.0004 m}{3 * 1.3578 * 10^{-5} \frac{Kg \cdot s}{m \cdot s^2}} \quad R_e = 2133.31$$

Al determinar el valor de numero de Reynolds 2133.31 el flujo es completamente laminar.



3.3.1.5. Espacio entre los discos (b)

El espaciado adecuado entre los discos es crítico para optimizar la fricción viscosa y maximizar la transferencia de energía del fluido a los discos según define Miller (2007) y Hamish Edgar (Foo et al., 2010, p. 673).

El espaciado entre los discos de la Turbina Tesla está dado por la siguiente ecuación.

$$e_i = \pi * \sqrt{\frac{v}{\omega}} \quad (3.3)$$

El espacio entre discos se estableció en 0.4 mm, valor que se considera óptimo para maximizar la fricción viscosa sin incrementar pérdidas, tal como indica Miller (2007). De la ecuación 3.3 se determina la velocidad angular.

$$\omega = \left(\frac{\pi * \sqrt{v}}{e_i} \right)^2$$

v : Es la viscosidad cinemática ($\frac{m^2}{s}$) = $7.28 * 10^{-6}$ ($\frac{m^2}{s}$)

e_i : Espacio entre los discos (m) = 0.0004 (m)

ω : Velocidad angular ($\frac{rad}{s}$)

$$\omega = \left(\frac{\pi * \sqrt{7.28 * 10^{-6}}}{0.0004} \right)^2 \quad \omega = 449.27 \frac{rad}{s}$$

3.3.1.6. Radio externo (r_e)

Según Anderson (2010) Diseño y eficiencia en turbinas modernas. El radio externo de los discos se calcula con la siguiente expresión:

$$e_1 = 0.526 * r_o * \left(\frac{v}{(r_o)^2 * \omega} \right)^{\frac{1}{5}} \quad (3.4)$$



$$r_{ext.} = \sqrt[5]{\left(\frac{e_i}{0.526} \times \left(\frac{\omega}{\nu}\right)^{\frac{1}{5}}\right)^3}$$

e_i : Espacio entre los discos (m) = 0.0004 (m)

ν : Viscosidad cinemática ($\frac{m^2}{s}$) = $7.28 * 10^{-6}$ ($\frac{m^2}{s}$)

ω : Velocidad angular ($\frac{rad}{s}$) = 449.27 ($\frac{rad}{s}$)

$r_{ext.}$: Radio externo (m)

$$r_{ext.} = \sqrt[5]{\left(\frac{0.0004 \text{ m}}{0.526} * \left(\frac{449.27 \frac{rad}{s}}{7.28 * 10^{-6} \frac{m^2}{s}}\right)^{\frac{1}{5}}\right)^3} \quad r_{ext.} = 0.115 \text{ m}$$

Por lo tanto, el diámetro externo de los discos será: $D_{ext.} = 0.23 \text{ m}$

Un diámetro relativamente extenso provee de torque, en cambio entre más pequeño aumenta la velocidad angular en el eje.

3.3.1.7. Radio interno (r_i)

El radio interno de los discos está dado por la ecuación (8): Según Anderson (2010)

$$r_{ext.} \geq 2.5r_{int} \quad (3.5)$$

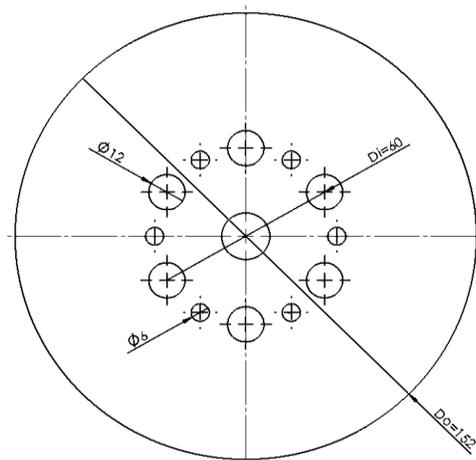
$$r_{int.} = \frac{r_{ext.}}{2.5} \quad r_{int} = \frac{0.115}{2.5} \quad r_{int.} = 0.046 \text{ m}$$



Entonces diámetro interno de los discos será: $D_{int.} = 0.092 \text{ m}$

El radio interno de los disco es donde se encuentran ubicados las perforaciones de 12 mm y 6 mm basadas en el modelo de optimización por J.Mendoza las cuales tienen la función del escape del fluido en el rotor.

Figura 22. Radio interno de los discos.



Nota. Elaboración propia

3.3.1.8. Número de discos

El número de discos afecta la capacidad total de transferencia de energía, aumentando el torque y la potencia generada, siempre que el espacio entre ellos sea óptimo según Lundin (2011). Por lo que se tiene la siguiente expresión:

$$Q = \frac{0.16 * n * v * D_{ext.}^2}{e_i}$$

$$n = \frac{Q * e_i}{0.16 * v * D_{ext.}^2}$$



Q: Es el caudal volumétrico ($\frac{m^3}{s}$) = 0.023 ($\frac{m^3}{s}$)

e_i : Es el espacio entre los discos (m) = 0.0004 m

ν : Es la viscosidad cinemática del vapor ($\frac{m^2}{s}$) = 7.28×10^{-6} ($\frac{m^2}{s}$)

$D_{ext.}^2$: Diámetro externo (m) = 0.023 m

$$n = \frac{0.023 \frac{m^3}{s} * 0.0004 m}{0.16 * 7.28 * 10^{-6} \frac{m^2}{s} * 0.23^2 m^2}$$

$$n = 14$$

Por lo tanto, el número de discos es 14, y el número total de espacio entre los discos es igual (n-1) entonces el espacio entre los discos es igual a 13.

Tabla 6

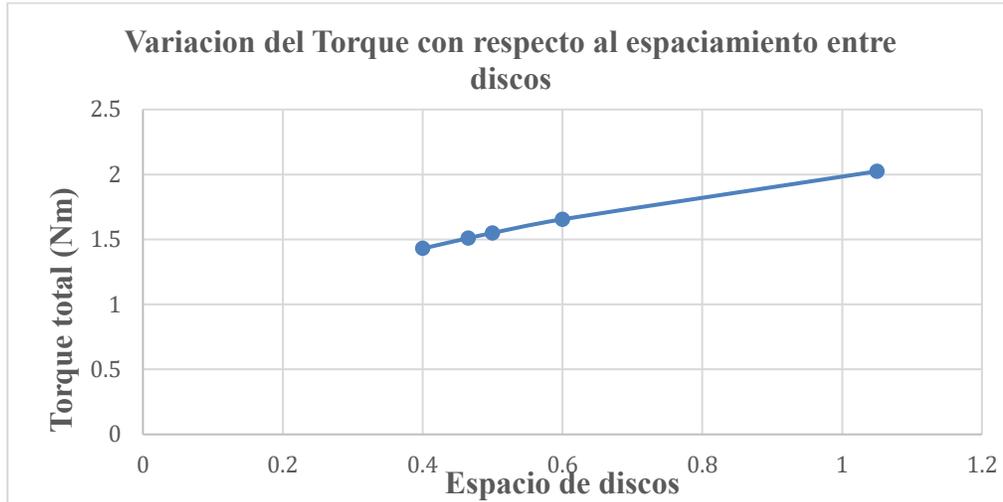
Condiciones de trabajo para el flujo entre discos

Espaciamento en discos (mm)	Diámetro (mm)	Velocidad angular (rad/s)	Torque total (N.m)
b1	1.05	327.62	2.02
b2	0.60	267.84	1.65
b3	0.50	250.83	1.54
b4	0.46	244.36	1.50
b5	0.40	231.47	1.43

Nota. Elaboración propia

Para el análisis se consideraron diferentes valores de espacio entre los discos (b) 1.05-0.4 y diferente rango de radios de 163.8-115mm un rotor constituido por 14 discos en la tabla 6. Muestra de manera gráfica el comportamiento que presenta el conjunto de discos por cada valor de b.

Figura 23. Relación del torque con respecto al radio para diferentes valores de b



Nota. Elaboración propia

Del análisis anterior se concluye lo siguiente: El espaciamiento entre discos depende de las propiedades del fluido de trabajo y la velocidad angular del sistema, por lo tanto, para que exista una mayor transferencia de energía el perfil de velocidad del fluido debe ser laminar y completamente desarrollado manteniendo una velocidad angular variable en la turbina que permita mantener la capa limite. Conforme la distancia entre discos se incrementa el valor del torque incrementa en cambio si el valor del torque disminuye el espaciamiento entre discos se reduce, esto quiere decir que entre más separados estén los discos más difíciles es mantener un perfil de velocidad completamente desarrollado.

3.3.1.9. Torque en el eje de la turbina mediante el método del vórtice libre

Para determinar el valor del torque producido por el fluido se necesita el valor de la velocidad tangencial con la que impacta al fluido. Este torque se debe al vórtice producido por el fluido en las paredes del disco, por lo que se puede decir que el torque es generado por un solo disco (González, 2020, p. 37).

$$T = \left(\frac{6 * \mu * V_t * r(r_e^2 - r_i^2)}{b} \right) * 2 \quad (3.6)$$



μ : Viscosidad dinámica del vapor $\left(\frac{Kg.s}{m.s^2}\right) = 1.3578 \times 10^{-5} \left(\frac{Kg.s}{m.s^2}\right)$

V_{θ} : Velocidad tangencia $\left(\frac{m}{s}\right)$

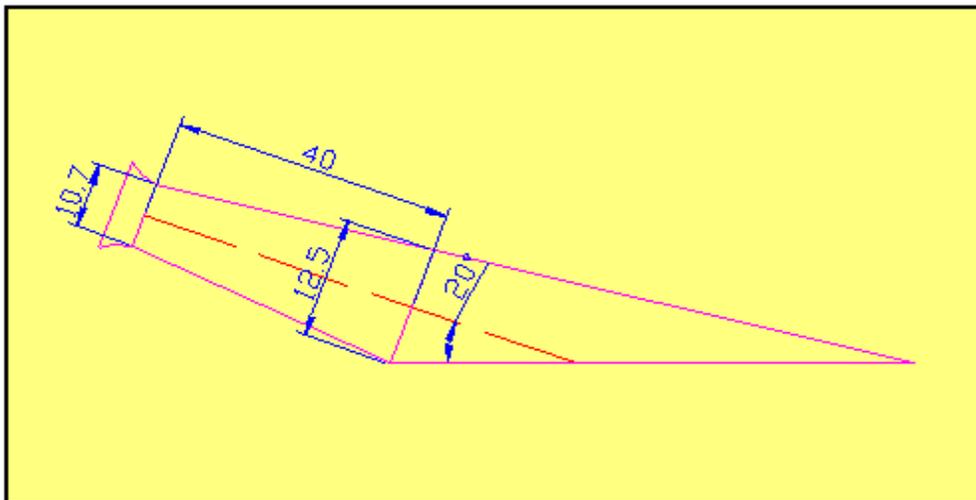
r_o : Radio externo (m) = 0.23 (m)

e_i : Espacio entre los discos = (0.0004 m)

Según (Chevarria Moscoso & Chuchullo Laucata, 2005). El diámetro de la garganta es 1.07 cm; la salida de la tobera, 1.25 cm; y la longitud desde la garganta hasta la salida, 4 cm.

Estos valores cumplen para determinar las velocidades de entrada y salida del vapor agua.

Figura 24. Diámetro de entrada y salida de la tobera



Nota. Dimensiones de la tobera Fuente: Chevarria Moscoso & Chuchullo Laucata, 2005

Con el diámetro de entrada de la tobera (1.07 cm) (0.0107 m), se puede determinar la velocidad de entrada de la tobera y se halla con la siguiente expresión.

$$V_e = \frac{Q}{\frac{\pi}{4} D_e^2} \quad V_e = \frac{0.023 \frac{m^3}{s}}{\frac{\pi}{4} (0.0107)^2 m^2} \quad V_e = 257.10 \frac{m}{s}$$



Con el diámetro de salida de la tobera (1.25 cm) (0.0125 m), se puede determinar la velocidad de salida de la tobera y se halla con la siguiente expresión.

$$V_s = \frac{Q}{\frac{\pi}{4} D_s^2} \quad V_s = \frac{0.023 \frac{m^3}{s}}{\frac{\pi}{4} (0.0125)^2 m^2} \quad V_s = 188.38 \frac{m}{s}$$

Con la velocidad de salida se determina la velocidad tangencial dada por la siguiente expresión.

El ángulo de inclinación es de 20° según Chevarria Moscoso & Chuchullo Laucata, 2005

$$V_t = V_s * \cos(\alpha)$$

$$V_t = 188.38 * \cos(20)$$

$$V_t = 181.97 \frac{m}{s}$$

Por lo tanto, el torque en el eje de la turbina es.

$$T = \frac{6 * 1.358 * 10^{-5} Pa.s * 181.97 \frac{m}{s} * 0.1115 (0.115^2 - 0.046^2) m^3}{0.0004 m} * 2$$

$$T = 0.096 N.m$$

El torque total que actúa en el eje de la turbina será multiplicado el número total de discos.

$$T_T = n * T$$

$$T_T = 14 * 0.096 N.m$$

$$T_T = 1.43 N.m$$

3.3.1.10. *Potencia en el eje de la turbina*

La potencia generada por una microturbina Tesla depende de la combinación de la presión del fluido, el número de discos, el radio de los discos y la velocidad angular del rotor según indica (Kim H, 2013).



$$Pot = T_T * \omega \quad (3.8)$$

$$Pot = 1.43 \text{ N.m} * 449.27 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

$$Pot = 642.55 \text{ Watt}$$

3.4. Eficiencia de la turbina de vapor tipo Tesla

La eficiencia térmica de una turbina se define como la relación entre la potencia mecánica útil generada y la energía térmica proporcionada por el vapor de entrada. En el caso específico de la turbina tipo Tesla, la eficiencia se ve afectada principalmente por la pérdida de energía debida a la fricción interna del vapor con los discos, la dispersión del flujo, y las pérdidas mecánicas en los componentes giratorios según indica (Kestin, 1978)

Uno de los retos principales en la eficiencia de estas turbinas es el manejo del flujo de vapor: la adherencia del vapor a los discos debe ser máxima para transferir la mayor cantidad de energía posible. Sin embargo, la naturaleza viscosa del vapor genera resistencia al movimiento, provocando pérdidas por fricción según indica (Akella & Prasad, 2013). Además, la ausencia de álabes guía provoca que el diseño sea sensible a las condiciones de presión y velocidad del vapor, lo que limita la eficiencia en rangos operativos estrechos.

La eficiencia también depende del correcto diseño del espacio entre discos y del número de discos, que afectan directamente la superficie de contacto con el vapor y la capacidad de convertir la energía cinética en rotación según (Akella & Prasad, 2013).

$$n_t = \frac{P_{me}}{\dot{m}(h_1 - h_2)}$$

Donde:

\dot{m} : Flujo masico



h_1 : Entalpia de vapor en la entrada

h_2 : Entalpia real en la salida

$s_1 = s_2$: Entalpia ideal (salida isoentrpico)

Condiciones a la entrada de la turbina Tesla.

Presión de entrada $P_1 = 700$ Kpa

Temperatura de entrada $T_1 = 168$ °C

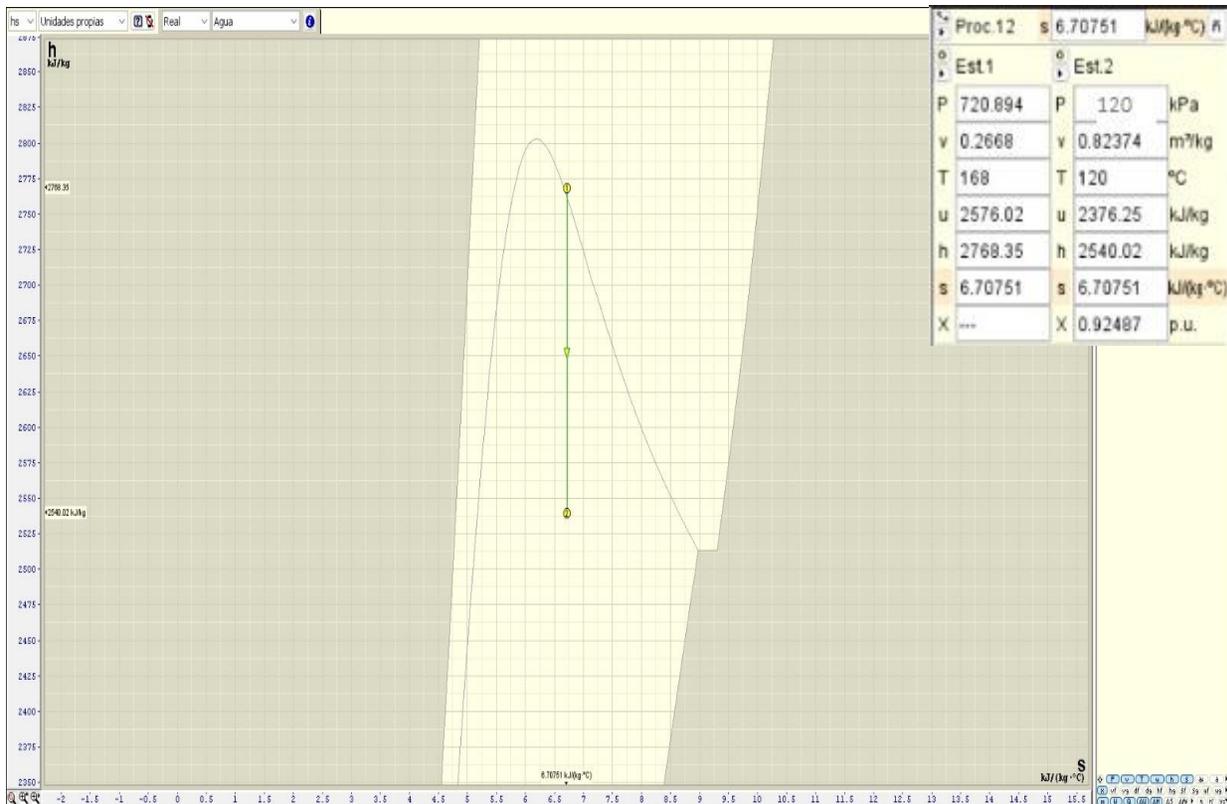
Flujo masico $\dot{m} = 0.043$ Kg/s

Para determinar la eficiencia de la microturbina de vapor tipo Tesla se considera las propiedades de vapor agua a la entrada y salida de la turbina. Para tomar los valores de la entalpia y entropía a la temperatura de 168 °C es mayor que la temperatura de saturación por ende el vapor de agua es sobrecalentado.

Para una presión $P_1 = 700$ Kpa y temperatura $T = 168$ °C se tiene una entalpia $h_1 = 2768.35$ KJ/Kg y una entropía de $s_1 = 6.707$ KJ/Kg K de acuerdo a la figura 26



Figura 25. Diagrama de Mollier Entalpia y Entropía



Nota. Elaboración propia

La presión de salida en la turbina es $P = 120$ Kpa

El proceso del punto 1 a 2 es isoentrópico por lo que la entropía de entrada es igual a la entropía de salida $s_1 = s_2 = 6.707$, en el punto 2 existe una mezcla (liquido vapor) de acuerdo a la figura 26 (Termograf) la entalpia $h_2 = 2540.02 \frac{Kj}{Kg}$ y una temperatura $T_2 = 120$ °C

Por lo tanto, la eficiencia en el eje de la Turbina de vapor tipo Tesla será de:

$$n_t = \frac{P_{me}}{\dot{m}(h_1 - h_2)}$$



$$n_t = \frac{0.642 \text{ Kwaat}}{0.043 * \frac{Kg}{s} (2768.35 - 2540.02) \frac{Kj}{Kg}}$$
$$n_t = 7\%$$

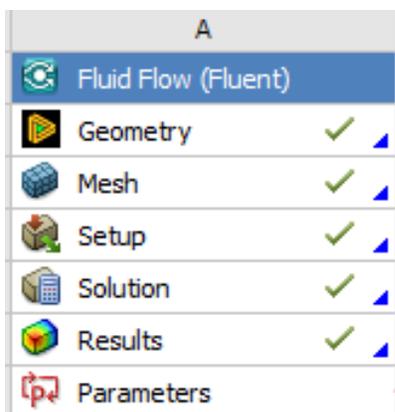
3.5. Simulación computacional

Para la simulación, se utilizó la suite ANSYS 2024 R2 versión Estudiante. Se escogió esta herramienta, ya que brindaba la posibilidad de hacer simulaciones Dinámicas de Fluido Computacional (Computational Fluid Dynamics, CFD, en inglés) de manera gratuita.

Para una simulación mejor estructurada, se usó el Workbench con el sistema de análisis Fluid Flow (Fluent). La estructura fue la siguiente:

1. Geometry: Diseño CAD
2. Mesh: Enmallado del fluido
3. Setup: Configuración de la simulación
4. Solution: Simulación
5. Results: Resultados de simulación del fluido
6. Parameters: Parámetros de salida

Figura 26. Estructura del analisis Fluid Flow (Fluent)



Nota. Elaboración propia.



Las limitaciones de la versión Estudiante, como el límite en el número de celdas de la malla y la restricción en el uso de ciertos modelos avanzados, serán discutidas más adelante en este documento. Sin embargo, a pesar de estas limitaciones, la versión utilizada fue suficiente para cumplir con los objetivos del estudio.

3.5.1. Geometría

El diseño de la geometría de la turbina Tesla se realizó utilizando herramientas de diseño asistido por computadora (CAD, por sus siglas en inglés). Como se mencionó en el Capítulo 1, la turbina Tesla es un tipo de turbina de fluido que utiliza el efecto de capa límite para convertir la energía cinética de un fluido en movimiento rotacional. A diferencia de las turbinas tradicionales, que emplean álabes o paletas, la turbina Tesla está compuesta por un conjunto de discos lisos y paralelos montados sobre un eje central.

3.5.2. Diseño de la turbina Tesla

La geometría de la turbina se compone de los siguientes elementos principales:

- **Discos:** Se diseñaron 14 discos lisos y delgados, los cuales están dispuestos en paralelo y separados por una pequeña distancia para permitir el flujo del fluido entre ellos. Estos discos están fabricados con un material resistente a las condiciones de operación, como acero inoxidable o aluminio.
- **Eje central:** Los discos están montados sobre un eje cilíndrico que transmite el movimiento rotacional generado por el fluido. El eje está diseñado para garantizar una conexión rígida y precisa con los discos.
- **Carcasa:** La turbina está encapsulada en una carcasa cilíndrica que guía el flujo del fluido hacia los discos y controla la presión dentro del sistema. La carcasa incluye puertos de entrada y salida para el fluido.

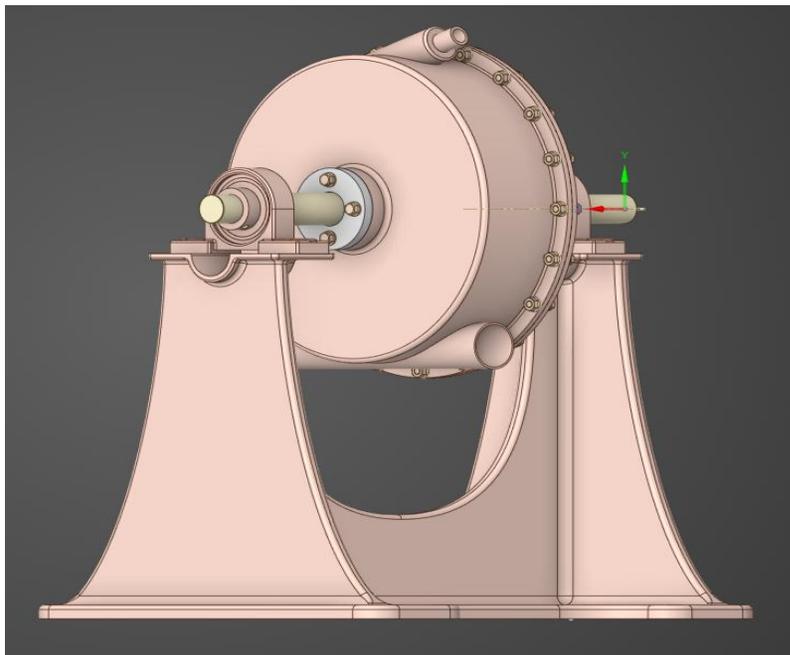
3.5.3. Configuración de la polea y los soportes

A través del eje central de la turbina Tesla se acopló una polea, la cual está diseñada para transmitir el movimiento rotacional a otros componentes del sistema. La polea está montada en el centro del eje y se asegura mediante un mecanismo de fijación que evita deslizamientos durante la operación.

Cada extremo de la polea está conectado a un soporte, el cual cumple las siguientes funciones:

- Soportes laterales: Los soportes están diseñados para mantener la alineación y estabilidad de la polea durante la rotación. Están fabricados con un material rígido y resistente a las vibraciones, como acero o aleaciones de aluminio.
- Fijación al eje: Los soportes están unidos al eje central mediante rodamientos, lo que permite un movimiento suave y reduce la fricción.
- Base de anclaje: Los soportes están fijados a una base sólida que garantiza la estabilidad del conjunto turbina-polea durante la operación.

Figura 27. Vista de perfil diagonal del diseño CAD que muestra la turbina Tesla, las poleas y el soporte de fijación.



Nota. Elaboración propia.



3.5.4. *Consideraciones de diseño*

Durante el diseño CAD, se tuvieron en cuenta los siguientes aspectos:

- Precisión dimensional: Se aseguró que las dimensiones físicas de los discos sean iguales a las calculadas en el Capítulo 3: Diseño.
- Optimización del flujo: La geometría de la carcasa y la disposición de los discos se optimizaron para maximizar la eficiencia del flujo del fluido y minimizar las pérdidas por fricción.
- Compatibilidad de materiales: Se seleccionaron materiales compatibles con las condiciones de operación, como la resistencia a la corrosión y la temperatura.

3.5.5. *Enmallado*

El proceso de mallado es una etapa crítica en la simulación de dinámica de fluidos computacional (CFD), ya que determina la precisión de los resultados y el tiempo de cálculo requerido. Para este estudio, se generó una malla computacional utilizando el módulo ANSYS Meshing, el cual permite crear una discretización eficiente del dominio fluido alrededor de la turbina Tesla, la polea y los soportes.

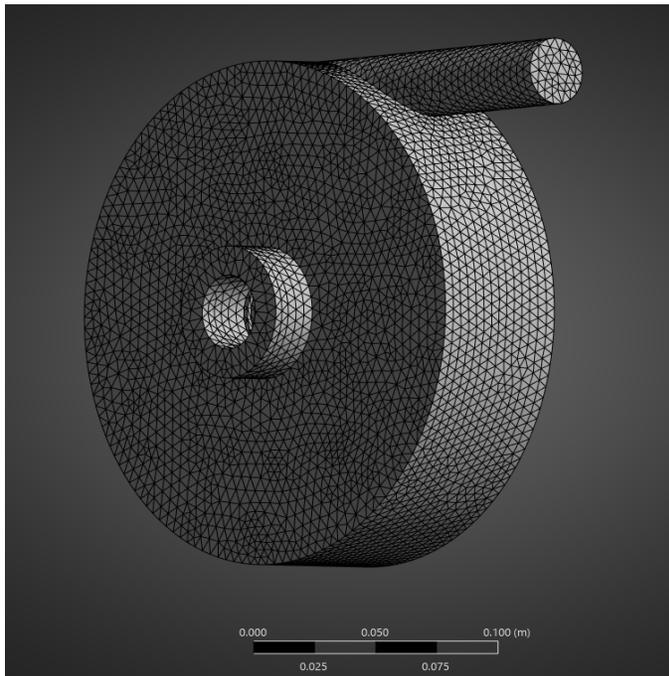
3.5.5.1. *Configuración de enmallado*

Se definió un dominio fluido que engloba la turbina Tesla, la polea y los soportes. Este dominio incluye las regiones donde el fluido interactúa con los componentes sólidos, como los espacios entre los discos de la turbina y los alrededores de la polea.

- Tamaño de la malla: Debido a la limitación de la versión Estudiante de ANSYS, que restringe el número a 1,048,576 celdas, se tuvo que utilizar un Sizing con un Element Size prudente para los bordes especialmente. Esto permitió reducir el número total de celdas sin comprometer excesivamente la precisión en las áreas críticas.
- Refinamiento local: Para garantizar la precisión en las zonas de mayor interés, como los espacios entre los discos de la turbina y las regiones cercanas a la polea, se aplicó un refinamiento local. Esto permitió capturar los gradientes de flujo y los efectos de capa límite con mayor detalle.

- Control de crecimiento: Se configuró un crecimiento gradual del tamaño de la malla desde las regiones refinadas hacia las zonas menos críticas. Esto ayudó a mantener un equilibrio entre la precisión y el número total de celdas.

Figura 28. Enmallado del fluido. Se aprecia que el enmallado en los bordes fue redimensionado para no superar el límite de la versión Estudiante.



Nota. Elaboración propia.

3.5.5.2. Calidad de la malla

Para garantizar la fiabilidad de los resultados, se evaluó la calidad de la malla utilizando métricas como:

- Aspect Ratio: Se aseguró que la relación de aspecto de las celdas estuviera dentro de un rango aceptable (idealmente cercano a 1).



- Skewness: Se verificó que la distorsión de las celdas fuera mínima, especialmente en las regiones refinadas.
- Orthogonal Quality: Se comprobó que la ortogonalidad de la malla fuera adecuada para evitar errores numéricos durante la simulación.

3.5.5.3. Optimización del enmallado

Dentro de las limitaciones de la versión Estudiante, se optimizó el mallado para lograr un equilibrio entre la precisión y el rendimiento computacional. Esto incluyó:

- Reducir el número de celdas en áreas donde los gradientes de flujo eran menos pronunciados.
- Aplicar refinamiento local en zonas críticas, como los espacios entre los discos y las regiones cercanas a la polea.
- Utilizar una malla estructurada en áreas simples y una malla no estructurada en geometrías complejas para maximizar la eficiencia.

3.5.6. Configuración y solución

La configuración de la simulación es una etapa crucial para garantizar que los resultados obtenidos sean precisos y representativos del comportamiento real del sistema. En este estudio, se utilizó el módulo ANSYS Fluent para configurar y resolver el modelo de dinámica de fluidos computacional (CFD) de la turbina Tesla. A continuación, se describen los principales aspectos de la configuración.

3.5.6.1. Modelos físicos

- Tipo de Solución:
 - Se seleccionó un modelo transitorio para capturar la dinámica del flujo a lo largo del tiempo, ya que el comportamiento de la turbina Tesla depende de la interacción temporal del fluido con los discos.



- Se utilizó un enfoque basado en presión (Pressure-Based), el cual es adecuado para flujos incompresibles o de baja compresibilidad como el vapor de agua.
- Modelo de Turbulencia:
 - Dado que el flujo en la turbina Tesla es altamente turbulento, se empleó el modelo k-ε estándar (Standard k-epsilon). Este modelo es ampliamente utilizado en aplicaciones industriales y proporciona un equilibrio entre precisión y coste computacional.
 - Se activó la opción de paredes estándar (Standard Wall Functions) para modelar el comportamiento del flujo cerca de las superficies sólidas.
- Transferencia de Calor:
 - Dado que la simulación se enfocó en el comportamiento hidrodinámico de la turbina, se desactivó la transferencia de calor. Sin embargo, si fuera necesario, el modelo de energía podría haberse activado para incluir efectos térmicos.
- Viscosidad del Fluido:
 - Se definió el fluido como vapor de agua, con propiedades constantes como densidad y viscosidad dinámica.

3.5.7. *Condiciones de frontera*

- Entrada del Fluido (Inlet):
 - Se configuró una condición de frontera de velocidad de entrada (Velocity Inlet), donde se especificó la magnitud y dirección del flujo. La velocidad se definió en función de los parámetros operativos de la turbina.
 - Se aplicó un perfil de turbulencia de 5% basado en la intensidad de turbulencia y el diámetro hidráulico.
- Salida del Fluido (Outlet):



- Se utilizó una condición de frontera de presión de salida (Pressure Outlet), con una presión relativa de 0 Pa (atmosférica). Esto permitió que el fluido saliera del dominio sin restricciones adicionales.
- Paredes (Walls):
 - Todas las superficies sólidas, como los discos de la turbina, la polea y los soportes, se configuraron como paredes estacionarias (Stationary Walls).
 - Se aplicó una condición de no deslizamiento (No-Slip) para modelar la interacción del fluido con las superficies sólidas.

3.5.8. *Métodos numéricos*

- Esquemas de Discretización:
 - Para la discretización de las ecuaciones de conservación, se utilizaron los siguientes esquemas:
 - ❖ Presión: Esquema Segundo Orden (Second Order), el cual es adecuado para flujos con altos gradientes de presión.
 - ❖ Momentum y Turbulencia: Esquema Segundo Orden (Second Order Upwind) y Primer Orden (First Order Upwind) para mayor precisión respectivamente.
- Algoritmo de Acoplamiento Presión-Velocidad:
 - Se utilizó el algoritmo Acoplado (Coupled), el cual es ampliamente utilizado en simulaciones de flujos incompresibles.

3.5.9. *Iniciación y tiempo de simulación*

- Inicialización:
 - Se utilizó una inicialización híbrida, combinando una inicialización estándar con una interpolación desde condiciones de frontera.
- Paso de Tiempo y Duración:
 - Se definió un paso de tiempo de 1 segundo para capturar adecuadamente la dinámica del flujo.



- La simulación se ejecutó durante un tiempo total suficiente para alcanzar un estado estable o cuasi-estable en las variables de interés.

3.5.10. Iniciación y tiempo de simulación

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas para la turbina Tesla de 14 discos. Se analizaron dos casos principales:

1. Variación de velocidad: Se simuló el comportamiento de la turbina manteniendo una temperatura constante de 300 Kelvin y variando la velocidad del fluido.
2. Variación de temperatura: Se simuló el comportamiento de la turbina manteniendo una velocidad constante de 100 m/s y variando la temperatura del fluido.
3. Variación de discos: Se simuló la turbina con 10 y 12 discos para analizar la variación de torque.

Los resultados se analizaron en términos de la eficiencia de la turbina, la distribución de presión, la velocidad del fluido y los efectos térmicos (en el caso de la variación de temperatura). A continuación, se describen los hallazgos más relevantes.

3.5.11. Variación de velocidad (Temperatura de ambiente: 300 K)

En este caso, se estudió el efecto de la velocidad del fluido en el rendimiento de la turbina. Las velocidades analizadas variaron en un rango de 0.5 m/s a 150 m/s.

Distribución de Velocidad

- Se observó que, a mayores velocidades de entrada, el fluido generaba un mayor momento angular en los discos de la turbina, lo que resultaba en un mayor torque.
- La distribución de velocidad en los espacios entre los discos mostró un perfil típico de flujo de capa límite, con velocidades más altas cerca de los discos y una región central con menor velocidad.

Distribución de Presión

- La presión en la entrada de la turbina aumentó proporcionalmente con la velocidad del fluido, mientras que en la salida se mantuvo cercana a la presión atmosférica.

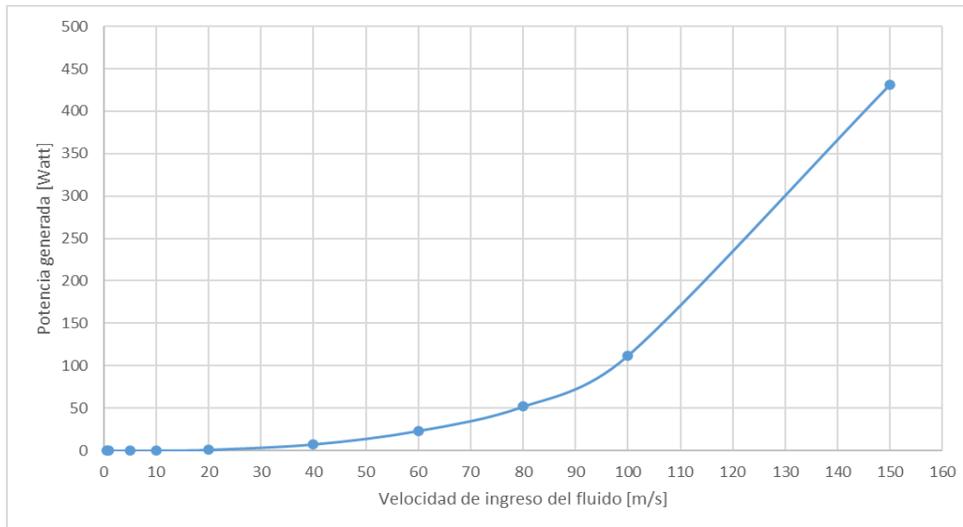


- Se identificaron zonas de baja presión cerca de los bordes de los discos, lo que indica la formación de vórtices y la presencia de efectos de cavitación en ciertos casos.
- Adicionalmente, la eficiencia al momento del máximo valor de potencia (431.62W) fue de 9.13%.

*Tabla 7**Resultados de variación de la velocidad de ingreso del fluido*

Velocidad del fluido [m/s]	Torque [Nm]	Potencia generada [W]
0.5	0.00000428	0.000021
1	0.00001701	0.000170
5	0.00040604	0.020302
10	0.00142186	0.142186
20	0.00521665	1.043329
40	0.01875966	7.503866
60	0.03881995	23.291971
80	0.06495592	51.964736
100	0.11211269	112.112690
150	0.28774600	431.619000

Nota. Elaboración propia.

**Figura 29. Potencia generada con una variación de la velocidad de ingreso del fluido.****Temperatura 300K - 26°C (temperatura ambiente)**

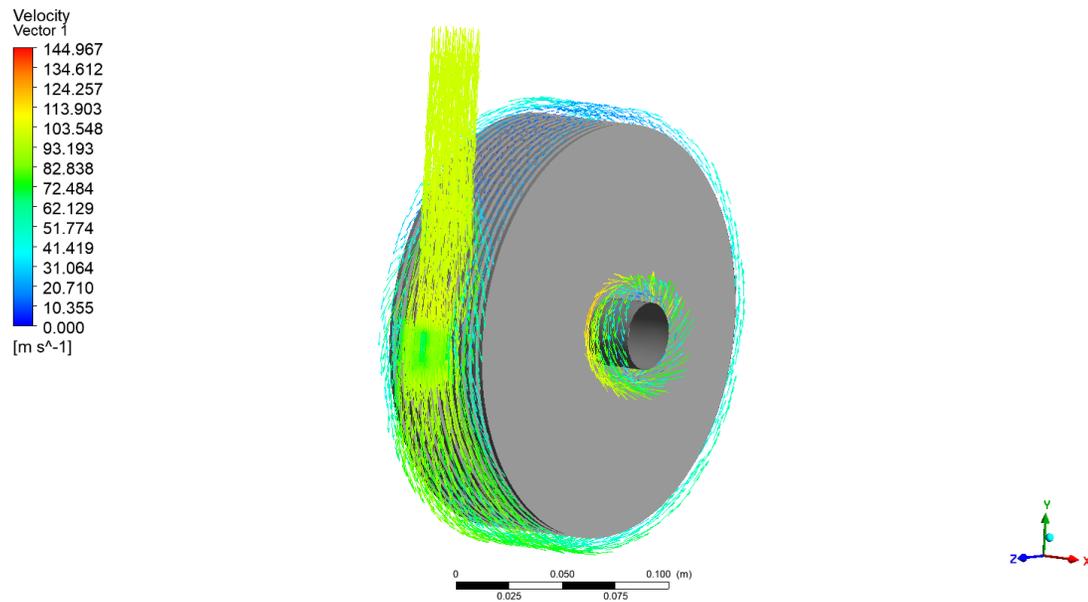
Nota. Elaboración propia.

3.5.12. Variación de velocidad (Temperatura de ambiente: 300 K)

En este caso, se estudió el efecto de la temperatura del fluido en el rendimiento de la turbina. Las temperaturas analizadas variaron en un rango de 300 Kelvin (temperatura ambiente) a 600 Kelvin (325 °C).

Distribución de Temperatura

- Se observó que a mayores temperaturas se obtiene un flujo más laminar y una menor resistencia al movimiento de los discos.
- La velocidad del fluido es mayor en los bordes de los discos que en el centro de estos.

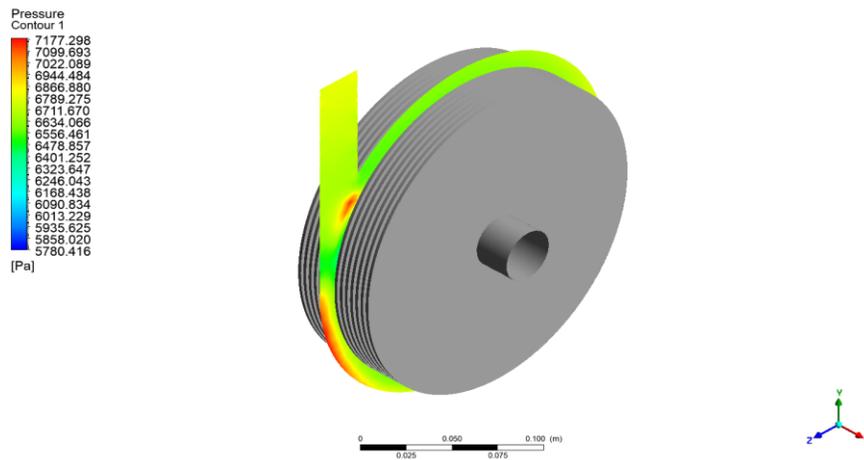
Figura 30. Distribución del vapor de agua. Mapa de calor de la velocidad del fluido.

Nota. Elaboración propia.

Efectos en la Presión y Velocidad

- La presión en la entrada de la turbina mostró una dependencia directa con la temperatura, debido a los cambios en la densidad del fluido.
- La velocidad del fluido en los espacios entre los discos se mantuvo constante, ya que la velocidad de entrada fue fija. Sin embargo, se observó una ligera variación en la distribución de velocidad debido a los cambios en la viscosidad.

Figura 31. Distribución de presión del fluido dentro de la turbina



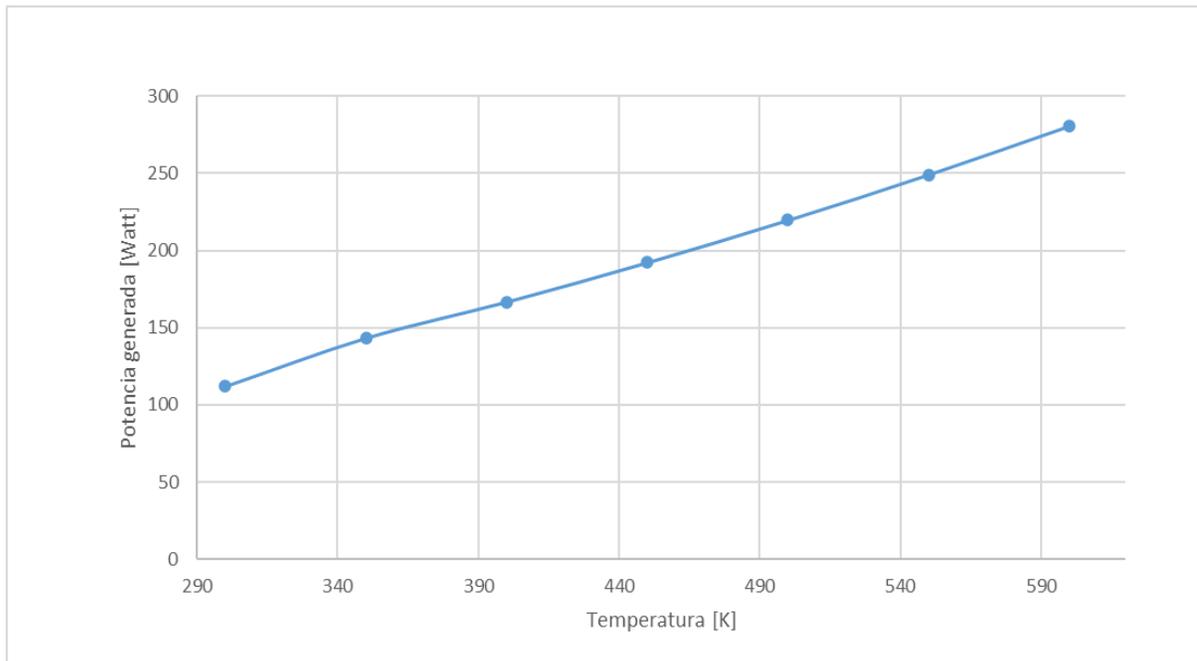
Nota. Elaboración propia.

Tabla 8

Resultados de variación de la temperatura del fluido

Temperatura del fluido [K]	Torque [Nm]	Potencia generada [W]
300	0.11211269	112.11
350	0.143350000	143.35
400	0.166750000	166.75
450	0.192150000	192.15
500	0.219550000	219.55
550	0.248950000	248.95
600	0.280350000	280.35

Nota. Resultados de variación de la temperatura del fluido. Velocidad de ingreso constante de 100m/s.

**Figura 32. Potencia generada con una variación de Temperatura 300K**

Nota: Elaboración propia

Como ejercicio adicional, se realizó una simulación con 12 y 10 discos manteniendo la temperatura a 300K y velocidad de 100 m/s.

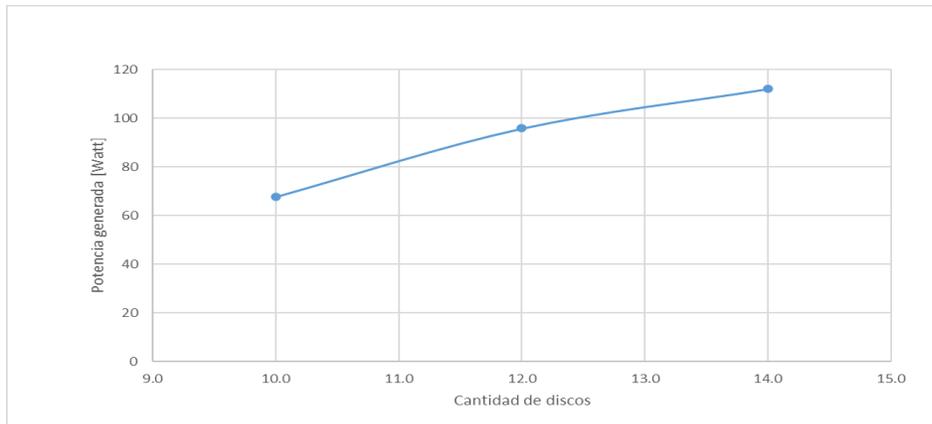
Tabla 9

Variación de cantidad de discos

Número de discos	Torque [Nm]	Potencia generada [W]
14	0.11211269	112.11
12	0.0958162	95.82
10	0.0676624	67.66

Nota. Elaboración propia

Figura 33. Potencia generada con una variación de cantidad de discos. Temperatura 300K y velocidad 100 m/s.



Nota. Elaboración propia

Comparación de Resultados

- Velocidad vs. Temperatura: Se observó que tanto la velocidad como la temperatura tienen un impacto significativo en la potencia generada de la turbina. Sin embargo, la velocidad mostró un efecto más pronunciado en el rendimiento general, mientras que la temperatura influyó principalmente en la distribución de presión.
- Condiciones Óptimas: Las condiciones óptimas de operación se encontraron en una velocidad de 150 m/s y una temperatura de 300 Kelvin, donde la turbina alcanzó una potencia cercana a la propuesta en la tesis.

Limitaciones y Consideraciones

- Debido a las limitaciones de la versión Estudiante de ANSYS, el número de celdas de la malla fue restringido a poco más de un millón. Esto pudo afectar la precisión de los resultados en zonas con gradientes altos, como los bordes de los discos y las regiones cercanas a la polea.
- Se recomienda realizar simulaciones con mallas más refinadas y modelos de turbulencia avanzados en futuros estudios para mejorar la precisión de los resultados.



CAPÍTULO 4: DISEÑO MECANICO

4.1. Diseño mecánico en el eje

El eje es el elemento que deberá soportar las cargas producidas por el contacto del fluido de vapor de agua y los discos.

Al estar en contacto con este fluido se debe asegurar que el material sea el adecuado, es decir, que soporte las condiciones de corrosión y oxidación. Para el presente trabajo se usará el acero inoxidable ASTM A-36, cuyas propiedades mecánicas son a alta resistencia a la tracción que oscila entre 250 y 550 MPa, módulo de elasticidad que se encuentra entre 190 a 210 GPa,

Teniendo los valores hallados:

$$\omega = 449.27 \text{ rad/s}$$

$$\text{Pot} = 642.55 \text{ watt}$$

La potencia en el eje de turbina es:

$$\text{Pot} = T * \omega = T = \frac{642.55 \text{ watt}}{449.27 \text{ rad/s}}$$

$$T = 1.43 \text{ Nm}$$

Por lo tanto, el Torque tiene la siguiente expresión.

$$T = F * r$$

Teniendo los valores del torque y del radio del disco se puede hallar la fuerza:

$$F = \frac{T}{r}$$

$$F = \frac{1.43}{0.115}$$

$$F = 12.29 \text{ N}$$

Peso de los discos (W) : W = 18.95 N



Radio del disco (r) : $r = 115 \text{ mm} = 0.115 \text{ m}$

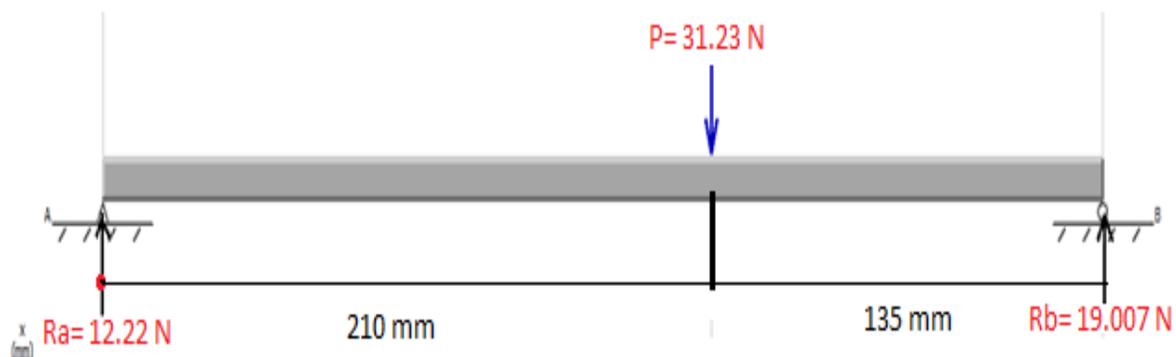
Longitud del eje (L) : $L = 345 \text{ mm} = 0.345 \text{ m}$

Peso total (peso de los discos + fuerza) $P = 31.23 \text{ N}$ que actúa en el eje de la turbina de vapor Tesla

4.2. Análisis estático para la determinación de reacciones en los puntos de soporte

El análisis estático es un procedimiento fundamental en el diseño mecánico que permite calcular las reacciones en los puntos de soporte de una estructura o componente, asegurando su estabilidad y correcto funcionamiento. Este análisis se basa en la aplicación de las condiciones de equilibrio estático, donde la suma de fuerzas y momentos debe ser igual a cero para un sistema en reposo o en movimiento constante. La determinación precisa de estas reacciones es esencial para dimensionar correctamente los soportes y evitar fallos estructurales debido a cargas inadecuadamente distribuidas. En sistemas térmicos y mecánicos, como una microturbina, este análisis permite evaluar las fuerzas que actúan sobre los puntos de apoyo, contribuyendo a la optimización del diseño y la seguridad operativa (Hibbeler, 2017).

Figura 34. Diagrama de fuerzas en el eje de la turbina Tesla



Nota. Elaboración propia

$$\sum F = 0 \quad R_a + R_b - 31.226 = 0 \quad R_a + R_b = 31.226$$

$$\sum M_A = 0 \quad R_b * 0.345 - 31.226 * 0.21 = 0$$



Ecuación (2)

$$RB * 0.34 = 6.56$$

$$RB = 19.007 \text{ N}$$

Reemplazando en la ecuación 1 se tiene la reacción en A

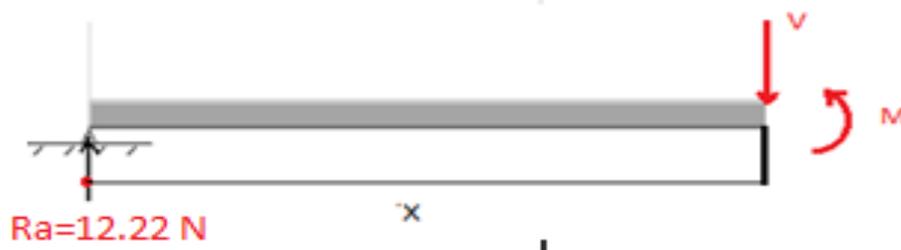
$$RA = 12.22 \text{ N}$$

4.3. Análisis y diseño de la deflexión en el eje de la Turbina

El diseño de la deflexión del eje se enfoca en calcular y controlar la desviación del eje bajo cargas de flexión para garantizar la funcionalidad y durabilidad del componente. La evaluación de la deflexión en una longitud específica, como 210 mm, permite asegurar que el eje mantenga su rigidez y resistencia dentro de los límites aceptables durante la operación (Shigley & Mischke, 2001).

En el diseño mecánico, el esfuerzo cortante y el momento flector son fundamentales para analizar la respuesta estructural de un eje sometido a cargas. El esfuerzo cortante representa la fuerza interna que actúa transversalmente sobre la sección del eje, mientras que el momento flector es la tendencia de la carga a causar una flexión o curvatura en el eje. Ambos parámetros influyen directamente en la magnitud de la deflexión y en la distribución de tensiones dentro del eje.

Figura 35. Diseño de la deflexión para una distancia cerca de 210 mm.



$$\sum M = 0$$

$$M - RA \cdot X = 0$$

$$M - 12.219 \cdot X = 0$$



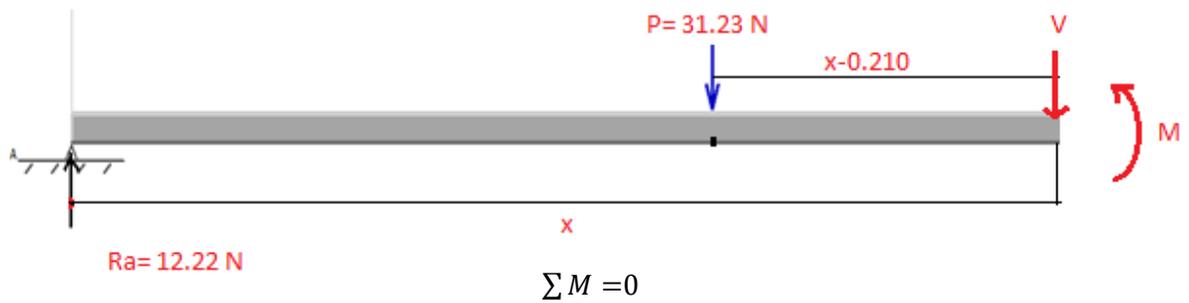
$$M = 12.219 * X$$

Condiciones de distancia:

$$\text{Para } 0 \leq x \leq 0.21$$

$$M = 2.56 \text{ N m}$$

Diseño de deflexión cerca a la distancia 345 mm



$$M + 31.226 * (x - 0.21) - 12.219X = 0$$

$$M + 31.226 * X - 31.226 * 0.21 - 12.219X = 0$$

$$M = -19.007X + 6.557$$

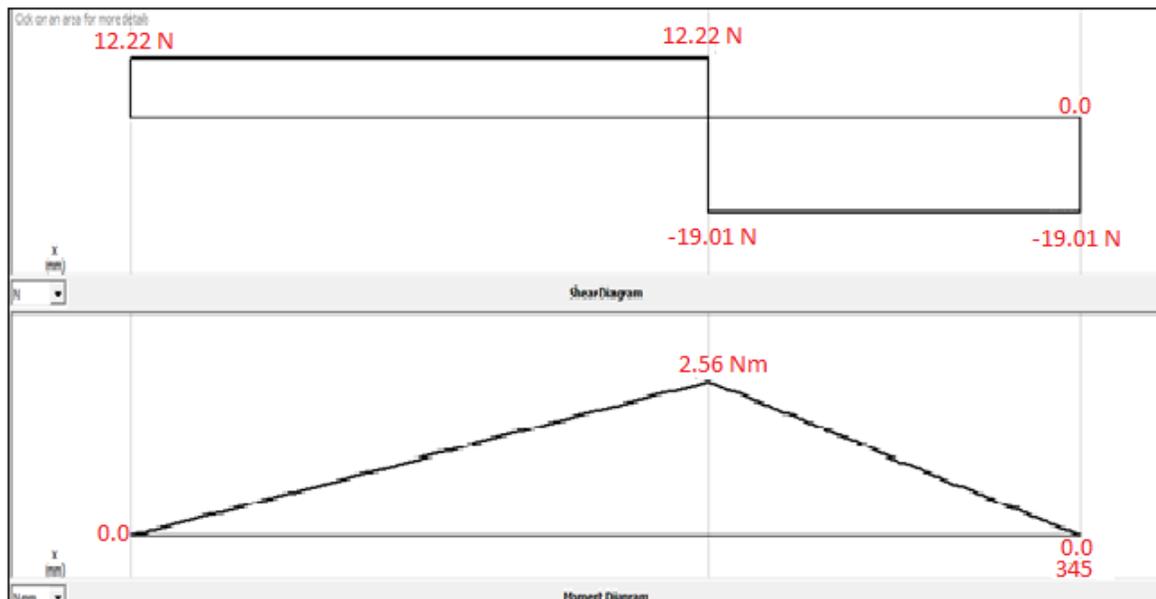
Condiciones de distancia:

$$\text{Para } 0.21 \leq x \leq 0.345$$

$$M = 2.56 \text{ Nm}$$

$$M = 0$$

Con el esfuerzo de corte y momento de flector en el eje de la turbina Tesla se realiza los siguientes gráficos. Diagrama de esfuerzo cortante y momento flector en el eje de la turbina de vapor tipo Tesla.

**Figura 36. Diagrama de esfuerzo cortante y momento flector en el eje.**

Nota. Elaboración propia

4.4. Ecuación diferencial de la viga relacionada con el momento flector

En el análisis estructural de vigas, la ecuación diferencial que relaciona la deflexión de la viga con el momento flector es fundamental para determinar su comportamiento bajo carga. Esta ecuación se deriva de la teoría de la elasticidad y de la ley de Euler-Bernoulli para vigas flexionadas, donde el momento flector $M(x)$ en una sección de la viga es proporcional a la curvatura de la misma. Matemáticamente, esta relación se expresa como:

$$EI \frac{d^2y}{dx^2} = M(x)$$



donde E es el módulo de elasticidad del material, I es el momento de inercia de la sección transversal, Y es la deflexión transversal de la viga y x es la coordenada a lo largo de la viga. La ecuación indica que la segunda derivada de la deflexión con respecto a la longitud es proporcional al momento flector aplicado. Este modelo permite calcular la deformación y deflexión de la viga bajo diversas condiciones de carga y soporte, siendo esencial para diseñar estructuras que resistan esfuerzos sin fallar ni deformarse excesivamente (Hibbeler, 2017).

$$EI \frac{d^2y}{dx^2} = M(x) = -19.007X + 6.557$$

Primera integración de la ecuación de la pendiente.

$$EI \frac{dy}{dx} = -19.007 \frac{X^2}{2} - 6.557X + C1$$

Segunda integración de la ecuación deformada

$$EIY = -19.007 \frac{X^3}{6} + 6.557 \frac{X^2}{2} + C1X + C2$$

Condición de frontera en B

$$y = 0 \quad x = 0$$

$$EIY = -19.007 \frac{X^3}{6} + 6.557 \frac{X^2}{2} + C1X + C2 \quad \text{ecuación 1}$$

$$C2 = 0$$

Condición de frontera en B

$$y = 0 \quad x = 0.28$$

$$0 = 3.169 * 0.28^3 + 3.279 * 0.28^2 + C1 * 0.28 + 0$$

$$0 = 3.169X^3 + 3.279 X^2 + C1X + 0$$

$$C1 = -\frac{0.188}{0.28}$$

$$C1 = -0.671$$



Condición de frontera en A

$$Y_{\max} = \theta = 0$$

$$\theta = EI \frac{dy}{dx} = -19.007 \frac{X^2}{2} + 6.557X - 0.671 \quad \theta = EI \frac{dy}{dx} = -9.540X^2 + 6.557X - 0.671$$

$$0 = -9.540X^2 + 6.557X - 0.671 \quad 9.540X^2 - 6.557X + 0.671 = 0$$

Con la ecuación de ecuación de Baskara

$$X = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

$$X = \frac{-(-6.557) \pm \sqrt{(-6.557)^2 - 4 * 9.540 * 0.671}}{2 * 9.504}$$

$$X_1 = \frac{-(-6.557) + \sqrt{(-6.557)^2 - 4 * 9.540 * 0.671}}{2 * 9.504} \quad X_1 = 0.565$$

$$X_2 = \frac{-(-6.557) - \sqrt{(-6.557)^2 - 4 * 9.540 * 0.671}}{2 * 9.504} \quad X_2 = 0.125$$

Con los valores obtenidos de x_1 y x_2 se toma $x_2 = 0.125$ porque está dentro de la longitud del eje de la turbina.

Por lo tanto, con 0.125 se reemplaza en la ecuación.

$$EIY = 3.169X^3 + 3.279X^2 -$$

$$EIY = 3.169 * 0.125^3 + 3.279 * 0.125^2 - 0.671 * 0.125$$

Y se obtiene:

$$EIY = 0.039$$



4.5. Momento de inercia

El momento de inercia es una propiedad geométrica crucial para el diseño mecánico de ejes, ya que representa la resistencia de una sección transversal a la flexión y torsión. En el caso del eje de una turbina Tesla, el momento de inercia determina cómo se distribuirán las tensiones internas cuando el eje está sometido a cargas de flexión o torsión durante su operación.

Para un eje cilíndrico sólido, que es común en turbinas, el momento de inercia respecto a su eje neutro se calcula con la expresión:

$$I = \frac{1 * \pi * r^4}{4}$$

donde I es el momento de inercia, y r es el radio del eje. Esta ecuación muestra que el momento de inercia aumenta con la cuarta potencia del radio, lo que implica que pequeñas variaciones en el diámetro tienen un gran impacto en la rigidez del eje. Un mayor momento de inercia reduce la deflexión y el esfuerzo de flexión, mejorando la estabilidad y durabilidad del eje en la turbina Tesla (Shigley & Mischke, 2001).

Diámetro del eje = 0.032 m

Radio del eje = 0.016 m

$$I = \frac{1 * \pi * 0.0175^4}{4} \quad I = 73 \times 10^{-9} \text{ m}^4$$

La deflexión máxima en el eje de una turbina Tesla es un parámetro crítico que indica el desplazamiento máximo que sufre el eje bajo cargas aplicadas durante su operación. Este valor es fundamental para evaluar la rigidez y la integridad estructural del eje, ya que una deflexión excesiva puede provocar desalineaciones, vibraciones y desgaste prematuro en los componentes acoplados, afectando la eficiencia y vida útil del sistema. La deflexión máxima en el eje de Turbina Tesla.



$$Y_{max} = \frac{0.039}{EI}$$

Para:

Módulo de elasticidad $E = 200 \times 10^9$

Momento de inercia $I = 73 \times 10^{-9}$

Entonces la deflexión máxima en el eje de la turbina es:

$$Y_{max} = \frac{0.039}{200 \times 10^9 * 73 \times 10^{-9}} \quad Y_{max} = 0.00000267$$

4.6. Momento de inercia polar

El momento de inercia polar es una propiedad geométrica fundamental que describe la resistencia de una sección transversal de un eje a la torsión, es decir, a la deformación causada por momentos torsionales. En el caso del eje de una turbina Tesla, este parámetro es vital para diseñar un eje que pueda soportar los esfuerzos de torsión generados durante la operación sin deformarse excesivamente o fallar.

Para un eje circular sólido, el momento de inercia polar J se determina mediante la siguiente expresión:

$$J = \frac{\pi * r^4}{2}$$

Para

$$r = 0.0175 \text{ m}$$

$$J = \frac{\pi * 0.0175^4}{2} \quad J = 1.43 \times 10^{-7} \text{ m}^4$$



4.7. Angulo de torsión en el eje de la turbina de vapor Tesla

El ángulo de torsión en el eje de una turbina de vapor Tesla es una medida de la deformación angular que experimenta el eje cuando está sometido a un momento torsional. Este parámetro es esencial para evaluar la capacidad del eje para transmitir torque sin sufrir deformaciones excesivas que puedan provocar desalineación o daños en los componentes acoplados.

El ángulo de torsión θ se calcula a partir de la relación entre el momento torsional aplicado, las propiedades geométricas del eje y las propiedades del material, expresándose generalmente como:

$$\theta = \frac{T * L}{JG}$$

Donde T es el momento torsional aplicado, L es la longitud del eje sometida a torsión, G es el módulo de rigidez del material (módulo de cizalladura), y J es el momento de inercia polar de la sección transversal del eje. Esta fórmula supone que el material se comporta de manera elástica y que la sección transversal del eje permanece constante a lo largo de la longitud L (Shigley & Mischke, 2001).

$$\theta = \frac{1.43 * 0.345}{1.43 \times 10^{-7} * 73 \times 10^9} \quad \theta = 5.009 \text{ rad} = 0.0028^\circ$$

4.8. Especificaciones técnicas para la selección de la chaveta en el eje de la turbina

Para el diseño y la selección adecuada de la chaveta en la turbina de vapor tipo Tesla, se han considerado los siguientes parámetros técnicos fundamentales:

4.8.1. Transmisión de par de torsión

La chaveta debe dimensionarse de manera que sea capaz de transmitir el mismo par de torsión que soporta el eje correspondiente. Esto garantiza que la transmisión de potencia sea efectiva y segura durante la operación.

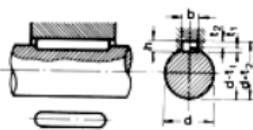
4.8.2. Dimensiones de la chaveta

La longitud mínima de la chaveta debe ser igual o superior a 1.5 veces el diámetro del eje. Esta proporción asegura una adecuada superficie de contacto para la transferencia de esfuerzos sin fallas prematuras.

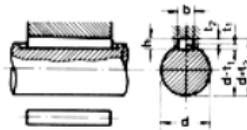
Figura 37. Chaveta paralela S/DIN-6885/1

Ø Eje d (mm) desde-hasta	Medidas chaveta b x h mm	Medidas del chavetero en el cubo				Medidas del chavetero en el eje para chavetas paralelas y de cuña		Medidas de los ejes en el cubo de la rueda	
		Chaveta paralela S/DIN 6885/1		Chaveta de cuña S/DIN 6886 y 6887		t ₁ m/m	Tol. admisible (en altura) m/m	Ø m/m desde- hasta	Tol. H-7 m/m
		d + t ₂ m/m	Tol. Admisible (en altura) m/m	d + t ₂ m/m	Tol. admisible (en altura) m/m				
17-22	6x6	d+2,6	+0,1	d+2,1	+0,1	3,5	+0,2	10-18	+0,018 0
22-30	8x7	d+3,0		d+2,4		4,1			
30-38	10x8	d+3,4		d+2,8		4,7			
38-44	12x8	d+3,2	+0,2	d+2,6	+0,2	4,9		30-50	+0,025 0
44-50	14x9	d+3,6		d+2,9		5,5			
50-58	16x10	d+3,9		d+3,2		6,2			
58-65	18x11	d+4,3		d+3,5		6,8			
65-75	20x12	d+4,7		d+3,9		7,4			
75-85	22x14	d+5,6		d+4,8		8,5			
85-95	25x14	d+5,4		d+4,6		8,7			
95-110	28x16	d+6,2		d+5,4		9,9			
110-130	32x18	d+7,1		d+6,1		11,1			
130-150	36x20	d+7,9		d+6,9		12,3			
150-170	40x22	d+8,7	d+7,7	13,5					
170-200	45x25	d+9,9	d+8,9	15,3					
200-230	51x28	d+11,2	d+10,1	17					
230-260	56x32	d+12,9	d+11,8	19,3					
260-290	63x32	d+12,6	+0,3	d+11,5	+0,3	19,6	+0,3	400-500	+0,063 0

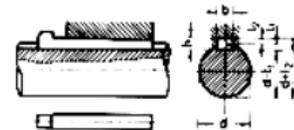
Fuente: Zonas de tolerancia del ancho de la chaveta



Chaveta paralela S/DIN-6885/1



Chaveta de cuña S/DIN-6886



Chaveta de cuña con cabeza S/DIN-6887



4.8.3. Tipo de chaveta

Se selecciona la chaveta paralela según la norma DIN-6885/1, que especifica las dimensiones y tolerancias estándar para este tipo de chavetas

4.8.4. Zonas de tolerancia

Las dimensiones del chavetero, tanto en el eje como en la rueda, deben cumplir con las tolerancias establecidas para el ancho, con el fin de garantizar un ajuste adecuado. Esto es esencial para evitar holguras o interferencias que puedan generar vibraciones o daños

4.8.5. Bordes redondeados

Los bordes de los chaveteros deben estar redondeados para evitar concentraciones de esfuerzo que puedan provocar grietas y, en consecuencia, roturas prematuras del conjunto.

4.8.6. Materiales y normas aplicables

Se deben respetar las propiedades mecánicas especificadas para los materiales del eje y la chaveta, garantizando así resistencia y durabilidad. Para el eje se utilizó acero AISI/SAE 1045, conforme a las normas SAE J403 y ASTM A36/A36M, con el fin de soportar cargas rotacionales, esfuerzos de tensión y flexión durante el funcionamiento.

4.8.7. Mecanizado

El eje fue mecanizado (torneado) al diámetro interior de los discos según los cálculos realizados, asegurando la precisión necesaria para el ensamblaje y el funcionamiento adecuado del sistema.



4.9. Análisis vibracional en el eje de la microturbina Tesla

El análisis de frecuencia determina las frecuencias naturales y modos de vibración de un sistema estructural o mecánico, como un eje rotativo. Mediante métodos numéricos (como FEM), se resuelven ecuaciones dinámicas para identificar resonancias y evitar fallos. En este estudio, para simplificar el cálculo nos apoyaremos en el software SolidWorks para el análisis vibracional para una fuerza de 31.23 N y una velocidad de rotación de 450 rad/s.

4.9.1. Ecuación de los modos de vibración

Los modos de vibración se obtienen resolviendo la ecuación de movimiento para un sistema rotativo, que incluye efectos giroscópicos y fuerzas centrífugas. La ecuación general para un eje rotativo es:

$$M\ddot{u} + Cu + Ku = F(t)$$

donde:

- M: Matriz de masa.
- C: Matriz de amortiguamiento (incluye términos giroscópicos G: $C=G+D=G+D$, con D como amortiguamiento viscoso).
- K Matriz de rigidez (puede incluir efectos centrífugos).
- u: Vector de desplazamientos (en Y y Z).
- F(t): Vector de fuerzas externas (en este caso, la carga de 31.23 N).

4.9.2. Solución para modos naturales (sin amortiguamiento y sin fuerza externa):

$$(M^{-1}K) u = \omega^2$$

Donde ω es la frecuencia natural en rad/s. Los modos de vibración son los vectores propios (u_i) asociados a las frecuencias naturales (ω_i).



4.9.2. Amplitudes de vibración

Las amplitudes resultantes (Amplitud1, Amplitud2,...Amplitud1,Amplitud2,...) corresponden a la respuesta forzada del sistema bajo la carga aplicada (31.23 N31.23N a 188 mm). La solución se obtiene mediante:

$$u(t) = \sum_{i=1}^n \frac{u_i^T F_0}{(\omega_i^2 - \Omega^2) + j(2\zeta_i \omega_i)} u_i e^{j\omega t}$$

donde:

- F_0 : Vector de fuerza aplicada ([0,31.23,0] N).
- Ω : Velocidad angular del eje (1000 rad/s).
- ζ_i : Razón de amortiguamiento (no proporcionada, pero típicamente pequeña en sistemas mecánicos).

4.9.3. Velocidad crítica

La velocidad crítica ocurre cuando Ω coincide con una frecuencia natural (ω_i). En este caso:

4.10. Análisis vibracional en el eje de la microturbina Tesla

4.10.1. Frecuencias naturales

Cuando un sistema mecánico (como un resorte con una masa, una viga, o una estructura) se desplaza de su posición de equilibrio y luego se deja en libertad, comienza a oscilar. La frecuencia de esa oscilación libre es la frecuencia natural. Esta depende de las propiedades físicas del sistema, como su masa y su rigidez (constante elástica).

$$\omega_i = \sqrt{\frac{k_i}{m_i}} \quad (\text{para sistemas simplificados}).$$



4.10.2. Amplitudes en resonancia:

Amplitudes de resonancia se refiere a los valores de amplitud que un sistema puede alcanzar cuando es sometido a excitaciones cercanas o iguales a su frecuencia natural. Aunque la amplitud de resonancia máxima ocurre exactamente a esa frecuencia, existen múltiples valores de amplitud en un rango de frecuencias próximas (en la curva de resonancia).

$$\text{Amplitud} \approx \frac{F_0}{2k_i\zeta_i}$$

4.10.3. Efecto giroscópico:

El efecto giroscópico** es la tendencia de un cuerpo en rotación a mantener la orientación de su eje de giro debido a la conservación del momento angular.

$$\text{Frecuencia} = \omega_i \mp \frac{J_p\Omega}{2J_t}$$

4.11. Análisis vibracional mediante elementos finitos FEN

Con ayuda del software SolidWorks realizaremos el estudio del análisis vibracional para una fuerza de 31.23N y una velocidad de rotación de 490 rad/s, los resultados se muestran a continuación.



Tabla 10

Propiedades de estudio

Nombre de estudio	<i>Estudio de velocidad critica 02</i>
Tipo de análisis	<i>Frecuencia</i>
Tipo de malla	<i>Malla sólida</i>
Número de frecuencias	<i>5</i>
Tipo de solver	<i>FFEPlus</i>
Muelle blando:	<i>Desactivar</i>
Opciones de unión rígida incompatibles	<i>Automático</i>
Opción térmica	<i>Incluir cargas térmicas</i>
Temperatura a tensión cero	<i>298 Kelvin</i>
Carpeta de resultados	<i>Documento de SOLIDWORKS</i>

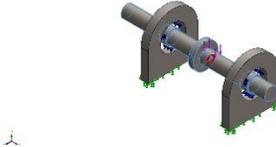
Fuente: Elaboración propia

Tabla 11 Unidades de medida

Sistema de unidades:	<i>Métrico (MKS)</i>
Longitud/Desplazamiento	<i>mm</i>
Temperatura	<i>Kelvin</i>
Velocidad angular	<i>Rad/seg</i>
Presión/Tensión	<i>N/m²</i>

Fuente: Elaboración propia

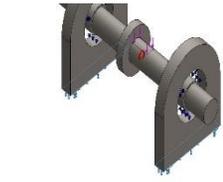
Tabla 12 Propiedades del material

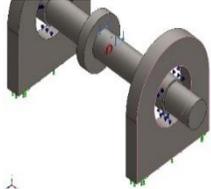
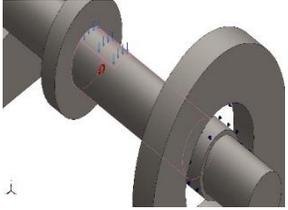
Referencia de modelo	Propiedades	Componentes
	<p>Nombre: AISI 1010 Barra de acero laminada en caliente</p> <p>Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal</p> <p>Criterio de error predeterminado: Tensión de von Mises máx.</p> <p>Límite elástico: $1.8e+08 \text{ N/m}^2$</p> <p>Límite de tracción: $3.25e+08 \text{ N/m}^2$</p> <p>Densidad: $7,870 \text{ kg/m}^3$</p> <p>Módulo elástico: $2e+11 \text{ N/m}^2$</p> <p>Coeficiente de Poisson: 0.29</p> <p>Coeficiente de dilatación térmica: $1.22e-05 /\text{Kelvin}$</p>	Sólido 1
Datos de curva: N/A		
	<p>Nombre: AISI 1020 Acero laminado en frío</p> <p>Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal</p> <p>Criterio de error predeterminado: Tensión de von Mises máx.</p> <p>Límite elástico: $3.5e+08 \text{ N/m}^2$</p> <p>Límite de tracción: $4.2e+08 \text{ N/m}^2$</p>	Sólido 1



	Densidad: 7,870 kg/m ³ Módulo elástico: 2.05e+11 N/m ² Coefficiente de Poisson: 0.29 Coefficiente de dilatación térmica: 1.17e-05 /Kelvin	
<i>Datos de curva: N/A</i>		

Tabla 13 Cargas y sujeciones

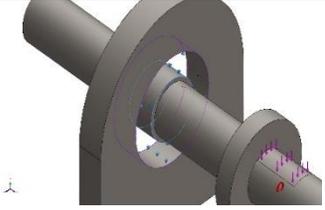
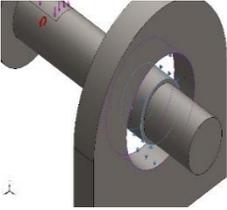
<i>Nombre de sujeción</i>	<i>Imagen de sujeción</i>	<i>Detalles de sujeción</i>
<i>Fijo-1</i>		<p>Entidades: 2 cara(s)</p> <p>Tipo: Geometría fija</p>

<i>Nombre de carga</i>	<i>Cargar imagen</i>	<i>Detalles de carga</i>
<i>Fuerza-1</i>		<p>Entidades: 1 cara(s)</p> <p>Referencia: Cara< 1 ></p> <p>Tipo: Aplicar fuerza</p> <p>Valores: ---, -31.23, --- N</p>
<i>Centrífuga-1</i>		<p>Centrífuga, Ref: Cara< 1 ></p> <p>Velocidad angular: -450 rad/s</p> <p>Aceleración angular: 0rad/s²</p>

Fuente: Elaboración propia

Tabla 14

Definiciones de conector de pasador/perno/rodamiento

Referencia de modelo	Detalles del conector	Detalles de resistencia
 <p>Conector de apoyo - 1</p>	<p>Entidades: 2 cara(s)</p> <p>Tipo: Rodamiento</p>	<p>No existe datos</p>
<p>Fuerzas del conector no existe datos</p>		
 <p>Conector de apoyo - 2</p>	<p>Entidades: 2 cara(s)</p> <p>Tipo: Rodamiento</p>	<p>No existe datos</p>
<p>Fuerzas del conector no existe datos</p>		

Fuente: Elaboración propia



Tabla 15

Información de interacción

Fuente: Elaboración propia

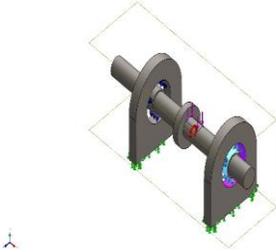
<i>Interacción</i>	<i>Imagen de interacción</i>	<i>Propiedades de interacción</i>
<i>Interacción global</i>		<p>Tipo: <i>Unión rígida</i></p> <p>Componentes: <i>1 componente</i></p> <p>Opciones: <i>Mallado independiente</i></p>



Tabla 16

Información de malla

Tipo de malla	<i>Malla sólida</i>
Mallador utilizado:	<i>Malla basada en curvatura de combinado</i>
Puntos jacobianos para malla de alta calidad	<i>16 Puntos</i>
Tamaño máximo de elemento	<i>7.64054 mm</i>
Tamaño mínimo del elemento	<i>7.64054 mm</i>
Calidad de malla	<i>Elementos cuadráticos de alto orden</i>

Información de malla - Detalles

Número total de nodos	<i>22768</i>
Número total de elementos	<i>13637</i>
Cociente máximo de aspecto	<i>47.451</i>
% de elementos cuyo cociente de aspecto es < 3	<i>99.4</i>
El porcentaje de elementos cuyo cociente de aspecto es > 10	<i>0.088</i>
Porcentaje de elementos distorsionados	<i>0</i>
Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss):	<i>00:00:02</i>

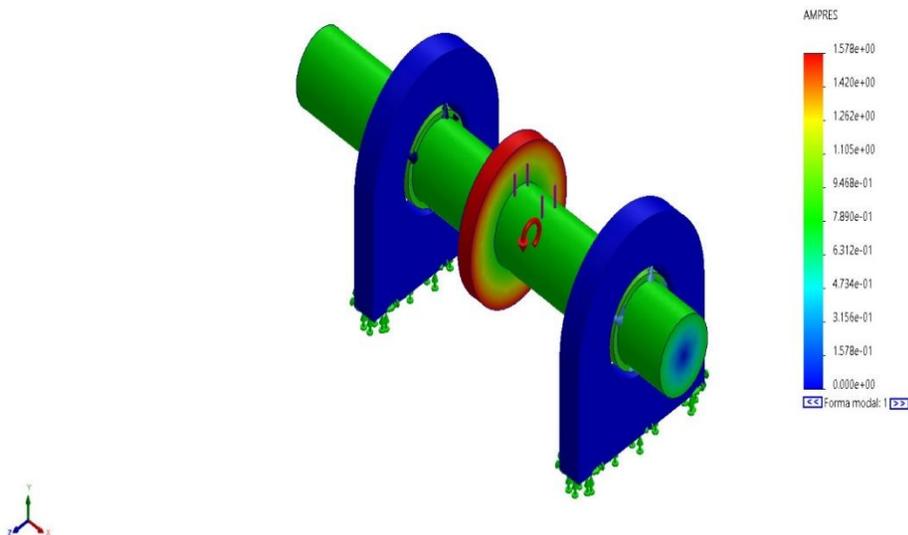
Fuente: Elaboración propia

Tabla 17 Propiedades de estudio

Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Amplitud1	AMPRES: Amplitud resultante Plot para forma modal: 1 (Valor = 152.691 Hz)	0.000e+0 0 Nodo: 3	1.578e+00 Nodo: 13824

Ensamblaje1-Estudio de velocidad critica 02-Amplitud-Amplitud 1

Nombre del modelo: Ensamblaje1
 Nombre de estudio: Estudio de velocidad critica 02(-Predeterminado-)
 Tipo de resultado: Frecuencia Amplitud1
 Forma modal: 1 Valor = 152.69 Hz
 Escala de deformación: 0.0218646

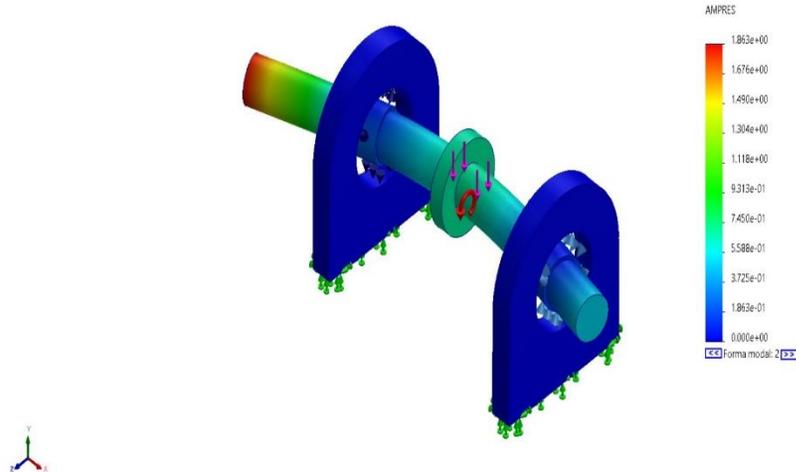




Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Amplitud2	AMPRES: Amplitud resultante Plot para forma modal: 2 (Valor = 948.082 Hz)	0.000e+00 Nodo: 3	1.863e+00 Nodo: 13496

Ensamblaje 1 - Estudio de velocidad crítica 02 - Amplitud - Amplitud 2

Nombre del modelo: Ensamblaje1
Nombre de estudio: Estudio de velocidad crítica 02 (Predeterminado)
Tipo de resultado: Frecuencia Amplitud2
Forma modal: 2, Valor = 948.082 Hz
Escala de deformación: 0.0187785

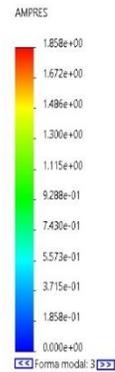
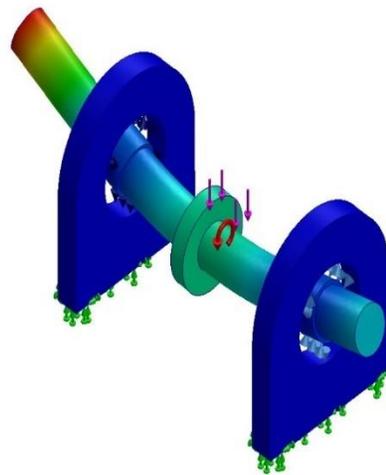




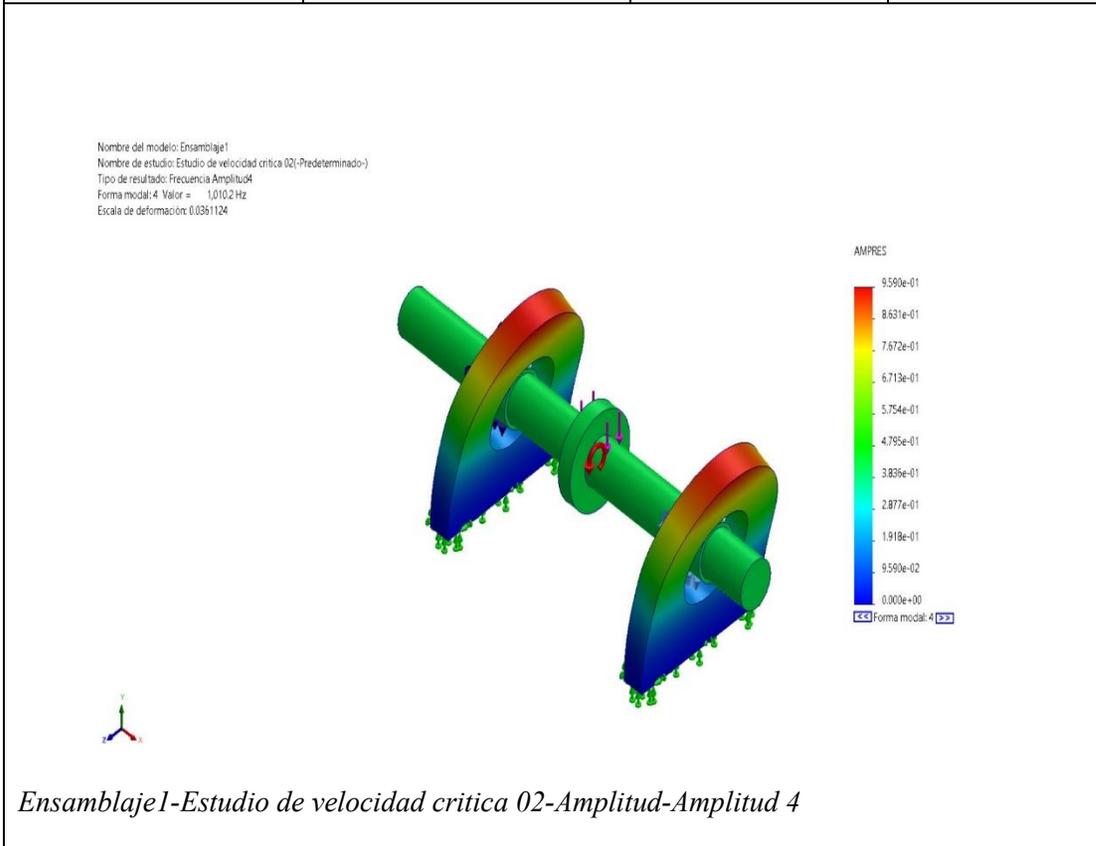
Nombre	Tipo	Min.	Máx.
Amplitud3	AMPRES: Amplitud resultante Plot para forma modal: 3(Valor = 949.88 Hz)	0.000e+00 Nodo: 3	1.858e+00 Nodo: 14120

Ensamblaje1-Estudio de velocidad critica 02-Amplitud-Amplitud 3

Nombre del modelo: Ensamblaje1
Nombre de estudio: Estudio de velocidad critica 02(-Predeterminado-)
Tipo de resultado: Frecuencia Amplitud3
Forma modal: 3 Valor = 949.88 Hz
Escala de deformación: 0.0188317



<i>Nombre</i>	<i>Tipo</i>	<i>Mín.</i>	<i>Máx.</i>
<i>Amplitud4</i>	<i>AMPRES: Amplitud resultante Plot para forma modal: 4(Valor = 1,010.16 Hz)</i>	<i>0.000e+00</i> <i>Nodo: 3</i>	<i>9.590e-01</i> <i>Nodo: 267</i>

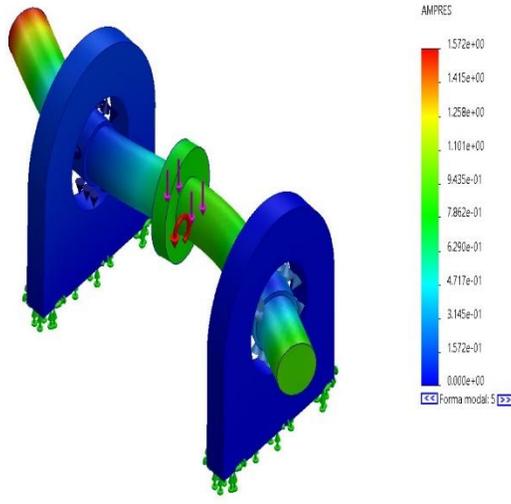


Fuente: Elaboración propia

<i>Nombre</i>	<i>Tipo</i>	<i>Mín.</i>	<i>Máx.</i>
<i>Amplitud5</i>	<i>AMPRES: Amplitud resultante Plot para forma modal: 5(Valor = 1,990.09 Hz)</i>	<i>0.000e+00</i>	<i>1.572e+00</i>
		<i>Nodo: 3</i>	<i>Nodo: 13496</i>

Ensamblaje1-Estudio de velocidad critica 02-Amplitud-Amplitud 5

Nombre del modelo: Ensamblaje1
 Nombre de estudio: Estudio de velocidad critica 02-(Predefinido-)
 Tipo de resultado: Frecuencia Amplitud5
 Forma modal: 5. Valor = 1,990.1 Hz
 Escala de deformación: 0.0223183



Fuente: Elaboración propia



Tabla 18

Lista de modos

<i>Frecuencia n°.</i>	<i>Rad/seg</i>	<i>Hertz</i>	<i>Segundos</i>
1	959.39	152.69	0.0065492
2	5,957	948.08	0.0010548
3	5,968.3	949.88	0.0010528
4	6,347	1,010.2	0.00098994
5	12,504	1,990.1	0.00050249

Fuente: Elaboración propia

Tabla 19

Participación de masa (Normalizada)

<i>Modo n°.</i>	<i>Frecuencia(Hertz)</i>	<i>Dirección X</i>	<i>Dirección Y</i>	<i>Dirección Z</i>
1	152.69	8.3069e-19	1.856e-10	8.4008e-13
2	948.08	1.0216e-08	2.9923e-06	0.0010385
3	949.88	1.8425e-08	0.0010994	2.562e-06
4	1,010.2	0.71922	5.1953e-10	1.7652e-09
5	1,990.1	2.6983e-10	3.6892e-07	0.23394
		<i>Sum X =</i> 0.71922	<i>Sum Y =</i> 0.0011028	<i>Sum Z =</i> 0.23498

Fuente: Elaboración propia



4.11.1. Resultados del estudio

Resultados

- *Los modos de vibración son soluciones de la ecuación de movimiento con efectos rotativos.*
- *Las amplitudes dependen de la cercanía entre Ω y ω_i , y del amortiguamiento.*
- *SolidWorks resuelve numéricamente estas ecuaciones usando el método de elementos finitos (FEM), como se ve en la malla con 2276822768 nodos.*
- *La velocidad de operación (450 rad/s \approx 159.15 Hz / 1000 rad/s \approx 159.15 Hz) está cerca del Modo 1 (152.69 Hz / 152.69 Hz), lo que podría indicar resonancia si no hay suficiente amortiguamiento.*

4.11.2. Frecuencias naturales obtenidas:

4.11.3.1. Los resultados muestran frecuencias en Hz y rad/s:

- *Modo 1: 152.69 Hz / 152.69 Hz (959.39 rad/s / 959.39 rad/s).*
- *Modo 2: 948.08 Hz / 948.08 Hz (5957 rad/s / 5957 rad/s).*
- *Modo 3: 949.88 Hz / 949.88 Hz (5968.3 rad/s / 5968.3 rad/s).*
- *Modo 4: 1010.2 Hz / 1010.2 Hz (6347 rad/s / 6347 rad/s).*
- *Modo 5: 1990.1 Hz / 1990.1 Hz (12504 rad/s / 12504 rad/s).*

4.11.3.2. Amplitudes máximas reportadas:

- *Modo 1: 1.578 mm / 1.578 mm (en nodo 13824).*
- *Modo 2: 1.863 mm / 1.863 mm (en nodo 13496).*
- *Modo 3: 1.858 mm / 1.858 mm (en nodo 14120).*
- *Modo 4: 0.959 mm / 0.959 mm (en nodo 267).*
- *Modo 5: 1.572 mm / 1.572 mm (en nodo 13496).*



CAPÍTULO 5: PROTOCOLO DE PRUEBAS

5.1. Redacción de protocolo de pruebas

Los resultados obtenidos a partir de un análisis experimental sobre el comportamiento de una turbina de vapor tipo Tesla en función de distintas condiciones de presión, temperatura y velocidad angular. El objetivo principal es evaluar la potencia generada en el eje de la turbina para distintos niveles de presión de entrada, observando cómo influye esta variable junto con la temperatura y la velocidad angular

Tabla 20

Valores de presión, temperatura, velocidad angular y potencia en el eje

<i>Presión</i> <i>(psi)</i>	<i>Temperatura</i> <i>(°C)</i>	<i>Velocidad</i> <i>angular</i> <i>(rpm)</i>	<i>Potencia</i> <i>(Waat)</i>
<i>20</i>	<i>125</i>	<i>0</i>	<i>0</i>
<i>30</i>	<i>130</i>	<i>0</i>	<i>0</i>
<i>40</i>	<i>140</i>	<i>249</i>	<i>37.280529</i>
<i>50</i>	<i>145</i>	<i>350</i>	<i>52.40235</i>
<i>65</i>	<i>150</i>	<i>1700</i>	<i>254.5257</i>
<i>80</i>	<i>155</i>	<i>2500</i>	<i>374.3025</i>
<i>100</i>	<i>165</i>	<i>4287</i>	<i>642.0235</i>

Nota. Elaboración propia



Se llevó a cabo un experimento variando sistemáticamente la presión de entrada en el sistema desde 20 psi hasta 100 psi. Para cada punto de operación, se registraron la temperatura del fluido (en °C), la velocidad angular del eje (en rpm) y la potencia generada (en Waat). Las mediciones se realizaron en condiciones controladas para garantizar la repetibilidad y fiabilidad de los datos.

Los resultados muestran una clara tendencia de aumento de la potencia generada conforme incrementa la presión de entrada. A partir de los 40 psi, se empieza a observar generación de potencia, lo cual coincide con el inicio del movimiento angular del eje. A presiones más altas (65 psi en adelante), el incremento de velocidad angular es significativo, lo que se traduce directamente en un aumento considerable de la potencia en el eje.

Se puede inferir que existe una correlación positiva entre la presión y la potencia generada, mediada por el aumento de la velocidad angular. Asimismo, el incremento gradual de la temperatura podría influir en la eficiencia del sistema.

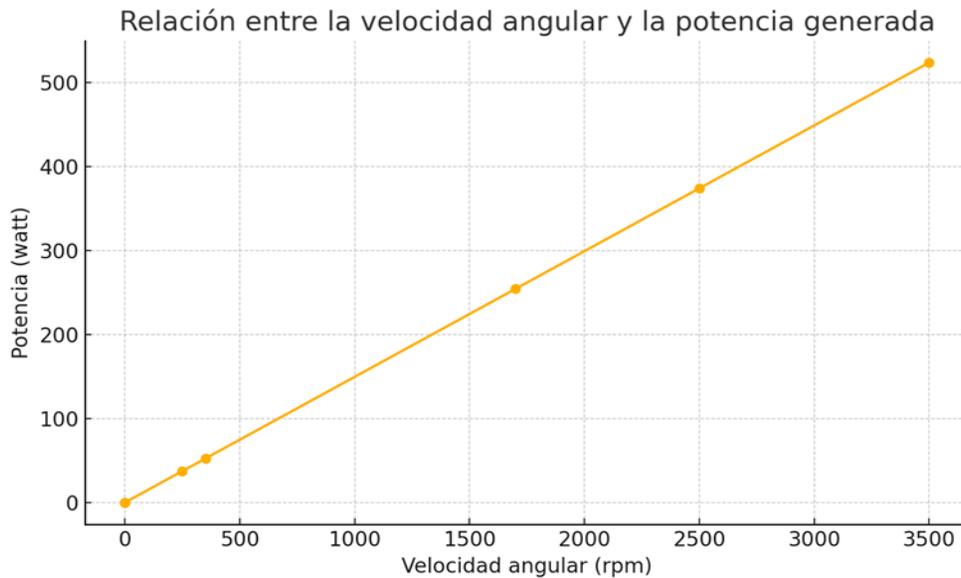
El ensayo demuestra que la presión de entrada es un parámetro crítico para la generación de potencia en turbinas de vapor tipo Tesla. A partir de ciertos umbrales, se activa la rotación del eje, y con el incremento de presión, se optimiza la producción de potencia. Estos datos son fundamentales para el diseño y dimensionamiento de sistemas de generación de potencia en el eje de la turbina experimental de vapor tipo Tesla.

5.2. Análisis de la relación entre la velocidad angular y la potencia mecánica generada en el eje

Durante las pruebas experimentales del prototipo de la microturbina de vapor tipo Tesla, se midió la potencia generada en función de la velocidad angular del eje. Los valores obtenidos se presentan en la tabla 9.

Como se observa, existe una relación directamente proporcional entre la velocidad angular (en rpm) y la potencia generada (en watt). A medida que incrementa la velocidad de rotación del eje, también lo hace la potencia entregada. Esto se debe a que el incremento en la velocidad permite una mayor transferencia de energía cinética del vapor hacia el rotor, lo que incrementa el trabajo mecánico realizado por la turbina.

Figura 38. Relación entre la velocidad angular y la potencia mecánica generada en el eje



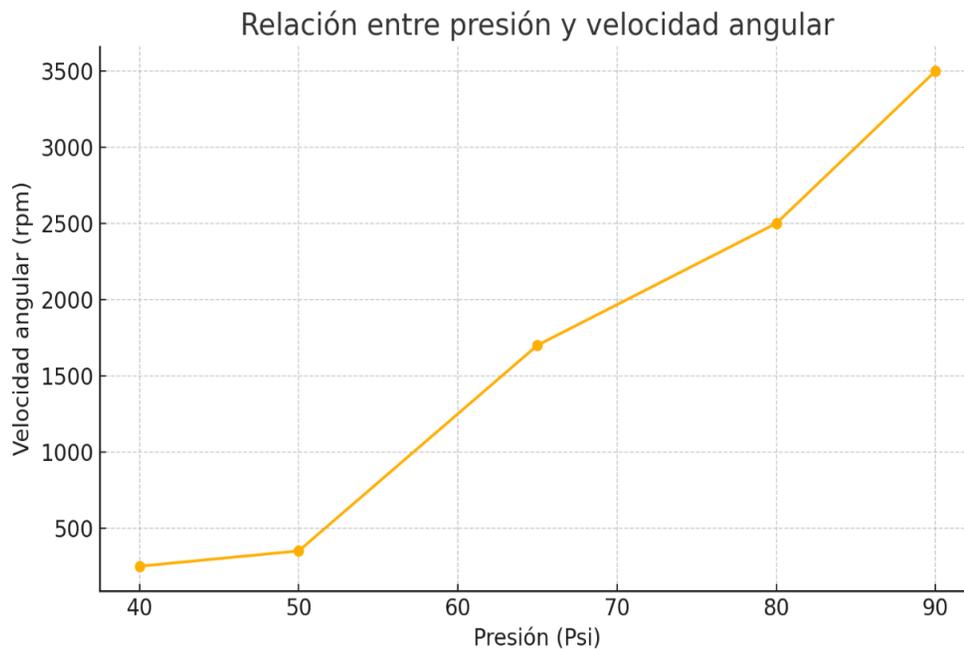
Nota. Elaboración propia

Los resultados experimentales confirman que el prototipo de la microturbina presenta un comportamiento creciente de potencia respecto a la velocidad angular, logrando una potencia superior a 500 W a una velocidad de 3500 rpm. Esta tendencia valida la capacidad del diseño para alcanzar el objetivo de 0.5 kW bajo condiciones de operación adecuadas. Además, la linealidad observada entre potencia y velocidad sugiere una transmisión del vapor al rotor, lo que abre la posibilidad de escalar o adaptar el sistema a otras aplicaciones de micro generación eléctrica.

5.3. Análisis de la relación entre la presión y la velocidad angular del eje

La presión de entrada del vapor es una variable crítica que influye directamente en el desempeño dinámico de la microturbina de vapor tipo Tesla, particularmente en la velocidad angular alcanzada por el eje. Al incrementar la presión de entrada, se aumenta la energía potencial del vapor, lo que resulta en un mayor flujo energético disponible para impulsar la turbina.

Figura 39. Relación entre la presión y la velocidad angular



Nota. Elaboración propia

Los resultados confirman que la velocidad angular del eje aumenta con el incremento de la presión del vapor, evidenciando una relación positiva y no lineal. El sistema requiere una presión mínima de aproximadamente 40 psi para iniciar el movimiento y a partir de 65 psi se alcanza un rendimiento más significativo.



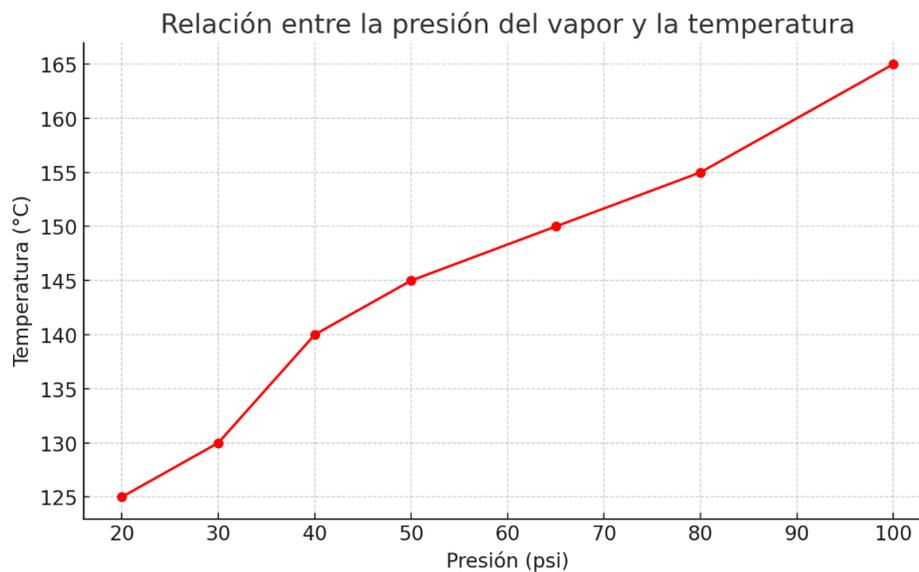
Este análisis permite definir un rango operativo óptimo para el prototipo, lo cual es fundamental para su futura implementación en aplicaciones prácticas de microgeneración eléctrica.

5.4. Análisis de la relación entre la presión del vapor de agua y la temperatura

En sistemas termodinámicos que involucran vapor de agua, como la microturbina tipo Tesla, la relación entre la presión y la temperatura del vapor es fundamental para entender su comportamiento y optimizar su uso como fluido de trabajo.

El vapor de agua saturado cumple una relación directa entre presión y temperatura, expresada por la curva de saturación en las tablas termodinámicas o diagramas de vapor (Çengel & Boles, 2015). A medida que la presión aumenta, la temperatura de saturación también se incrementa, lo que implica que el vapor puede contener mayor energía térmica antes de comenzar a condensarse.

Figura 40. Relación entre la presión del vapor de agua y la temperatura



Nota. Elaboración propia



El propósito de este análisis es establecer la relación directa entre la presión del vapor (en psi) y la temperatura del mismo (en °C), en el contexto del funcionamiento de la microturbina de vapor tipo Tesla. Esta relación es clave para garantizar un funcionamiento eficiente del sistema, ya que la energía disponible para la conversión mecánica depende directamente de estas variables termodinámicas. La Figura 41 muestra la evolución de la temperatura en función del aumento de la presión del vapor.

El análisis confirma que el aumento de la presión del vapor implica un aumento de su temperatura, con una relación predecible y progresiva. Este comportamiento es característico del vapor saturado y resulta fundamental para el diseño térmico y estructural de la microturbina.

Conocer esta relación permite controlar con mayor precisión el punto de operación ideal, optimizando así la eficiencia del sistema y reduciendo riesgos por sobrepresión o sobrecalentamiento.

5.5. Integración

5.1.1. *Conexión con la caldera*

La integración de la microturbina Tesla con la caldera existente en el laboratorio de la facultad de Ingeniería Mecánica de la UNSAAC es un proceso fundamental para asegurar que el sistema funcione de manera eficiente como una unidad de generación de energía. La caldera se utilizará como fuente de vapor, la cual alimentará a la microturbina para convertir la energía térmica del vapor en energía mecánica y, posteriormente, en energía eléctrica. Para que esta integración sea efectiva, es necesario garantizar una correcta compatibilidad entre los parámetros de la caldera y las especificaciones de la microturbina, tales como la presión de vapor, el flujo másico y la temperatura de operación (Cengel & Boles, 2015).



El proceso de integración comienza con la conexión de la salida de vapor de la caldera a la entrada de la microturbina. La presión de operación de la caldera debe ser capaz de generar un flujo de vapor continuo y estable que cumpla con los requerimientos de la microturbina Tesla, que en este caso está diseñada para operar eficientemente con vapor a altas velocidades. Además, es necesario implementar válvulas de control de presión y temperatura para regular el flujo de vapor hacia la turbina, lo que permitirá ajustar el rendimiento de la turbina según las condiciones de operación del sistema global (Moran, Shapiro, Boettner, & Bailey, 2014)

Otro aspecto importante en la integración es la disposición del sistema de escape de vapor. Una vez que el vapor ha pasado por la microturbina y ha transferido su energía mecánica a los discos, debe ser dirigido hacia un condensador, de acuerdo con el diseño final. La integración del sistema de escape garantiza que no haya acumulación de presión en la salida de la turbina, lo cual podría reducir la eficiencia del ciclo de conversión de energía. Este proceso debe ser diseñado con mucho cuidado para minimizar las pérdidas de energía térmica y asegurar que el sistema funcione de manera óptima y sostenible (Eastop & McConkey, 2009).

5.1.2. Sistemas de control

La operación eficiente y segura de una microturbina Tesla depende en gran medida de la implementación de sistemas de control que regulen y supervisen las condiciones operativas de la turbina. Estos sistemas son fundamentales para maximizar el rendimiento energético, garantizar la estabilidad del sistema y proteger los componentes mecánicos y eléctricos de posibles sobrecargas o fallos. Para la microturbina Tesla, los principales sistemas de control que pueden ser implementados incluyen el control de presión y flujo de vapor, el control de velocidad de rotación, el control de generación eléctrica y los sistemas de seguridad.



1. Control de Presión y Flujo de Vapor: Este sistema es esencial para asegurar que el vapor ingrese a la microturbina en las condiciones óptimas para su operación. Se utilizan válvulas de control automáticas que regulan tanto la presión como el caudal de vapor que llega a la turbina, manteniendo estos parámetros dentro de los rangos diseñados para evitar sobrepresiones que puedan dañar los discos de la turbina o reducir su eficiencia.
2. Control de Velocidad de Rotación: La velocidad de los discos en una microturbina Tesla es crítica para su rendimiento, ya que influye directamente en la conversión de la energía térmica del vapor en energía mecánica. Un sistema de control de velocidad monitorea la velocidad de rotación de los discos, generalmente utilizando un tacómetro, y ajusta la entrada de vapor para mantener la velocidad dentro de los límites óptimos. Este sistema también previene que la turbina opere a velocidades que superen la resistencia mecánica de los materiales, lo que podría causar fatiga o incluso rotura de los discos (Shigley & Mischke, 2015)



CAPÍTULO 6: ESPECIFICACIONES TECNICAS

En este capítulo se describen las especificaciones técnicas adoptadas para la construcción del prototipo de la microturbina de vapor tipo Tesla. Estas especificaciones se dividen en dos secciones principales: materiales y equipos seleccionados, y especificaciones técnicas para la construcción y ensamblaje del prototipo.

6.1. Materiales y equipos seleccionados

Los materiales fueron seleccionados con base en criterios de resistencia mecánica, resistencia a la corrosión por vapor de agua y facilidad de manufactura:

- **Discos y separadores:** Los discos deben ser lisos y delgados de acero inoxidable AISI 304, debido a su alta resistencia a la corrosión y buena resistencia mecánica a temperaturas de hasta 400 °C.
- **Eje central:** El eje central conecta todos los discos, permitiendo que giren como un solo conjunto. El eje debe de ser suficientemente fuerte para resistir las fuerzas centrifugas sin deformarse.
- **Carcasa:** Es diseñado para contener los discos y dirigir el flujo de vapor a través de ellos. Asi mismo es de carbono con recubrimiento interno resistente a la corrosión, diseñado para soportar la presión interna de 0,34 MPa y una temperatura de operación de 138 °C.

6.2. Fabricación de componentes principales

6.2.1. Discos

Se fabricaron 14 discos de acero inoxidable AISI 304, cada uno de 23 mm de diámetro y un espesor de 0.4 mm.

El proceso de fabricación consistió en:



Corte: Se empleó sistemas de corte por plasma para garantizar una alta precisión en el diámetro exterior, en el orificio centrales de 36 mm, coincidentes con el eje y en los orificios de los discos.

- ✓ **Acabado de bordes:** Los bordes fueron lijados y pulidos para eliminar rebabas que pudieran afectar el flujo de vapor.

6.2.2. Separadores

Se fabricaron 15 separadores circulares también en acero inoxidable AISI 304, con las siguientes características:

- **Diámetro exterior:** 92 mm
- **Espesor:** 0.4 mm
- **Corte:** Realizados mediante el sistema de corte plasma.
- **Ajuste al eje:** Se perforaron con un orificio central de 36 mm para encajar sobre el eje de manera precisa.

Estos separadores aseguran el espaciamiento uniforme entre los discos, creando las cámaras de flujo necesarias para el principio de funcionamiento de la turbina Tesla.

6.2.3. Eje

El eje principal fue torneado a partir de acero aleado, con las siguientes especificaciones:

- **Diámetro:** 36 mm a lo largo del cuerpo principal.
- **Longitud:** 345 mm, considerando los espacios para los cojinetes y los anclajes del conjunto de discos.
- **Roscado:** Se realizaron roscas M36 en los extremos para el montaje de tuercas de fijación de los discos.

El eje fue sometido a tratamiento térmico para incrementar su dureza y resistencia a la fatiga.



6.2.4. *Carcasa*

La carcasa se construyó en acero de bajo carbono, soldada a partir de planchas de 5 mm de espesor.

Características:

- **Forma cilíndrica** con un diámetro interno de 300 mm.
- **Puntos de acceso:** Se incorporaron bridas roscadas para la entrada de vapor y la salida de vapor de escape.
- **Recubrimiento interno:** Se aplicó una pintura epóxica resistente a altas temperaturas para mejorar la resistencia a la corrosión.

6.3. Especificaciones técnicas de la construcción

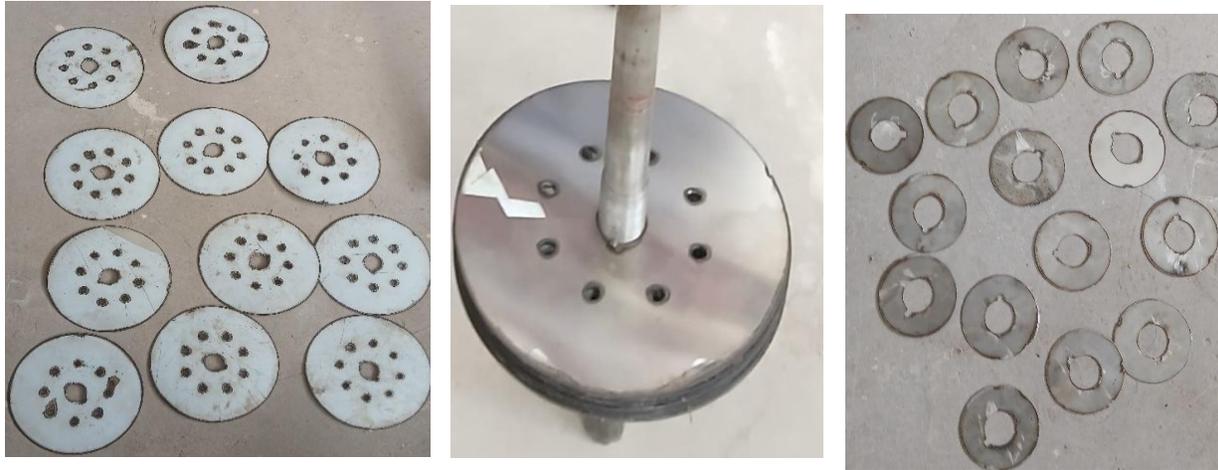
6.3.1. *Montaje del rotor*

El conjunto rotor fue armado insertando alternadamente los discos y separadores sobre el eje. El orden de montaje fue:

1. Colocación de un disco.
2. Colocación de un separador.
3. Repetición de la secuencia hasta completar los 14 discos y 13 separadores.
4. Fijación del conjunto mediante tuercas especiales en los extremos del eje.

Se aseguró que todos los discos estuvieran perfectamente centrados y paralelos entre sí.

Figura 41. Discos, separadores en el eje de la turbina Tesla



Nota. Elaboración propia

6.3.2. Instalación en la carcasa

El rotor completo se instaló dentro de la carcasa, utilizando soportes de cojinetes auto lineales en cada extremo del eje. Se dejó un pequeño margen radial (aproximadamente 5 mm) entre los bordes exteriores de los discos y la carcasa para permitir el libre giro del rotor y reducir las pérdidas por fricción.

Figura 42. Carcasa con los discos, separadores y eje de la Turbina Tesla



Nota. Elaboración propia

6.3.3. Entrada de vapor

Se fabricó una boquilla de entrada de vapor tipo tobera convergente-divergente, orientada tangencialmente al conjunto de discos, de modo que el vapor ingrese de forma laminar, favoreciendo el principio de adherencia y viscosidad que rige el funcionamiento de la turbina Tesla.

6.4. Fluido de trabajo

Vapor de agua usado para transferir la térmica en energía mecánica, el vapor debe ser alimentado a una presión y temperatura específica.



Figura 43. Turbina Tesla en funcionamiento



Nota. Elaboración propia



CAPÍTULO 7: EVALUACION ECONÓMICO

En el presente capítulo, se desarrollará un estudio económico con el fin de indicar los costos de fabricación, adaptaciones del sistema de turbina, construcción de la turbina, los costos de la experimentación, costos de operación, el costo de ingeniería y finalmente conocer el costo total del estudio realizado.

Cabe mencionar que, no se desarrollará un análisis económico de rentabilidad propiamente dicho, debido a que, este es un proyecto experimental de investigación con fines académicos.

7.1. Costos del proyecto

Todos los costos están determinados en moneda nacional (soles) para cotizaciones a mes de enero del 2024 al mes de mayo del 2025.

7.2. Costos de fabricación y operación

Los costos de fabricación están determinados por el metrado de materiales y de consumibles utilizados para la fabricación de la turbina (discos de turbina), así como, el metrado de la mano de obra necesaria, el mantenimiento de los equipos del laboratorio.



Tabla 21

Costo total de fabricación y operación de la micoturbina de vapor tipo Tesla

ITEM	COSTOS DE FABRICACIÓN	
1	Materiales	260.00
2	Consumibles materiales de instalación	872
3	Costos de operación	78.86
4	Costos de ingeniería	3020.00
-	TOTAL* (S/)	3990.86

Nota: Costo total de fabricación, materiales consumibles, accesorios y operación de 01 turbinas de vapor tipo Tesla (rodetes de discos paralelos).

7.2. Costos de materiales y construcción

Los costos de experimentación están determinados por el metrado de materiales, de consumibles y de la mano de obra utilizados para la experimentación de la turbina tesla

Tabla 22

Metrado de materiales para fabricación

ITEM	MATERIALES DE FABRICACIÓN				
N°	Descripción	Unidad	Cant.	C. Unitario (S/)	C. Total (S/)
1	Plancha inoxidable 1.2m x 2.4m	un	1	150	150.0
2	Maquinado del eje de turbina de 0.45 m x 0.032m.	un	1	100	100.0
3	Maquinado de chaveta de eje	un	1	10	10
				Sub Total (S/)	260.0

Nota. Fuente: Elaboración propia.



7.3. Costos de materiales consumibles

Los costos directos de materiales consumibles se refieren a los recursos que se necesitan para la instalación de los accesorios y materiales usados en el sistema de vapor, para poner en funcionamiento el banco de pruebas y así proceder con los trabajos de experimentación.

Tabla 23

Medrado de materiales para experimentación

2 Materiales					
N°	Descripción	Unidad	Cant.	C. Unitario	C. Total
				(S/)	(S/)
1	Cinta teflón	Un	3	3	9
3	Soguilla asbesto grafitada	Un	1	45	45
4	Combustible diesel	Gl	50	15.5	775
5	Manómetro de seco 350 psi – 20 bar	Un	1	15	15
6	Reductor bushing ¾” a ½ “	Un	1	9	9
7	Unión T galvanizado	Un	1	7	7
8	Grasa negra grafitada	Un	1	12	12
Sub Total (S/)					872

Fuente: Elaboración propia

7.4. Costos de materiales consumibles

Los costos directos de operación se refieren a los recursos que se necesitan para poner en funcionamiento el banco de pruebas y así proceder con los trabajos de experimentación.



Tabla 24

Medrado de costo total de operación de la microturbina Tesla

3 COSTOS DE OPERACIÓN					
N°	Descripción	Unidad	Cant.	C. Unitario	C. Total
				(S/)	(S/)
1	Vapor de agua*	m3	0.45	3.04	1.36
2	Combustible (Diesel)**	gl	5	15.5	77.5
				Total (S/)	78.86

Nota. () Se refiere al consumo de galones de agua vaporizadas por cada prueba, (**) se refiere a la cantidad galones de combustible utilizado por cada prueba.*

Fuente: Elaboración propia.

7.5. Costos de Ingeniería

Los costos directos de ingeniería se refieren a las labores realizadas para poder desarrollar el estudio, debido a que es un proyecto experimental donde se está adquiriendo conocimiento nuevo.



Tabla 25

Metrado de costo total de ingeniería de microturbina tesla

4 COSTOS INGENIERÍA							
N°	Descripción	Cant.	Días	HH/día	HH	C. Unitario	C. Total
					total	(S/)	(S/)
1	Tesista 1	1	10	8	80	12.50	1130.0
2	Tesista 2	1	10	8	80	12.50	1130.0
3	Elaboración de planos	1	3	4	12	10.00	120.0
4	Interpretación de datos	1	8	8	64	10.00	640.0
						Total (S/)	3020.0

Fuente: Elaboración propia.



CONCLUSIONES

- La microturbina de vapor tipo Tesla diseñada y construida en esta investigación demuestra ser una solución viable para convertir energía térmica en energía mecánica, logrando una potencia de 0.5 kW con un rendimiento eficiente, lo que valida su efectividad para aplicaciones de pequeña escala.
- El uso de discos de acero inoxidable en la turbina asegura una alta resistencia a la corrosión y al desgaste, lo que contribuye significativamente a su durabilidad y fiabilidad a largo plazo.
- La turbina Tesla, al eliminar los álabes convencionales, reduce el desgaste mecánico y simplifica su construcción, ofreciendo una solución eficiente, compacta y de bajo mantenimiento.
- La turbina ha demostrado funcionar eficazmente bajo condiciones controladas, aunque su eficiencia y rendimiento dependen de factores como la presión y temperatura del vapor, así como del espaciado entre los discos.
- Las simulaciones realizadas en ANSYS demostraron que la turbina puede operar de manera eficiente dentro de los parámetros establecidos, validando su diseño y confirmando que cumple con las expectativas de rendimiento bajo las condiciones previstas.
- La investigación enfrentó limitaciones de recursos, lo que afectó la precisión de algunas mediciones, como el flujo másico de vapor, y la evaluación de la eficiencia energética; sin embargo, los resultados obtenidos siguen siendo valiosos y proporcionan una base sólida para futuras investigaciones con recursos mejorados.
- La turbina Tesla presenta un gran potencial de adaptación a diversas aplicaciones tecnológicas, ya que su diseño flexible le permite operar con diferentes fluidos de trabajo, como agua, vapor, aire y gases, lo que la hace versátil y adecuada para una amplia gama de entornos y necesidades energéticas.



- El bajo costo de construcción de la turbina la hace una opción accesible y viable para aplicaciones en entornos rurales o residenciales, donde la disponibilidad de recursos y la necesidad de soluciones energéticas económicas son factores clave.



RECOMENDACIONES

- A lo largo del desarrollo del prototipo, se observó que los parámetros del diseño de los discos, como el diámetro, espesor y la distancia entre ellos, tienen un impacto directo sobre la eficiencia de la turbina. Se recomienda continuar experimentando con diferentes configuraciones de discos y espaciamientos para encontrar el equilibrio ideal que maximice el torque y minimice las pérdidas por fricción.
- Si bien las simulaciones realizadas en ANSYS proporcionaron información valiosa, se recomienda usar una versión de software con mayores capacidades computacionales para refinar la malla y el modelo de turbulencia, lo cual puede mejorar la precisión de los resultados obtenidos, especialmente en zonas críticas de flujo, como las cercanas a los discos y la entrada de vapor.
- Se sugiere investigar el uso de materiales con mejores propiedades térmicas y mecánicas, como aleaciones avanzadas de titanio o cerámicas, para los discos y componentes expuestos al vapor de alta presión. Esto podría mejorar la durabilidad y la eficiencia de la turbina en condiciones de operación extremas.
- Dado que tanto la temperatura como la presión del vapor influyen directamente en la eficiencia de la turbina Tesla, se recomienda implementar un sistema de control más sofisticado que regule estos parámetros para asegurar que la turbina opere siempre dentro de las condiciones óptimas.
- Aunque el prototipo actual está diseñado para generar una potencia de 0.5 kW, sería interesante realizar una versión escalable de la turbina Tesla para evaluar su desempeño en potencias mayores. Esto permitiría estudiar su aplicabilidad en una gama más amplia de sistemas energéticos, tanto en aplicaciones residenciales como industriales.
- La turbina Tesla tiene el potencial de operar con diversos fluidos, como gases o líquidos viscosos. Se recomienda investigar la viabilidad de utilizar estos fluidos en la turbina, lo que podría ampliar su campo de aplicaciones en diferentes tipos de sistemas energéticos.



- Para asegurar el rendimiento y la longevidad del sistema, sería beneficioso integrar tecnologías de monitoreo remoto y mantenimiento predictivo, utilizando sensores para medir variables como la vibración y la temperatura. Esto podría reducir costos operativos y mejorar la eficiencia del mantenimiento de la turbina.
- La microturbina Tesla, dada su sencillez y bajo costo de mantenimiento, podría ser una excelente opción para la generación de energía en áreas rurales o en sistemas energéticos descentralizados. Se recomienda realizar estudios piloto para evaluar su implementación en diferentes contextos, como en comunidades aisladas o instalaciones industriales de pequeña escala.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ackeret. (1952). Cavitation and its effects on turbine design. *Journal of Applied Physics*, 543-548.
- Ackeret, J. (1952). *Las turbinas Tesla en aplicaciones de energía renovable: Un estudio de eficiencia con vapor.*
- Anderson D, L. (2010). Diseño y optimización de turbinas de vapor tipo Tesla.
- Anderson, D. (2010). Diseño y eficiencia en turbinas modernas.
- Anderson, D. L. (2010). Diseño de turbinas Tesla y su impacto en la eficiencia operativa.
- Cengel, A., & Boles, A. (2015). Termodinámica: Un enfoque práctico. *8va ed.*
- Cengel, Y., & Boles, M. (2015). Thermodynamics: An Engineering Approach. *8th ed.*
- Durbin, R. (2008). Rendimiento de las turbinas Tesla con mezclas de fluidos refrigerantes.
- Eastop, T., & McConkey, A. (2009). Applied Thermodynamics for Engineering Technologists. *5th ed.*
- García, J., & López, M. (2021). Ventajas y aplicaciones de las turbinas Tesla: Una revisión reciente. *Editorial Tecnológica.*
- Kestin, J. (1978). *The thermodynamics of water in supercritical states.*
- Kestin, J. (1978). The thermodynamics of water in supercritical states.
- Kim H, S. (2013). Estudio sobre el rendimiento de las turbinas Tesla en diversas condiciones operativas. *Journal of Mechanical Engineering*, 112-120. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jme.2013.03.002>
- Kim, S. (2013). Efficiency of Tesla Turbines in Pumping and Compression Systems. *Journal of Mechanical Systems*, 142-158.
- López Pérez, D., & Martín López, F. (2012). Optimización de calderas para Aplicaciones en Turbinas Tesla. *Integración de Sistemas de Calderas y Turbinas.*
- Lundin, R. (2011). *Diseño y eficiencia de turbinas modernas: Principios y aplicaciones.*
- Lundin, R. (2011). *Diseño de turbinas y su impacto en la eficiencia de los sistemas energéticos.*
- Lundin, R. (2011). *Innovaciones en materiales y diseño en turbinas Tesla.*



- Martínez Sánchez, R. (2015). Componentes de Turbinas de Vapor Tesla: Rotor y Estator.
- Miller, J. A. (2007). Termodinámica y aplicaciones de turbinas en sistemas energéticos.
- Moran, M., & Shapiro, H. (2010). *Fundamentals of Engineering Thermodynamics, 7a ed.*
- Moran, M., Shapiro, H., Boettner, D., & Bailey, M. (2014). *Fundamentals of Engineering Thermodynamics.*
- Munson B, T., & Okiishi T, H. (2013). *Fundamentals of Fluid Mechanics. 7th ed.*
- Navarro García, H. (2017). Selección de Materiales para Turbinas de Alta Eficiencia. *Materiales en Ingeniería Mecánica.*
- Reynolds, O. (2002). Estudio de la optimización de turbinas Tesla para operar con fluidos viscosos. *Journal of Fluid Mechanics*, 233-247. doi:<https://doi.org/10.1017/S0022112002003917>
- Rice, W. (1991). Rendimiento y aplicaciones de las turbinas Tesla en la industria moderna.
- Schlichting, H., & Gersten, K. (2016). *Boundary-Layer Theory. 9th ed.*
- Shigley, J., & Mischke, C. (2015).
- Shigley, J., Mischke, C., & Budynas, R. (2015). *Mechanical engineering design, 9a ed.*
- Spence, H. (2011). *Optimización de turbinas Tesla en sistemas de ciclo Rankine: Un estudio de eficiencia energética.*
- Spence, H. (2011). Estudio sobre la eficiencia de las turbinas Tesla: Comparativa con turbinas tradicionales. *Journal of Energy Engineering*, 112-120.
- Spence, H. (2011). Estudio sobre la implementación de turbinas Tesla en ciclos Rankine y su impacto en la eficiencia energética. *Energy Journal*, 145-156. doi:<https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.03.003>
- Tesla, N. (1913). Patent No. 1061206. *United States Patent and Trademark Office.*
- Valenti, M. (2005). *Investigación sobre la eficiencia de las turbinas Tesla con fluidos no tradicionales.*
- Valenti, M. (2005). *Investigación sobre la eficiencia de las turbinas Tesla con fluidos no tradicionales.*
- Valenti, M. (2005). Versatility and Applications of the Tesla Turbine. *Journal of Applied Mechanics*, 98-104.
- Wagner, W., & Kretschmar, H. (2008). *Thermodynamics of steam and water.*



Wang L. (2014). Avances en la tecnología de turbinas Tesla para aplicaciones industriales.

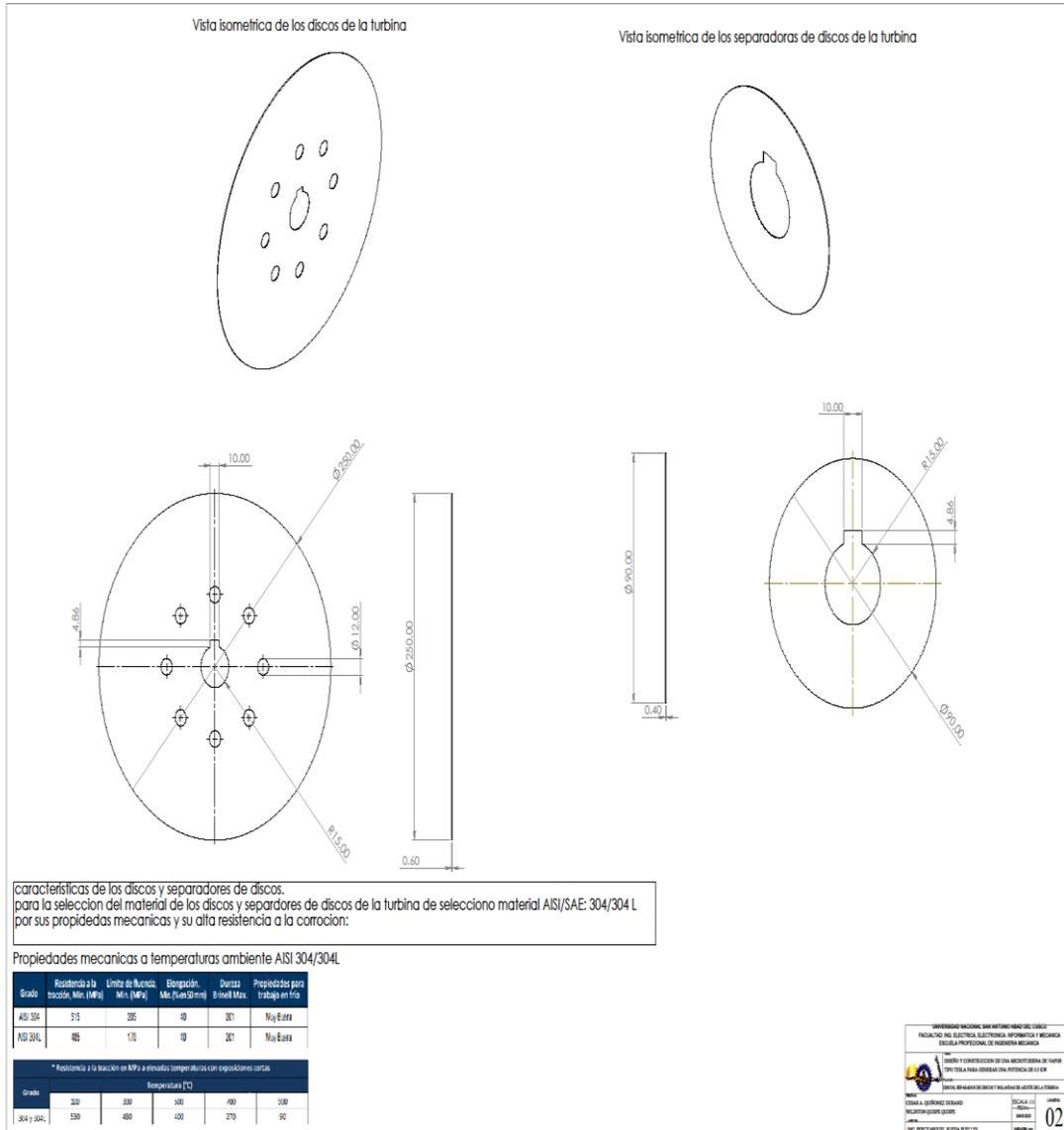
Wang, L. (2014). Avances en la tecnología de turbinas Tesla para aplicaciones industriales.

Wang, L. (2014). Comparative Analysis of Tesla and Conventional Turbines. *Energy Conversion Journal*, 259-267.

Wik, P. (1999). Noise Reduction in Industrial Turbines. *Journal of Industrial Acoustics*, 112-118.



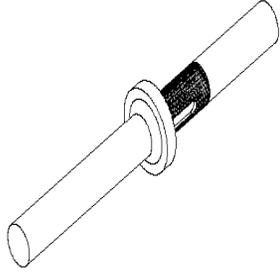
Planos de discos y separadores de discos de la turbina (Anexo B)



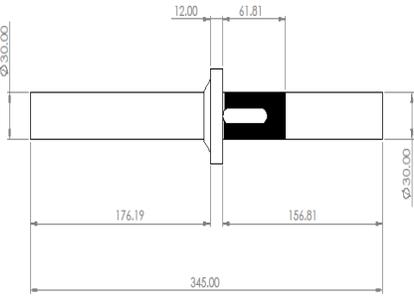


Planos del eje y chaveta de la turbina (Anexo C)

vista isométrica eje de turbina



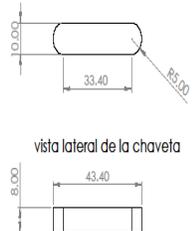
vista eje de turbina



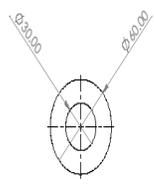
vista isométrica de la chaveta



vista lateral de la chaveta



vista frontal de la chaveta



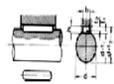
Especificaciones técnicas:
para el diseño y selección de la chaveta de la turbina de vapor tipos testa se considero los siguientes parametros:

1.- La chaveta deberá dimensionarse de manera que pueda transmitir el mismo par de torsión que el eje correspondiente.
Por ello, la longitud de la chaveta deberá ser como mínimo igual a 1,5 veces el diámetro del eje.
Chaveta paralela S/DIN-6885/1

Ø Eje d (mm) desde hasta	Medidas del chavetero en el cubo				Medidas del chavetero en el eje para chavetas paralelas y de culla		Medidas de los ejes en el cubo de la rueda	
	Clavete paralelo S/DIN 6885/1	Chaveta de culla S/DIN 3659 y 3687	h	l	h	l	Ø mín. desde hasta	Tol. H7
10-20	6x7	4x5	0.1	0.1	0.1	0.1	10-18	+0.018
25-30	8x7	6x5	0.1	0.1	0.1	0.1	20-30	+0.025
35-40	10x8	8x6	0.2	0.2	0.2	0.2	30-40	+0.030
45-54	12x8	10x7	0.2	0.2	0.2	0.2	40-50	+0.035
55-65	14x10	12x8	0.3	0.3	0.3	0.3	50-60	+0.040
75-85	16x10	14x10	0.3	0.3	0.3	0.3	60-70	+0.045
95-110	18x12	16x12	0.4	0.4	0.4	0.4	70-80	+0.050
120-140	20x12	18x12	0.4	0.4	0.4	0.4	80-100	+0.055
150-175	22x14	20x14	0.5	0.5	0.5	0.5	100-130	+0.060
180-210	24x16	22x16	0.5	0.5	0.5	0.5	130-150	+0.065
220-250	26x16	24x16	0.5	0.5	0.5	0.5	150-180	+0.070
280-300	28x18	26x18	0.6	0.6	0.6	0.6	180-200	+0.075

Zonas de tolerancia en el ancho de los chaveteros

TIPO DE AJUSTE	Chavetero Eje	Chavetero Rueda
A Presión	H9	H9
Ligero	M9	J9
Deslizante	H8	D10



Los chaveteros de eje y rueda deberán tener los bordes redondeados para evitar grietas y posteriores roturas.

Especificaciones técnicas del eje:
para el diseño y selección del eje de la turbina de vapor tipos testa se considero los siguientes parametros:

1.- El eje deberá dimensionarse de manera que capacidad de soportar cargas rotacionales, la transmisión de potencia, y su diseño para soportar esfuerzos de tensión y flexión.
Por ello, se selecciono un eje del siguiente características del material AISI / SAE 1045 con un diámetro de 1 1/8 de plg.

NORMAS TÉCNICAS:
Propiedades Mecánicas:
SAE J403 (1045), ASTM A36 / A36M, y NTP 350.400

CALIDAD	USOS
ASTM A36	Estructuras metálicas, puertas, ventanas, vigas, cerros, barras de transferencia para pavimento rígido, etc. También para recalcado y mecanizado.
SAE 1045	Pernos y tuercas por recalcado en caliente o mecanizados, ejes, giras, pasadores, etc.

NOTA: el eje de la turbina de 1 3/8" fue mecanizado (torneado) al diámetro interior de los discos según los cálculos realizados.

UNIVERSIDAD NACIONAL SAN ANTONIO ABBAD DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTROTECNOLÓGICA Y MECÁNICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA

INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL DE UNA MENTORABIA DE VAPOR
PROYECTO PARA GENERAR UNA POTENCIA DE 10 KW

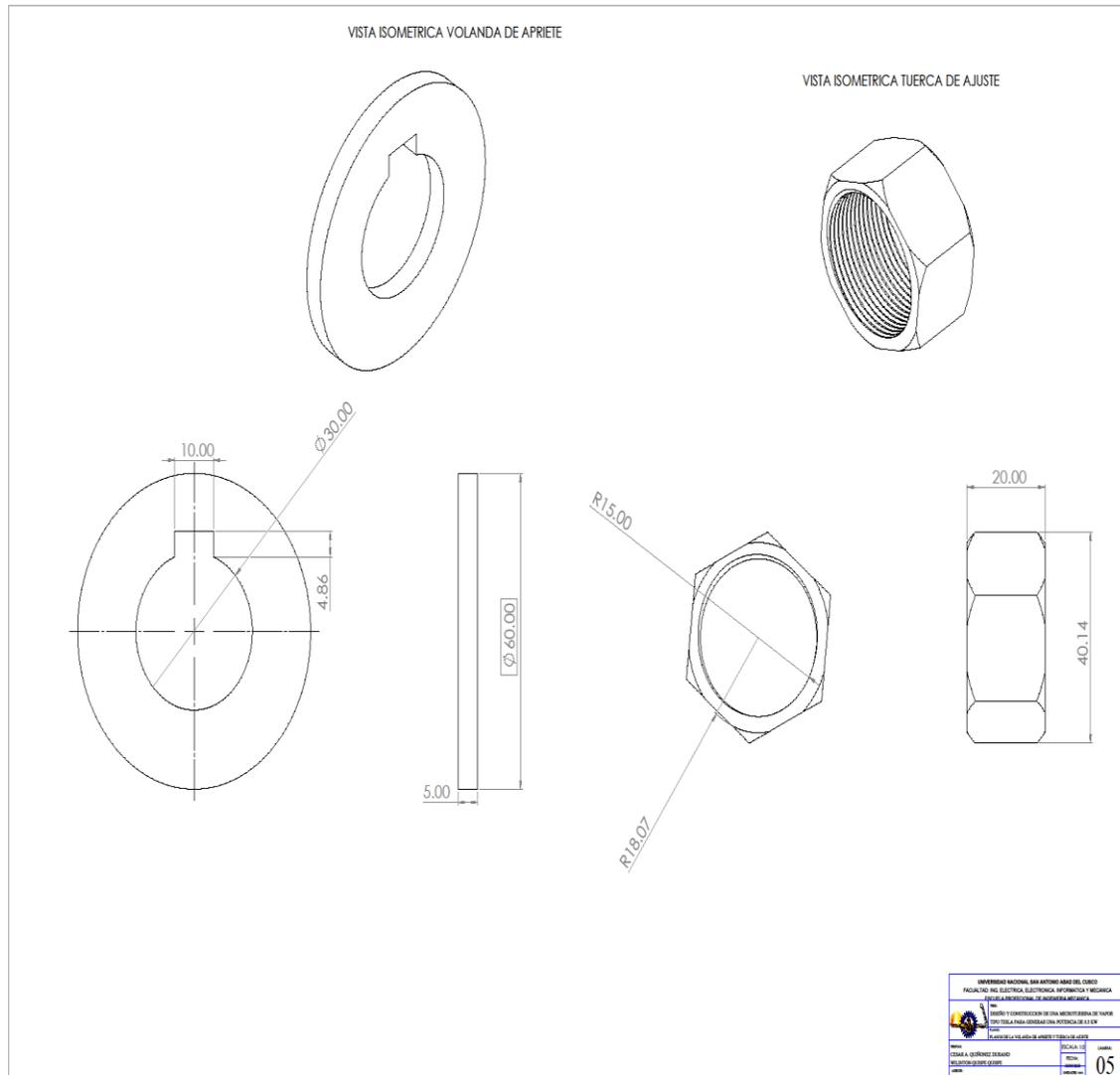
PLAN DE LA LÍNEA DE LA TURBINA DE VAPOR

FECHA: 03/08/2020
AUTOR: CESAR A. QUISPEZ SUZUANO
REVISOR: CESAR QUISPEZ SUZUANO
PROFESOR: ING. FORTALEZA BUENIA PUEBLAS

ESCALA: 1:1
PÁGINA: 03



Planos y dimensiones de la volanda de apriete y tuerca de ajuste (Anexo E)



Panel fotográfico del proceso de construcción y pruebas de la turbina (Anexo F)

PANEL FOTOGRAFICO CONSTRUCCION Y PRUEBAS DE LA TURBINA DE VAPOR TIPO TESLA

CONSTRUCCIÓN DE LA TURBINA

figura N° 01

FIGURA N° 02



Imagen de los ejes con los discos

Colocación de los 14 discos de rotación y 13 separadores de discos

REGISTRO DE PRE-PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DE LA TURBINA

figura N° 03

FIGURA N° 04



Primera vista de instalación

Registro de funcionamiento de la turbina vapor tesla a bajas presiones