



Diseño y Construcción de Turbina Libre para la Generación de Energía

JHOAN ALEXANDER BARRIOS Z. Y MIGUEL ANGEL BERNAL M.
TUTOR. MSC JEFFERSON ZAMBRANO ANGEL

FACULTAD: INGENIERÍA // PROGRAMA: INGENIERÍA AERONÁUTICA

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA TURBINA LIBRE PARA GENERACIÓN DE
ENERGÍA

JHOAN ALEXANDER BARRIOS ZÁRATE
MIGUEL ANGEL BERNAL MALDONADO

FUNDACIÓN UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA AERONÁUTICA
BOGOTÁ D.C.
2015

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA TURBINA LIBRE PARA GENERACIÓN DE
ENERGÍA

JHOAN ALEXANDER BARRIOS ZÁRATE
MIGUEL ANGEL BERNAL MALDONADO

Trabajo de grado para optar al título de
Ingeniero Aeronáutico

Tutor:
Msc Jefferson Zambrano Ángel

FUNDACIÓN UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA AERONÁUTICA
BOGOTÁ D.C.
2015

Nota de Aceptación:

Firma del Presidente del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Bogotá D.C., Agosto de 2015

DEDICATORIA

Inicialmente deseo dedicarle este trabajo de grado a todas las personas que siempre creyeron en mis capacidades, capacidades que tenemos todos, es grato saber la fuerza y determinación que poseemos cuando queremos alcanzar algo.

A Dios por ser siempre ese sentimiento de alegría, tranquilidad y serenidad en cada momento de esta etapa de vida que esta próxima a culminar, espero ser digno por tan valioso esfuerzo. A mis padres, Stella Zárate y Fernando Barrios, no hay un día en el que no le agradezca a Dios el haberme colocado entre ustedes, la fortuna más grande es tenerlos a mi lado. A mis hermanas Jinet, Camila y Laura, gracias por acompañarme siempre y por darme su apoyo durante todo este tiempo. También a mi hermosa Estephany Arias por ser la mujer más bella de este mundo y ser un apoyo incondicional.

Si algo me enseñó esta carrera es que existen personas valiosas, compañeros de promoción con los cuales valió la pena luchar juntos por una meta, si bien a de terminar esta etapa nos queda la satisfacción de haber compartido con personas tan valiosas como ustedes, les doy las gracias por su apoyo y les dedico tan importante trabajo.

JHOAN ALEXÁNDER BARRIOS ZÁRATE

DEDICATORIA

Más que un trabajo de grado, éste es el último paso para culminar uno de los procesos más importantes en mi vida, es por esto que dedico este gran esfuerzo a las personas que me han acompañado en cada instante, brindándome todo su amor y apoyo incondicional.

A mis padres, quienes me enseñaron a ser mejor cada día, a salir adelante y a nunca rendirme ante la adversidad, sin ellos nada de esto hubiera sido posible. A mi hermano, quien es mi más fiel compañero y quien ve con orgullo un modelo a seguir, espero continuar cumpliendo con sus expectativas y ayudarlo a ser aún mejor. También a mis amigas y amigos más cercanos, quienes muchas veces me brindaron una voz de aliento para no desfallecer y seguir con mi camino.

Por último, quiero dedicar este gran esfuerzo a mis compañeros de universidad, con quienes compartimos un sueño y una pasión, pero no solo eso compartimos, también todas las experiencias y enseñanzas que nos dejó esta inigualable carrera y que estoy seguro recordaremos como la mejor etapa de nuestras vidas.

MIGUEL ANGEL BERNAL MALDONADO

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo, deseamos expresar un reconocimiento importante y nuestros agradecimientos a la compañía *Couch Aviation S.A.S*, la cual encabezada por su Gerente General el Ingeniero Jefferson Zambrano Ángel, brindaron asesoría técnica y especializada y contribuyeron con su personal, maquinaria e instalaciones en procesos de maquinado, ensamble y manufactura que fueron de vital importancia para el desarrollo de este trabajo.

Agradecemos también a la compañía *Tec-Laser S.A.*, por brindar el servicio de corte a láser para algunas de las piezas diseñadas y a su asesor el Ingeniero Andrés Rojas, quien fue de una gran ayuda en la consecución ágil y de óptima calidad de dicho servicio.

Además, expresamos un sincero agradecimiento a nuestro compañero de carrera *Nicolás Fernando Correa*, quien asesoró y fue un pilar de gran importancia durante el proceso de modelado y diseño asistido de cada uno de los componentes que conforman el prototipo realizado.

Por último, agradecemos a la *Fundación Universitaria Los Libertadores* y a su programa de Ingeniería Aeronáutica, encabezado por su Director el Ingeniero Andrés Felipe Giraldo, por brindarnos la oportunidad de formar parte de uno de los proyectos más significativos e importantes que se están realizando en la institución.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN.....	23
1. ANTECEDENTES	24
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	26
2.1. DESCRIPCIÓN Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	26
2.2. JUSTIFICACIÓN	26
2.3. OBJETIVOS	27
2.3.1. <i>Objetivo General</i>	27
2.3.2. <i>Objetivos Específicos</i>	27
2.4. ALCANCES	28
2.5. LIMITACIONES	28
3. METODOLOGÍA.....	29
3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN	29
3.2. FASES DEL PROYECTO	29
3.2.1. <i>Fase de Diseño de la Turbina Libre</i>	29

3.2.1. Fase de Construcción de la Turbina Libre	29
4. MARCO TEÓRICO.....	30
4.1. CENTRAL DE CICLO COMBINADO.....	30
4.1.1 Componentes de la Central de Ciclo Combinado.....	30
4.2. TURBINAS	32
4.2.1. Componentes de una Turbina de Flujo Axial.....	34
4.2.2. Configuración Geométrica de los Álabes de Estator.....	35
4.2.3. Configuración Geométrica de los Álabes de Rotor.....	36
4.2.4. Parámetros de Diseño de Turbinas.....	37
4.2.5. Ciclo Termodinámico para Turbinas de Gas (Ciclo Brayton).....	38
5. CÁLCULOS PARA EL DISEÑO PRELIMINAR DE LA TURBINA LIBRE	40
5.1. CÁLCULOS TERMOGASODINÁMICOS DE LA TURBINA LIBRE.....	40
5.1.1. Grado de Reacción de la Turbina Libre.....	42
5.1.2. Triángulos de Velocidades de la Turbina Libre	43
5.2. CÁLCULOS GEOMÉTRICOS DE LA TURBINA LIBRE	50
5.2.1. Expansión Térmica del Rotor de la Turbina Libre.....	51
5.2.2. Dimensionamiento de la Turbina Libre.....	53
5.3. CÁLCULOS PARA LOS ÁLABES DE LA TURBINA LIBRE	55
5.3.1. Diseño de los Álabes para la Turbina Libre.....	55

5.4. CÁLCULOS FINALES PARA LA TURBINA LIBRE.....	58
5.4.1. <i>Diagramas Presión-Volumen y Temperatura-Entropía para la Turbina Libre</i>	59
6. CONSTRUCCIÓN DE LOS COMPONENTES DE LA TURBINA LIBRE .	66
6.1. MODELAMIENTO DE LAS PIEZAS.....	66
6.1.1. <i>Modelamiento de los Álabes de Rotor</i>	66
6.1.2. <i>Modelamiento del Disco Rotor</i>	67
6.1.3. <i>Modelamiento del Anillo Retenedor</i>	67
6.1.4. <i>Modelamiento de los Tornillos Aseguradores</i>	68
6.1.5. <i>Modelamiento del Ensamble del Rotor</i>	69
6.1.6. <i>Modelamiento de los Álabes de Estator</i>	70
6.1.7. <i>Modelamiento del Disco del Estator</i>	70
6.1.8. <i>Modelamiento del Spinner de Turbina</i>	71
6.1.9. <i>Modelamiento de los Rodamientos</i>	72
6.1.10. <i>Modelamiento del Case de Turbina y Tobera</i>	73
6.1.11. <i>Modelamiento del Sello para la Unión del Case</i>	74
6.1.12. <i>Modelamiento del Eje de Turbina</i>	74
6.1.13. <i>Modelamiento del Generador Eléctrico</i>	75
6.1.14. <i>Modelamiento del Soporte de la Turbina</i>	76
6.1.15. <i>Modelamiento Preliminar de la Turbina Libre</i>	76
6.2. ANÁLISIS ESTRUCTURAL COMPUTACIONAL	77
6.2.1. <i>Análisis de los Álabes de Rotor</i>	77
6.2.2. <i>Análisis del Anillo Retenedor</i>	80
6.3. SELECCIÓN DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN.....	82
6.4. FABRICACIÓN DE LOS COMPONENTES.....	84
6.4.1. <i>Construcción Álabes de Rotor y Estator</i>	84
6.4.2. <i>Construcción del Anillo Retenedor</i>	87

6.4.3. Construcción del Disco de Rotor.....	87
6.4.4. Construcción del Disco de Estator.....	88
6.4.5. Construcción del Spinner	89
6.4.6. Construcción del Case de Turbina.....	90
6.4.7. Construcción de la Tobera de Salida.....	91
6.4.8. Construcción del Sello del Case	93
6.4.9. Construcción del Eje de Turbina.....	93
6.4.10. Rodamientos para la Turbina Libre	94
6.4.11. Generador Eléctrico para la Turbina Libre	95
7. ENSAMBLE DEL PROTOTIPO DE TURBINA LIBRE	96
7.1. ENSAMBLE DEL CONJUNTO ROTOR.....	96
7.2. ENSAMBLE DE LA ETAPA DE TURBINA.....	98
7.3. ENSAMBLE DEL CONJUNTO ESTATOR.....	99
7.4. ENSAMBLE DEL CASE DE LA TURBINA LIBRE	100
7.5. ENSAMBLE DEL ROTOR AL GENERADOR ELÉCTRICO.....	100
7.6. ENSAMBLE DEL CONJUNTO COMPLETO DE LA TURBINA LIBRE	101
8. ENSAMBLE FINAL DEL PROTOTIPO DE TURBINA LIBRE	102
9. CONCLUSIONES.....	107
10. RECOMENDACIONES	109
11. BIBLIOGRAFÍA	110

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Condiciones de Entrada a la Turbina Libre	40
Tabla 2. Valores Asumidos para Operación.....	41
Tabla 3. Coeficiente de Expansión Térmica del Acero	52
Tabla 4. Mediciones y Relaciones de Álabes de Estator	56
Tabla 5. Mediciones y Relaciones de Álabes de Rotor.....	56
Tabla 6. Dimensiones y Relaciones para los Álabes de la Turbina Libre	56
Tabla 7. Comparación de Resultados Estructurales	82
Tabla 8. Composición Química del Acero Inoxidable SAE 304	83
Tabla 9. Propiedades Físicas del Acero Inoxidable SAE 304	83
Tabla 10. Diferencia entre los Rodamientos Generales y los Rodamientos de Nitruro de Silicio Especial	114
Tabla 11. Características Generadores Síncronos PMG	116

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Componentes de una Central de Ciclo Combinado.....	31
Figura 2. Configuración Estator-Rotor de una Turbina Axial.....	33
Figura 3. Componentes de una Turbina de Flujo Axial	34
Figura 4. Forma de los Álabes de Estator en Turbinas Axiales	35
Figura 5. Forma de los Álabes de Rotor en Turbinas Axiales.....	37
Figura 6. Diagrama del Ciclo Brayton	38
Figura 7. Diagrama T-S para el Ciclo Brayton	39
Figura 8. Triángulos de Velocidades por Secciones de la Turbina Libre	45
Figura 9. Triángulos de Velocidades con los Ángulos Correspondientes	46
Figura 10. Comportamiento de la Presión y la Velocidad para la Etapa de Turbina Axial de Impulso	48
Figura 11. Comportamiento de la Presión en Cada Sección de la Turbina Libre ..	49
Figura 12. Comportamiento de la Velocidad en Cada Sección de la Turbina Libre	50
Figura 13. Dimensiones de la Turbina Libre	54
Figura 14. Perfil de Ábabe RAF 27 y Sus Coordenadas	55
Figura 15. Diagrama P-V de Turbina Libre	61
Figura 16. Diagrama P-V Ciclo Brayton con el Diagrama P-V del Ciclo de Turbina Libre	62
Figura 17. Diagrama T-S de Turbina Libre.....	64
Figura 18. Diagrama T-S Ciclo Brayton con el Diagrama T-S del Ciclo de Turbina Libre	65

Figura 19. Álabe Rotor Modelado	66
Figura 20. Disco Rotor Modelado.....	67
Figura 21. Anillo Retenedor Modelado	68
Figura 22. Tornillos Ensamble Rotor Modelados	68
Figura 23. Ensamble Rotor Modelado.....	69
Figura 24. Explosionado Ensamble Rotor	69
Figura 25. Álabe Estator Modelado.....	70
Figura 26. Disco Estator Modelado	71
Figura 27. Spinner Turbina Modelado.....	72
Figura 28. Rodamiento Modelado	72
Figura 29. Case Turbina Modelado.....	73
Figura 30. Tobera de Salida Modelada	73
Figura 31. Sello de Caucho Modelado	74
Figura 32. Eje de Turbina Modelado	75
Figura 33. Generador Eléctrico Modelado	75
Figura 34. Soporte Turbina Modelado.....	76
Figura 35. Turbina Libre Preliminar Modelada	76
Figura 36. Carga Radial, Puntos Fijos del Álabe y enmallado	77
Figura 37. Esfuerzo Equivalente Álabe Rotor	78
Figura 38. Deformación Total del Álabe de Rotor	78
Figura 39. Factor de Seguridad Álabe de Rotor.....	79
Figura 40. Soportes Fijos en los Anillos Retenedores y enmallado	80
Figura 41. Deformación Total y Equivalencia de Esfuerzos del Anillo Retenedor ..	81
Figura 42. Factor de Seguridad Anillo Retenedor	82

Figura 43. Corte a Láser de Álabes de Rotor y Estator	84
Figura 44. Trabajo del Perfil en Cada Álabe de Rotor y Estator	85
Figura 45. Conjunto Troquel Macho-Hembra	85
Figura 46. Cámber de Álabes de Rotor y Estator	86
Figura 47. Doble en Puntas Aseguradoras del Álabe de Rotor.....	86
Figura 48. Anillo Retenedor Cortado a Láser.....	87
Figura 49. Fabricación Disco de Rotor	88
Figura 50. Fabricación Disco de Estator	89
Figura 51. Construcción Spinner de Turbina Libre.....	90
Figura 52. Construcción Case de Turbina.....	91
Figura 53. Construcción Tobera de Salida.....	92
Figura 54. Modificaciones Tobera de Salida	92
Figura 55. Sello del Case de Turbina.....	93
Figura 56. Eje de Turbina Libre.....	94
Figura 57. Rodamiento SKF 6005-2Z	94
Figura 58. Generador de Turbina Libre	95
Figura 59. Ensamble de los Álabes en el Disco Rotor	96
Figura 60. Ensamble Final del Rotor de Turbina.....	97
Figura 61. Rotor Cincado	97
Figura 62. Ensamble Etapa de Turbina.....	98
Figura 63. Soldado Álabes de Estator.....	99
Figura 64. Estator Soldado al Case	99
Figura 65. Ensamble Case de Turbina Libre.....	100
Figura 66. Ensamble al Generador Eléctrico	101

Figura 67. Ensamble Final Prototipo Turbina Libre	101
Figura 68. Vista Isométrica del Prototipo de Turbina Libre	102
Figura 69. Vista Superior del Prototipo de Turbina Libre	103
Figura 70. Vista Lateral del Prototipo de Turbina Libre	104
Figura 71. Vista Frontal del Prototipo de Turbina Libre.....	105
Figura 72. Explosionado del Prototipo de Turbina Libre	106
Figura 73. Rodamientos Híbridos SKF	113
Figura 74. Generador Síncrono.....	115
Figura 75. Conjunto Estator Pintado	118
Figura 76. Tobera de Salida Pintada.....	118
Figura 77. Spinner de Turbina Pintado	119
Figura 78. Generador Eléctrico Pintado	119

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. RODAMIENTOS RECOMENDADOS PARA LA TURBINA LIBRE FUNCIONAL	112
Anexo B. GENERADOR ELÉCTRICO RECOMENDADO PARA LA TURBINA LIBRE FUNCIONAL.....	115
Anexo C. PROCESO DE PINTURA PARA EL PROTOTIPO DE TURBINA LIBRE	117
Anexo D. PLANOS GENERALES DEL PROTOTIPO DE TURBINA LIBRE.....	120

NOMENCLATURA

m = *Flujo Másico*

T_1 = *Temperatura a la Entrada de la Turbina Libre*

ΔT = *Salto de Temperatura*

C_p = *Calor Específico a Presión Constante del Gas*

γ = *Relación de Calores Específicos*

R = *Constante Específica del Gas*

P_1 = *Presión a la Entrada de la Turbina Libre*

M_1 = *Número Mach de Entrada a la Turbina*

RPM = *Revoluciones por Minuto*

U = *Velocidad Media del Rotor*

ψ = *Coeficiente de Salto de Temperatura*

K = *Grado de Reacción de la Turbina*

β_2 = *Ángulo de Entrada de la Velocidad Relativa al Rotor*

α_2 = *Ángulo de Entrada de la Velocidad Absoluta al Rotor*

β_3 = *Ángulo de Salida de la Velocidad Relativa del Rotor*

α_3 = *Ángulo de Salida de la Velocidad Absoluta del Rotor*

V_1 = *Velocidad Absoluta de Entrada del Fluido al Estator*

V_2 = *Velocidad Absoluta de Salida del Fluido de los Álabes del Estator*

W_2 = *Velocidad Relativa del Fluido a la Salida de los Álabes del Estator*

V_3 = *Velocidad Absoluta de Salida del Fluido de los Álabes del Rotor*

$W_3 =$ Velocidad Relativa del Fluido a la Salida de los Álabes del Rotor

$T_2 =$ Temperatura en la Sección 2 a la Salida del Estator

$T_2' =$ Temperatura Real en la Sección 2 a la Salida del Estator

$P_2 =$ Presión en la Sección 2 a la Salida del Estator

$T_3 =$ Temperatura en la Sección 3 a la Salida del Rotor

$P_3 =$ Presión en la Sección 3 a la Salida del Rotor

$\rho_1 =$ Densidad del Fluido en la Sección 1 a la Entrada del Estator

$A_1 =$ Área Efectiva de la Sección 1 a la Entrada del Estator

$\rho_2 =$ Densidad del Fluido en la Sección 2 a la Salida del Estator

$A_2 =$ Área Efectiva de la Sección 2 a la Salida del Estator

$\rho_3 =$ Densidad del Fluido en la Sección 3 a la Salida del Rotor

$A_3 =$ Área Efectiva de la Sección 3 a la Salida del Rotor

$A_e =$ Área Promedio Estator

$A_r =$ Área Promedio Rotor

$D_i =$ Diámetro Externo de la Turbina

$D_{e-e} =$ Diámetro Externo del Estator

$D_{e-r} =$ Diámetro Externo del Rotor

$T_{max} =$ Temperatura Máxima de Operación de la Turbina

$T_{min} =$ Temperatura Mínima de Operación de la Turbina

$\Delta D =$ Deformación Térmica de los Álabes de Turbina

$\varepsilon =$ Coeficiente de Expansión del Acero Inoxidable

d_{i-e} = Diámetro Interno del Estator

d_{i-r} = Diámetro Interno del Rotor

θ_r = Ángulo de Posicionamiento de Álabes del Rotor

θ_e = Ángulo de Posicionamiento de Álabes del Estator

h_e = Altura del Álabes del Estator

h_r = Altura del Álabes del Rotor

c = Cuerda del Álabes

t = Espesor del Perfil

s = Paso Entre Álabes

h/c = Relación Altura del Álabes y Cuerda

s/c = Relación Paso y Cuerda

t/c = Relación Espesor y Cuerda

r_m = Radio Medio

r_{m-e} = Radio Medio del Estator

r_{m-r} = Radio Medio del Rotor

N = Número de Álabes

N_e = Número de Álabes Estator

N_r = Número de Álabes Rotor

M_2 = Número Mach de Salida de la Turbina Libre

T = Torque de la Turbina Libre

Pot = Potencia de la Turbina Libre

$\eta_{turbina}$ = Eficiencia de la Turbina Libre

$Vol_1 = \text{Volumen de Gas a la Entrada de la Turbina}$

$Vol_3 = \text{Volumen de Gas a la Salida de la Turbina}$

$m_1 = \text{Masa de Gas a la Entrada de la Turbina}$

$m_3 = \text{Masa de Gas a la Salida de la Turbina}$

$Q_1 = \text{Calor a la Entrada de la Turbina}$

$Q_3 = \text{Calor a la Salida de la Turbina}$

$S_1 = \text{Entropía a la Entrada de la Turbina}$

$S_3 = \text{Entropía a la Salida de la Turbina}$

$n = \text{Número de Masa Molar}$

RESUMEN

El siguiente trabajo presenta el proceso detallado para el diseño y construcción de un prototipo de turbina libre para la generación de energía, con el fin de implementarla en una central de ciclo combinado. Se presenta el fundamento teórico con cada uno de los principios que dan base al diseño conceptual y matemático de la turbina libre; seguido de la modelación CAD (Computer Asisted Design) para cada uno de los componentes que la conforman, así como el análisis computacional de esfuerzos y cargas para las partes más críticas de la turbina. También se presenta todo el proceso de fabricación del prototipo, mencionando paso a paso los procedimientos de manufactura y ensamble que se deben seguir para la elaboración de cada parte de la turbina libre, además de los acabados exteriores y accesorios que la conforman.

Por último, se brindan las recomendaciones y procesos anexos que deben realizarse para que este prototipo de turbina libre sea funcional y pueda implementarse en una central de ciclo combinado, contribuyendo a la generación de energía eléctrica a partir de energía mecánica y el aprovechamiento de energías residuales.

PALABRAS CLAVES

- ✓ Turbina Libre
- ✓ Energía Residual
- ✓ Generador Eléctrico
- ✓ Central de Ciclo Combinado
- ✓ Fabricación
- ✓ Diseño

ABSTRACT

The next report presents the detailed process for design and building of a free turbine prototype for power generation, with the purpose of implement it in a combined cycle power plant. The theoretical basis with each of the principles that based the conceptual and mathematical design of the free turbine is presented; followed by the computer asisted design for each of the components that comprise it, as well as the stress and loads computational analysis for the most critical parts of the turbine. The whole process of manufacture of the prototype is also presented, mentioning step by step the manufacturing and assembly procedures to be followed for the preparation of each part of the free turbine, in addition to the exterior finishes and accesories that make it up.

Finally, the recommendations and additional processes that must be realized in order to this free turbine prototype be functional and can be implemented in a combined cycle power plant are provided, contributing to electrical energy generation from mechanical energy and the use of residual energies.

KEYWORDS

- ✓ Free Turbine
- ✓ Residual Energy
- ✓ Electric Generator
- ✓ Combined Cycle Power Plant
- ✓ Manufacture
- ✓ Design

INTRODUCCIÓN

En la actualidad el aprovechamiento de cualquier tipo de energía en beneficio de la sociedad, es uno de los principales temas de investigación y desarrollo en cualquier parte del mundo.

Una central de ciclo combinado se desarrolla con el objetivo de generar energía eléctrica por medio de diferentes dispositivos mecánicos, que se diseñan y se fabrican específicamente para tal fin.

Uno de estos dispositivos es una turbina libre de gas, la cual tiene como función transformar la energía mecánica del movimiento, en otro tipo de energía aprovechable, como por ejemplo, la energía eléctrica.

Esta turbina libre consta básicamente de un disco rotor y un eje, de allí surge el concepto de “libre”, porque es un mecanismo que aprovecha la energía de un fluido para generar su propio movimiento; además, utiliza otros elementos como una etapa de estator para direccionar y acelerar el flujo en el sentido deseado y un acople especial a un generador que finalmente es el encargado de transformar la energía mecánica en la energía deseada. En este trabajo se diseña y se construye un prototipo de turbina libre modificable, el cual a pesar de no ser funcional, tiene como objetivo contribuir en la implementación de una Central de Ciclo Combinado para la Universidad y así ser pioneros en este tipo de proyectos, logrando un reconocimiento adicional para el programa de Ingeniería Aeronáutica.

1. ANTECEDENTES

Las Centrales de Ciclo Combinado utilizan turbinas de gas y de vapor para la generación de energía, sin embargo, estas centrales son empleadas por las grandes empresas encargadas de suministrar energía eléctrica a las diferentes regiones del país y por lo tanto son compradas a grandes multinacionales dedicadas a la fabricación de estos dispositivos. Siemens una empresa líder en este tipo de tecnología, ofrece en el mercado turbinas de gas dotadas de turbina libre de potencia como la “SG-700 INDUSTRIAL GAS TURBINE”¹, la cual es capaz de generar hasta 30 MW de potencia. No obstante, el desarrollo de turbinas libres para generación de energía en el campo investigativo, es un tema que se aborda en conjunto con las turbinas de gas y no es común que se trabaje individualmente como se realizó en este trabajo.

Un trabajo relacionado con la generación de energía, fue el desarrollado en la Universidad Nacional Mayor de San Marcos en Lima, Perú, titulado; “DISEÑO DE UNA TURBINA DE RÍO PARA LA GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD EN EL DISTRITO DE MAZÁN-REGIÓN LORETO”², el cual tenía como objetivo principal producir energía eléctrica por medio de una turbina tripala acoplada a un generador de imanes permanentes, aprovechando la energía cinética del fluido. Esta turbina de bajo costo podía generar una potencia de 1500W y contribuyó al suministro de energía de dicha población.

En la Universidad de San Buenaventura de Bogotá se realizó el proyecto que lleva como título; “DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA TURBINA PARA UN MOTOR TURBOJET CJ 610-4”³, en el cual su objetivo principal es mejorar el diseño de la turbina tipo axial de este motor con el fin de incrementar su eficiencia total. Con este proyecto se simularon las mejoras mecánicas que proporcionó el nuevo diseño y se afianzaron los fundamentos teóricos que lo soportan.

Como se evidencia anteriormente, son muy pocos los proyectos e investigaciones que tienen que ver con el diseño y construcción específico de turbinas libres. Por esta razón para la realización de este trabajo, se toman como fundamento teórico y de referencia, trabajos e investigaciones que involucran el diseño y fabricación

¹ SIEMENS. Industrial Gas Turbines. SGT-700 INDUSTRIAL GAS TURBINE. [En Línea] [10 de julio de 2015] Disponible en: <<http://www.siemens.com/energy>.>

² MALDONADO QUISPE, Francisco. Diseño de una Turbina de Río para la Generación de Electricidad. Trabajo de Grado. Ingeniería Mecánica. Lima: Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Facultad de Ciencias Físicas. 2005. 69 p.

³ GONZÁLEZ BEJARANO, Leidy Johana y FLÓREZ CASTIBLANCO, Alexandra. Diseño y Simulación de una Turbina para un Motor Turbojet CJ 610-4. Trabajo de Grado. Ingeniería Aeronáutica. Bogotá D.C.: Universidad de San Buenaventura. Facultad de Ingeniería, 2013. 142 p.

de turbinas de gas que sirven como un antecedente relacionado con el tema a tratar en este proyecto.

En la Universidad de Piura en Lima, se desarrolló un trabajo conceptual para el diseño de turbinas titulado; “UNA METODOLOGÍA DE DISEÑO PARA TURBINAS DE GAS DE FLUJO AXIAL”⁴, en este se exponen los fundamentos en la termodinámica, aerodinámica y mecánica para el diseño de turbinas de gas, con el fin de proporcionar una ayuda en su elaboración.

En la Universidad de San Buenaventura de Bogotá se realizó el proyecto que lleva como título; “TURBOFAN ENGINE JP1”⁵, el cual tenía como objetivo principal contribuir en el desarrollo de máquinas térmicas y en el mejoramiento industrial para estos proyectos de investigación. Este motor fue uno de los pioneros en la industria aeronáutica del país y por lo tanto uno de los antecedentes más significativos en este tipo de investigaciones.

Finalmente, uno de los principales antecedentes y que sirvió como base para la realización de este trabajo, fue el desarrollado en la Fundación Universitaria Los Libertadores en Bogotá, denominado; “MOTOR A REACCIÓN RGG1”⁶, el cual tenía como finalidad construir el primer motor a reacción para la universidad y brindar la base principal para el desarrollo de la Central de Ciclo Combinado. Este motor sirvió como punto de partida para la realización del prototipo de turbina libre y servirá también para los demás dispositivos que formarán parte de este gran proyecto.

⁴ ALVARADO VICUÑA, Yury Mike. Una Metodología de Diseño para Turbinas de Gas de Flujo Axial. Trabajo de Grado. Ingeniero Mecánico-Eléctrico. Lima: Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería, 2009. 157 p.

⁵ LLANOS SERNA, Alexander; MANTILLA BARBOSA, Jorge y ZAMBRANO ÁNGEL, Jefferson. Model Design Engine Turbofan JP1. Trabajo de Grado. Ingeniería Aeronáutica. Bogotá D.C.: Universidad de San Buenaventura. Facultad de Ingeniería, 2008. 252 p.

⁶ GONZÁLEZ OLARTE, Oferman Darío; GUTIÉRREZ NOVOA, Jeison Fabián y QUINTERO RODRÍGUEZ, Jairo. Diseño y Construcción de un Turbo Jet Bajo el Funcionamiento de un Turbo Cargador. Trabajo de Grado. Ingeniería Aeronáutica. Bogotá D.C.: Fundación Universitaria Los Libertadores. Facultad de Ingeniería, 2014. 216 p.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1. DESCRIPCIÓN Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Actualmente la generación y el aprovechamiento de la energía en cualquiera de sus formas es un tema que involucra numerosos proyectos de investigación a nivel mundial, es por esto que se busca aprovechar al máximo toda energía generada bien sea proveniente de una fuente natural o de una fuente mecánica. En el ámbito aeronáutico, un motor a reacción es una máquina generadora de dos tipos de energía, una mecánica (empuje) y otra térmica (gases de escape) que no se aprovecha y se disipa en el ambiente en forma de calor.

Es por ello que es conveniente buscar una manera de aprovechar esta energía térmica y preguntarse que tipo de dispositivo podría aprovechar esta energía y transformarla en trabajo útil que brinde beneficios a la industria.

De acuerdo a lo expuesto anteriormente, surge la siguiente problemática:

¿DE QUÉ MANERA SE PUEDEN APROVECHAR LOS GASES DE ESCAPE QUE SE EXPULSAN A LA SALIDA DE LA TOBERA DE UN MOTOR A REACCIÓN PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA?

2.2. JUSTIFICACIÓN

Para dar una solución a la problemática planteada anteriormente, se propone el diseño y construcción de un prototipo de turbina libre como mecanismo para aprovechar la energía térmica generada por el motor a reacción, y a partir de esta crear una fuente generadora de energía aprovechable y consumible para nuestro beneficio.

Esto con el fin de contribuir en el desarrollo sostenible de energía por medios mecánicos, y aplicar los conocimientos teóricos y prácticos que se adquirieron durante el desarrollo de la carrera, promoviendo así la investigación y la realización de este tipo de proyectos.

Además, teniendo en cuenta los avances que tiene la universidad en el campo de los motores y el gran interés que hay hacia esta área, la finalidad de este proyecto de investigación es contribuir en el desarrollo de la primera Central de Ciclo Combinado para la generación de energía construida en la universidad, y así causar un impacto académico, empresarial y tecnológico positivo a nivel nacional por medio de la realización de proyectos tan importantes como éste.

2.3. OBJETIVOS

2.3.1. Objetivo General

Diseñar y construir una turbina libre para generación de energía, con base en el Motor RGG1.

2.3.2. Objetivos Específicos

- ✓ Establecer los requerimientos de diseño preliminar de la turbina libre.
- ✓ Diseñar y calcular una turbina libre para generación de energía.
- ✓ Realizar un diseño asistido por computador de cada uno de los componentes de la turbina libre.
- ✓ Realizar un análisis computacional de esfuerzos y cargas a las partes más críticas de la turbina libre.
- ✓ Construir un prototipo maqueta que sirva como base para la implementación de la turbina libre funcional.

2.4. ALCANCES

Con la realización de este trabajo se pretende lograr los siguientes alcances:

- ✓ Contribuir en la implementación de la Central de Ciclo Combinado para la Universidad como proyecto del programa de Ingeniería Aeronáutica, para así brindar un importante aporte en dicho proyecto.
- ✓ Brindar por medio de la construcción del prototipo, la base para poder implementar una turbina libre totalmente funcional, por medio de la adecuación y modificación de dicho prototipo.
- ✓ Ofrecer a los compañeros de los demás semestres, que están involucrados con el proyecto de la Central de Ciclo Combinado, una base fundamentada para dar continuidad a dicho proyecto.

2.5. LIMITACIONES

Durante la realización de este trabajo se evidenciaron las siguientes limitaciones:

- ✓ Los recursos económicos limitaron este trabajo debido al alto costo de los rodamientos híbridos y a su difícil obtención en el país, ya que son productos de exportación.
- ✓ La realización de procedimientos especiales como los recubrimientos cerámicos, son de difícil ejecución y solamente se llevan a cabo por determinadas empresas en el país.
- ✓ La fabricación de algunos componentes de la turbina libre requieren de alta precisión, por lo que se requirió de personal y maquinaria especializada para dichos procesos de manufactura.

No obstante, y pese a estas limitaciones, el prototipo de turbina libre realizado se puede adecuar para que sea totalmente funcional e implementarse en la Central de Ciclo Combinado, llevando a cabo las recomendaciones que se expondrán más adelante.

3. METODOLOGÍA

3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN

El tipo de estudio utilizado en la presente investigación es descriptivo, ya que se quiere determinar las características físicas, operativas y de funcionamiento de un dispositivo para el aprovechamiento de energía, y en base a esto, diseñar y construir un prototipo de turbina libre. El proyecto se basa en un método de observación cuantitativa. El diseño y la construcción de la Turbina Libre Generadora de Energía se basa en dos fases:

3.2. FASES DEL PROYECTO

3.2.1. Fase de Diseño de la Turbina Libre

Se da inicio con la elaboración de los cálculos de diseño preliminares de la turbina libre, tomando como base las variables de temperatura, presión y velocidad de salida de gases del motor a reacción destinado para trabajar. Esta fase es de gran importancia ya que incluye todos los cálculos de dimensionamiento, cálculos gasodinámicos y termodinámicos y cálculos operacionales para el funcionamiento del mecanismo. Además, de la realización de un modelo de la turbina libre en un sistema CAD, para complementar y dar bases a la construcción física del dispositivo.

3.2.1. Fase de Construcción de la Turbina Libre

La presente fase es la consolidación del proyecto, ya que con base en los cálculos y modelos realizados se procede a construir cada componente de la turbina libre. Para la construcción del prototipo se realizaron diferentes procesos de maquinado y manufactura, tales como el torneado y corte a láser de piezas de alta precisión. Por último, y posterior al ensamble, se dan a conocer todas las recomendaciones para hacer funcional el prototipo construido y su modo de implementación en la Central de Ciclo Combinado para la Universidad.

4. MARCO TEÓRICO

Como la finalidad de construir este prototipo de turbina libre es lograr implementarlo en una central de ciclo combinado en un futuro, a continuación se da a conocer una breve descripción de cómo funcionan estos dispositivos y cuales son sus principales componentes.

4.1. CENTRAL DE CICLO COMBINADO

UNESA, la Asociación Española de la Industria Eléctrica, nos presenta la siguiente definición para una Central de Ciclo Combinado: “Es una central en la que la energía térmica del combustible es transformada en electricidad mediante dos ciclos termodinámicos: el correspondiente a una turbina de gas (Ciclo Brayton) y el convencional de agua/turbina vapor (Ciclo Rankine)”⁷. Como la turbina libre aprovecha los gases de salida del motor a reacción, ésta basa su funcionamiento en el ciclo termodinámico de Brayton, el cual se explicará más adelante.

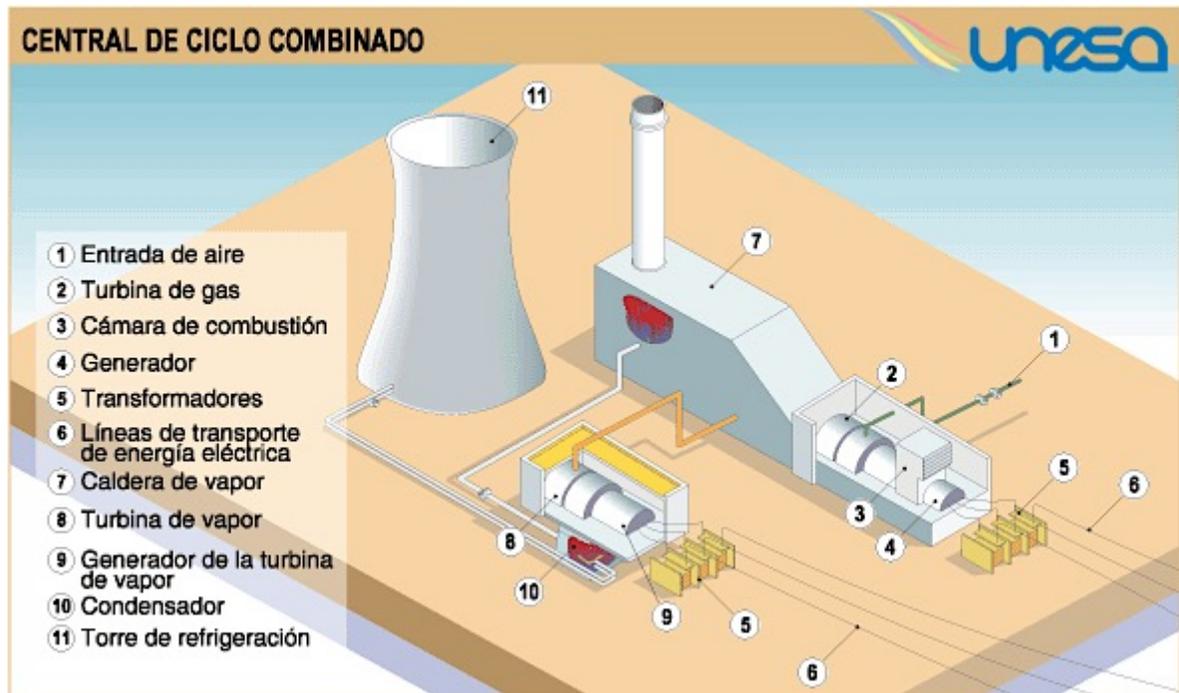
4.1.1 Componentes de la Central de Ciclo Combinado

Una central de ciclo combinado es un dispositivo que cuenta con una gran cantidad de componentes mecánicos que cumplen cada uno con una función específica. Dentro de estos componentes se incluyen los que transportan la energía eléctrica generada hasta su destino final, ya que la finalidad de una central de este tipo es satisfacer las necesidades energéticas de una determinada población.

Dentro de los dispositivos que componen una central de ciclo combinado se encuentran: una entrada de aire, una turbina de gas, una cámara de combustión, generadores eléctricos, transformadores, líneas de transporte de energía eléctrica, una caldera de vapor, una turbina de vapor, un condensador y una torre de refrigeración; como se puede apreciar en la Figura 1.

⁷ UNESA. Asociación Española de la Industria Eléctrica. Sector Eléctrico. Central de Ciclo Combinado. [En Línea] [20 de marzo de 2015] Disponible en: <<http://www.unesa.es/sector-electrico/funcionamiento-de-las-centrales-electricas/1343-central-ciclo-combinado>>

Figura 1. Componentes de una Central de Ciclo Combinado



Fuente: UNESA. Asociación Española de la Industria Eléctrica. Sector Eléctrico. Central de Ciclo Combinado. [En Línea] [20 de marzo de 2015] Disponible en: <<http://www.unesa.es/sector-electrico/funcionamiento-de-las-centrales-electricas/1343-central-ciclo-combinado>>

Cada dispositivo es igual de importante y cumple con una función específica dentro del proceso de generar energía eléctrica. La turbina de gas, consta de un compresor de aire, una cámara de combustión y la cámara de expansión. El compresor comprime el aire a alta presión para mezclarlo posteriormente en la cámara de combustión con el gas. En esta cámara se produce la combustión del combustible con el fin de accionar la etapa de turbina.

Luego de esto, los gases de combustión se conducen hasta la turbina de gas para su expansión. La energía se transforma, a través de los álabes, en energía mecánica de rotación que se transmite a su eje. Esta potencia es la encargada de mover el generador eléctrico que está acoplado a la turbina para la producción de electricidad. Como se observa, este proceso se relaciona directamente con el objetivo de este trabajo, el cual es contribuir a la generación de energía eléctrica por medio de la construcción del prototipo de turbina libre.

4.2. TURBINAS

Comúnmente llamadas turbo máquinas, son usadas para transformar parte de la energía global de un fluido (suma de las energías de presión, cinética e interna debida a la temperatura), en energía mecánica. En un turborreactor esta energía mecánica será la que mueva el compresor y los accesorios, y el remanente de esta energía será la que genere el empuje en el motor, según Sainz Valentín⁸.

Un escalón de turbina esta formado por dos componentes fundamentales, el estator y el rotor, a diferencia del compresor estos están ubicados en el orden estator-rotor-estator-rotor y así continuamente. El salto de presión por escalón es aproximadamente el mismo en las turbinas de tipo axial y centrípeta, de las cuales se hablará a profundidad durante el desarrollo del documento.

El estator de una turbina ya sea axial o centrípeta actúa a modo de tobera, en el caso del estator de una turbina centrípeta su configuración es similar al compresor centrifugo, mientras que en la turbina axial los estatores se encuentran fijos al case del motor con un ángulo tal, que canalizan el fluido hacia el rotor de manera que la dirección sea la más efectiva posible para la transformación de energía cinética en mecánica, tal como lo indica *Martin Cuesta* en su libro de *Motores a Reacción*⁹. Por otro lado, el rotor de una turbina axial consiste en una o varias cascadas de álabes fijos a un disco que gira a alta velocidad por la acción del fluido, transmitiendo este movimiento al compresor, a un generador eléctrico o a lo que se desee mover o accionar con la turbina.

Las turbinas de acuerdo con la dirección de la corriente fluida se pueden clasificar como anteriormente se mencionaba, en turbinas axiales y turbinas centrípetas.

Las turbinas axiales suelen tener mayor uso en el campo aeronáutico de propulsión a reacción, esto debido al alto flujo que pueden trabajar. Estas turbinas axiales se pueden clasificar en dos tipos:

- ✓ Turbinas de Impulso
- ✓ Turbinas de Reacción

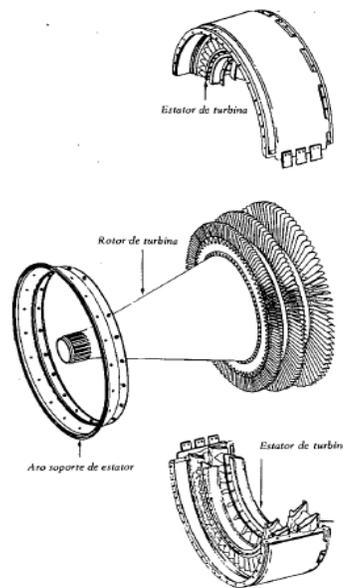
⁸ SÁINZ DÍEZ, Valentín. El Motor de Reacción y sus Sistemas Auxiliares. Capítulo 5. Turbinas. Novena Edición. España. Ed. Paraninfo. 2007. Página 85.

⁹ CUESTA ÁLVAREZ, Martin. Motores a Reacción. Tecnología y Operación de Vuelo. Capítulo IX. Turbinas. Turbinas de Impulso. 5ta Edición. Ed. Paraninfo. 1980. Página 184.

Estas se diferencian básicamente en su grado de reacción, el cual se entiende como la variación entre la energía del rotor, respecto a la variación de energía del conjunto estator-rotor, que físicamente se representa como la relación existente producida entre la expansión del rotor respecto a la expansión del conjunto estator-rotor, esto es explicado detalladamente por *Martin Cuesta*¹⁰. El trabajo proporcionado por una turbina axial es mayor cuanto lo sea la turbina, además de la velocidad del rotor y la deflexión de la corriente.

El trabajo específico que puede obtenerse con un escalón de turbina axial, conjunto estator-rotor, es del orden de 10.000 a 20.000Kg.m, por cada Kg de fluido que la mueve, lo cual es mucho mayor que el necesario para mover un escalón de compresor; es por esa razón que el número de escalones de la turbina es mucho menor que los del compresor, lo cual es explicado por *Sainz Valentín*¹¹.

Figura 2. Configuración Estator-Rotor de una Turbina Axial



Fuente: CUESTA ÁLVAREZ, Martin. Motores a Reacción. Tecnología y Operación de Vuelo. Capítulo IX. Turbinas. Turbinas de Impulso. 5ta Edición. Ed. Paraninfo. 1980. Página 185.

¹⁰ CUESTA ÁLVAREZ, Martin. Motores a Reacción. Tecnología y Operación de Vuelo. Capítulo IX. Turbinas. Turbinas de Impulso. 5ta Edición. Ed. Paraninfo. 1980. Página 185.

¹¹ SÁINZ DÍEZ, Valentín. El Motor de Reacción y sus Sistemas Auxiliares. Capítulo 5. Turbinas. Novena Edición. España. Ed. Paraninfo. 2007. Página 86.

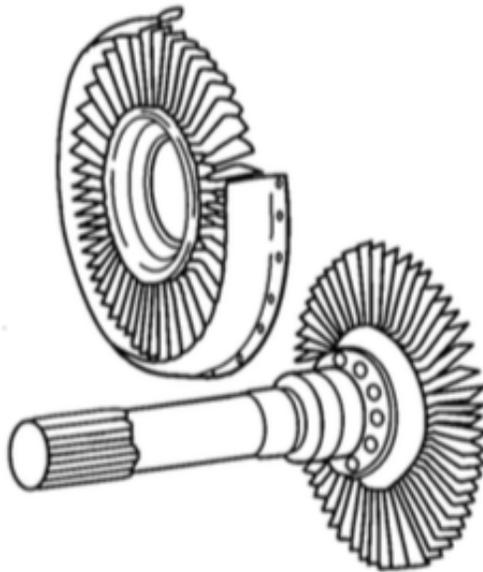
Las turbinas radiales y axiales han sido ampliamente usadas en muchas aplicaciones, entre las que se encuentran pequeños generadores de poder eléctrico, motores turbo cargados y unidades auxiliares de poder en la aeronave.

En cada una de estas aplicaciones la temperatura interna de la turbina se encuentra limitada por las propiedades físicas y químicas de los materiales y de las partes calientes dentro de los rotores, por eso es necesario contar en algunos casos con un sistema de enfriamiento de alabes o recubrimientos cerámicos para poder soportar estas temperaturas tan elevadas.

4.2.1. Componentes de una Turbina de Flujo Axial

Según *Mattingly*¹², una turbina de flujo axial se compone de una rueda de turbina (rotor) y un set de álabes estacionarios (estator) como se muestra en la Figura. 3. Los álabes estacionarios actúan como una tobera para descargar el flujo en el conjunto rotor y así transformar la energía cinética en energía mecánica por medio del movimiento del eje, como se mencionó anteriormente.

Figura 3. Componentes de una Turbina de Flujo Axial



Fuente: MATTINGLY, Jack D. Elements of Propulsion: Gas Turbines and Rockets. United States. Ed. American Institute of Aeronautics and Astronautics. 2006. Página 249.

¹² MATTINGLY, Jack D. Elements of Propulsion: Gas Turbines and Rockets. United States. Ed. American Institute of Aeronautics and Astronautics. 2006. Página 249.

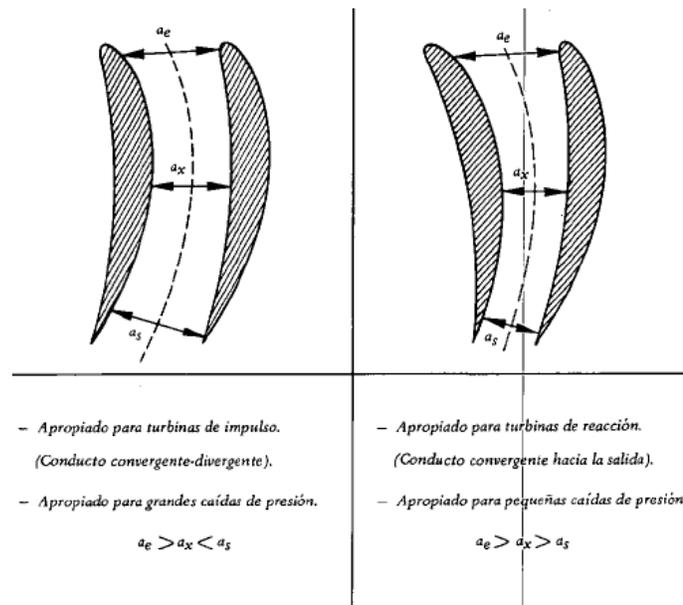
4.2.2. Configuración Geométrica de los Álabes de Estator

Teniendo en cuenta que el objetivo de los álabes del estator es acelerar la corriente de flujo y canalizarla para la descarga, con el ángulo óptimo que exija la velocidad del rotor, la forma y la posición de los alabes deberá ser tal que actúen en forma de tobera y en el caso de que la corriente de entrada sea subsónica se pueden admitir dos configuraciones, las cuales son mencionadas por *Martin Cuesta*¹³:

- ✓ Formando un conducto convergente-divergente, cuando se quiera una elevada caída de presión en el estator.
- ✓ Formando un conducto convergente, cuando la caída de presión es pequeña.

El estator convergente-divergente es apropiado para las turbinas de impulso, como lo es el caso de la turbina libre, mientras que las turbinas de reacción usan una forma convergente, ya que la expansión en el estator es solo parcial.

Figura 4. Forma de los Álabes de Estator en Turbinas Axiales



Fuente: CUESTA ÁLVAREZ, Martin. Motores a Reacción. Tecnología y Operación de Vuelo. Capítulo IX. Turbinas. Turbinas de Impulso. 5ta Edición. Ed. Paraninfo. 1980. Página 185.

¹³ CUESTA ÁLVAREZ, Martin. Motores a Reacción. Tecnología y Operación de Vuelo. Capítulo IX. Turbinas. Turbinas de Impulso. 5ta Edición. Ed. Paraninfo. 1980. Página 186.

4.2.3. Configuración Geométrica de los Álabes de Rotor

La forma diferente de los álabes de rotor para las turbinas axiales de impulso y de reacción, es debido al grado de expansión o caída de presión que existe en ambos casos, *Martin Cuesta* define esto por su grado de reacción K ¹⁴.

Para Turbinas de Impulso:

- ✓ Grado de Reacción $K=0$
- ✓ Velocidades relativas de entrada y salida a los alabes del rotor iguales
- ✓ La presión del fluido es igual a la salida del rotor que a la entrada

Para Turbinas de Reacción:

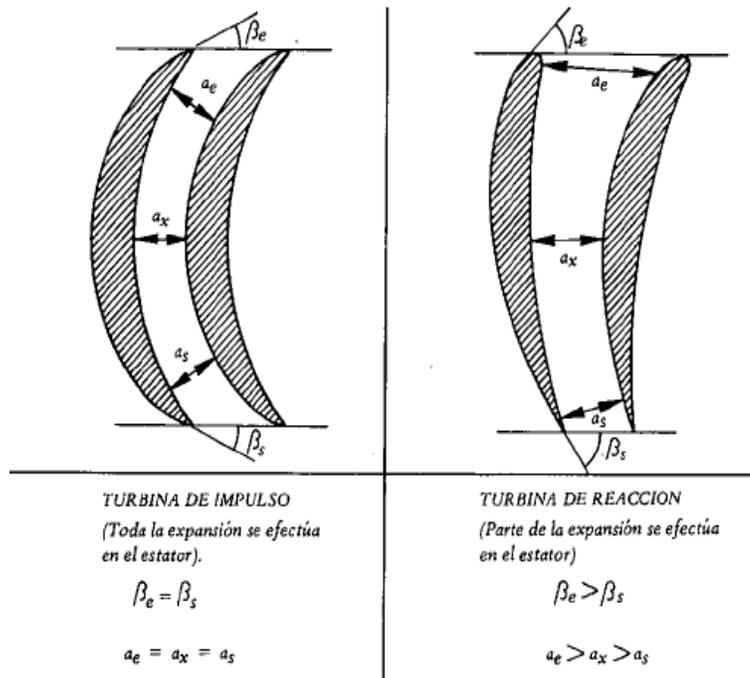
- ✓ Grado de Reacción $K>0$
- ✓ Velocidades relativas de entrada y salida a los alabes de rotor diferentes
- ✓ La presión del fluido es menor a la salida del rotor que a la entrada

Este grado de reacción se puede obtener de la relación expresada en la siguiente ecuación:

$$\tan \beta_3 = \frac{1}{2\phi} \left(\frac{1}{2}\psi + 2K \right) \quad \text{Ecuación 1}$$

¹⁴ CUESTA ÁLVAREZ, Martin. Motores a Reacción. Tecnología y Operación de Vuelo. Capítulo IX. Turbinas. Turbinas de Impulso. 5ta Edición. Ed. Paraninfo. 1980. Página 187.

Figura 5. Forma de los Álabes de Rotor en Turbinas Axiales



Fuente: CUESTA ÁLVAREZ, Martín. Motores a Reacción. Tecnología y Operación de Vuelo. Capítulo IX. Turbinas. Turbinas de Impulso. 5ta Edición. Ed. Paraninfo. 1980. Página 187.

4.2.4. Parámetros de Diseño de Turbinas

Para Mattingly¹⁵, en el diseño de las turbinas se deben considerar los siguientes aspectos:

- ✓ Velocidad de Rotación del Eje,
- ✓ Cantidad de Flujo de Gas,
- ✓ Temperaturas de Entrada y Salida,
- ✓ Presiones de Entrada y Salida,
- ✓ Velocidad de Salida, y
- ✓ Potencia de Salida Requerida

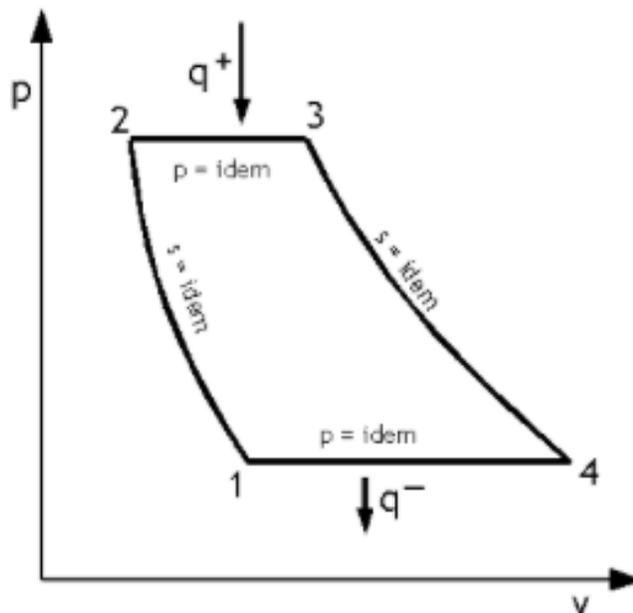
Esto con el fin de obtener un dispositivo eficaz, capaz de brindar los requerimientos de salida para los cuales fue diseñado.

¹⁵ MATTINGLY, Jack D. Elements of Propulsion: Gas Turbines and Rockets. United States. Ed. American Institute of Aeronautics and Astronautics. 2006. Página 249.

4.2.5. Ciclo Termodinámico para Turbinas de Gas (Ciclo Brayton)

La turbina libre a diseñar, al propulsarse por medio de los gases de escape del motor a reacción, se rige bajo el ciclo termodinámico de Brayton, como se mencionó anteriormente. Dicho ciclo describe los procesos termodinámicos que se llevan a cabo dentro de la turbina de gas, como se muestra en la figura.

Figura 6. Diagrama del Ciclo Brayton

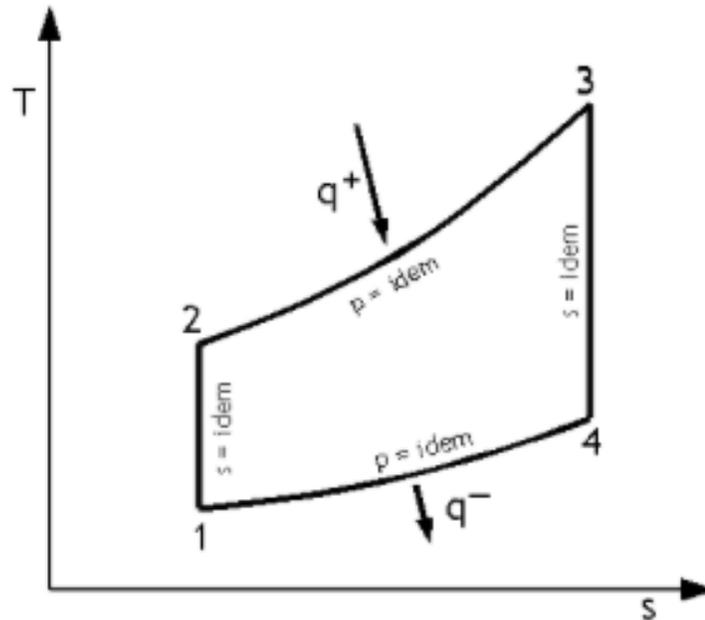


Fuente: Estudio del Ciclo Brayton. Diagramas del Ciclo Brayton. [En línea] [11 de junio de 2015]. Disponible en <http://www.uhu.es/gabriel.lopez/comun/pract_Brayton.pdf>

No obstante, el gráfico anterior corresponde para un motor a reacción analizado idealmente, es decir, sin considerar las pérdidas de energía y las eficiencias mecánicas de los elementos que lo conforman. Es por esta razón que el gráfico presión-volumen para la turbina libre que se plantea, se debe construir calculando los volúmenes de fluido y las correspondientes presiones que se presentan en cada sección de ésta. Dicho gráfico se presentará con el desarrollo de los cálculos de diseño para la turbina libre.

Así mismo, se presenta el diagrama de temperatura-entropía para el Ciclo Brayton en la siguiente figura.

Figura 7. Diagrama T-S para el Ciclo Brayton



Fuente: Estudio del Ciclo Brayton. Diagramas del Ciclo Brayton. [En línea] [11 de junio de 2015]. Disponible en <http://www.uhu.es/gabriel.lopez/comun/pract_Brayton.pdf>

Para este diagrama se presenta el mismo caso mencionado anteriormente, por lo tanto el gráfico de T-S para la turbina libre planteada, se construye a partir del cálculo de las entropías y de las temperaturas correspondientes para cada sección de la misma. . Dicho gráfico, al igual que el anterior, se presentará con el desarrollo de los cálculos de diseño para la turbina libre.

5. CÁLCULOS PARA EL DISEÑO PRELIMINAR DE LA TURBINA LIBRE

5.1. CÁLCULOS TERMOGASODINÁMICOS DE LA TURBINA LIBRE

Los cálculos termogasodinámicos se realizan con el objetivo de explicar el comportamiento del fluido dentro de la turbina libre. Para realizar dichos cálculos se toman los parámetros a la salida del Motor RGG1.

Tabla 1. Condiciones de Entrada a la Turbina Libre

PARÁMETROS DE ENTRADA A LA TURBINA		
Flujo Másico (m)	1,5	kg/s
Temperatura a la Entrada (T_1)	835,83	K
Salto de Temperatura (ΔT)	148	K
Calor Especifico a Presión Constante del Gas (C_p)	1148	$\frac{J}{Kg K}$
Relación de Calores Específicos (γ)	1,33	
Constante Especifica del Gas R	287	$\frac{J}{Kg K}$
Presión a la Entrada de la Turbina (P_1)	187202,4	Pa
Numero Mach de Entrada (M_1)	0,43	

Fuente: GONZÁLEZ OLARTE, Oferman Darío; GUTIÉRREZ NOVOA, Jeison Fabián y QUINTERO RODRÍGUEZ, Jairo. Diseño y Construcción de un Turbo Jet Bajo el Funcionamiento de un Turbo Cargador. Trabajo de Grado. Ingeniería Aeronáutica. Bogotá D.C.: Fundación Universitaria Los Libertadores. Facultad de Ingeniería, 2014.

Basados en el motor RGG1 se propone un diámetro inicial (D_1) para la turbina libre de 93 mm, para con éste estimar la velocidad media del álabe (U) del rotor. A lo largo del desarrollo de los cálculos, el diámetro propuesto puede variar según las necesidades de diseño. Con lo mencionado anteriormente se puede asumir el valor de las RPM en base a la operación del compresor del motor RGG1 y del turbo reactor propuesto de bajo flujo másico, en los cuales se manejan rangos entre 50000 y 80000 RPM. Este rango se da con el fin de tomar valores por encima de la resistencia del material.

Ahora se procede a calcular el valor de la velocidad media del álabe del rotor con la siguiente ecuación:

$$U = \frac{\pi (RPM)(D_1)}{60} \quad \text{Ecuación 2}$$

$$U = \frac{\pi(60000 \text{ RPM})(0,093 \text{ m})}{60} = 292 \text{ m/s}$$

Tabla 2. Valores Asumidos para Operación

VALORES ASUMIDOS		
Número de Revoluciones	60000	RPM
Velocidad Media del Rotor (U)	292	m/s

Fuente: Autores

Como la turbina es de una sola etapa, se asume un ángulo $\alpha_1 = 0^\circ$, lo que significa que la entrada de flujo en la etapa es completamente axial.

Se procede a calcular el coeficiente de salto de temperatura, el cual es necesario para poder calcular el grado de reacción de la turbina libre, con la siguiente ecuación,

$$\psi = \frac{2 C_p \Delta T}{U^2} \quad \text{Ecuación 3}$$

$$\psi = \frac{(2) \left(1148 \frac{J}{Kg K} \right) (148 K)}{(292 \text{ m/s})^2} = 3,98$$

Se asume un coeficiente de flujo $\phi = 0,8$ debido a que la turbulencia que se presenta a la salida del motor RGG1 genera pérdidas y $\alpha_3 = 0^\circ$ para suponer que la turbulencia a la salida de la etapa de turbina es completamente nula debido a que es una sola etapa¹⁶.

¹⁶ ESCOBAR GARZÓN, Arnold. Diseño y Construcción de Turborreactores de Bajo Flujo Másico. Capítulo 5. Diseño de la Turbina. Expansión Térmica del Rotor. Ed. Militar Aeronáutica. 2008. Página 130.

5.1.1. Grado de Reacción de la Turbina Libre

El grado de reacción es la relación entre el trabajo que se desarrolla en el estator y el rotor de la turbina. Existen dos tipos de turbinas, las de reacción y las de impulso. Según *Martín Cuesta*¹⁷, las turbinas de reacción tienen un grado de reacción $K > 0$, y las de impulso un grado de reacción de $K = 0$ o muy cercano a cero, como se mencionó anteriormente. Para determinar el grado de reacción y el tipo de turbina se procede a realizar los cálculos de acuerdo al procedimiento mencionado en el libro *Gas Turbine Theory*¹⁸.

$$\tan \alpha_3 = \tan \beta_3 - \frac{1}{\phi} \quad \text{Ecuación 4}$$

$$\tan (0) = \tan \beta_3 - \frac{1}{0,8}$$

$$\tan \beta_3 = \frac{1}{0,8} = 1,25$$

Así el grado de reacción de la turbina está dado por la relación establecida en la Ecuación 1, para luego despejarla

$$\tan \beta_3 = \frac{1}{2\phi} \left(\frac{1}{2}\psi + 2K \right)$$

$$K = (\phi \cdot \tan \beta_3) - \left(\frac{1}{4}\psi \right) \quad \text{Ecuación 5}$$

$$K = (0,8)(1,25) - \left(\frac{1}{4} \right) (3,98) = 0,005$$

Comparando con la teoría propuesta por *Martin Cuesta* se obtiene como resultado un grado de reacción muy cercano a cero, lo que indica que la turbina libre es de impulso.

¹⁷ CUESTA ÁLVAREZ, Martin. Motores a Reacción. Tecnología y Operación de Vuelo. Capítulo IX. Turbinas. Turbinas de Impulso. 5ta Edición. Ed. Paraninfo. 1980. Página 184.

¹⁸ SARAVANAMUTTO, ROGERS & COHEN . Gas turbine theory. Chapter VII. Axial and radial flow turbines. 4ta Edición. Ed. Macomb. 1986. Página 271.

5.1.2. Triángulos de Velocidades de la Turbina Libre

Con el triángulo de velocidades de la etapa de turbina se pueden determinar los ángulos del flujo y los componente de la velocidad en las diferentes secciones de la etapa de turbina. Los cuales se obtienen con las siguiente formulas.

Como se indico al momento de hallar el grado de reacción se parte de que $\alpha_3 = 0^\circ$, por lo tanto se prosigue a calcular β_3, α_2 y β_2 .

$$\tan \beta_3 = \frac{1}{2\phi} \left(\frac{1}{2}\psi + 2K \right)$$

$$\tan \beta_3 = \frac{1}{(2)(0,8)} \left(\left(\frac{1}{2} \right) (3,98) + (2)(0,005) \right) = 1,25$$

$$\beta_3 = \tan^{-1}(1,25) = 51,34^\circ$$

Ahora se procede a calcular β_2 con la siguiente ecuación.

$$\tan \beta_2 = \frac{1}{2\phi} \left(\frac{1}{2}\psi - 2K \right) \quad \text{Ecuación 6}$$

$$\tan \beta_2 = \frac{1}{(2)(0,8)} \left(\left(\frac{1}{2} \right) (3,98) - (2)(0,005) \right) = 1,23$$

$$\beta_2 = \tan^{-1}(1,23) = 51^\circ$$

Con este valor se calcula α_2 de la siguiente manera,

$$\tan \alpha_2 = \tan \beta_2 + \frac{1}{\phi} \quad \text{Ecuación 7}$$

$$\tan \alpha_2 = 1,23 + \frac{1}{0,8} = 2,48$$

$$\alpha_2 = \tan^{-1}(2,48) = 68^\circ$$

Con los valores de los ángulos, se proceden a calcular las componentes de velocidades del fluido.

$$V_{a2} = V_{a3} = U \cdot \phi = (292 \text{ m/s})(0,8) = 233,6 \text{ m/s} \quad \text{Ecuación 8}$$

$$V_2 = \frac{V_{a2}}{\cos(\alpha_2)} = \frac{233,6 \text{ m/s}}{\cos(68^\circ)} = 623,5 \text{ m/s} \quad \text{Ecuación 9}$$

$$W_2 = \frac{V_{a2}}{\cos(\beta_2)} = \frac{233,6 \text{ m/s}}{\cos(51^\circ)} = 371,2 \text{ m/s} \quad \text{Ecuación 10}$$

$$V_3 = V_1 = \frac{V_{a3}}{\cos(\alpha_3)} = \frac{233,6 \text{ m/s}}{\cos(0^\circ)} = 233,6 \text{ m/s} \quad \text{Ecuación 11}$$

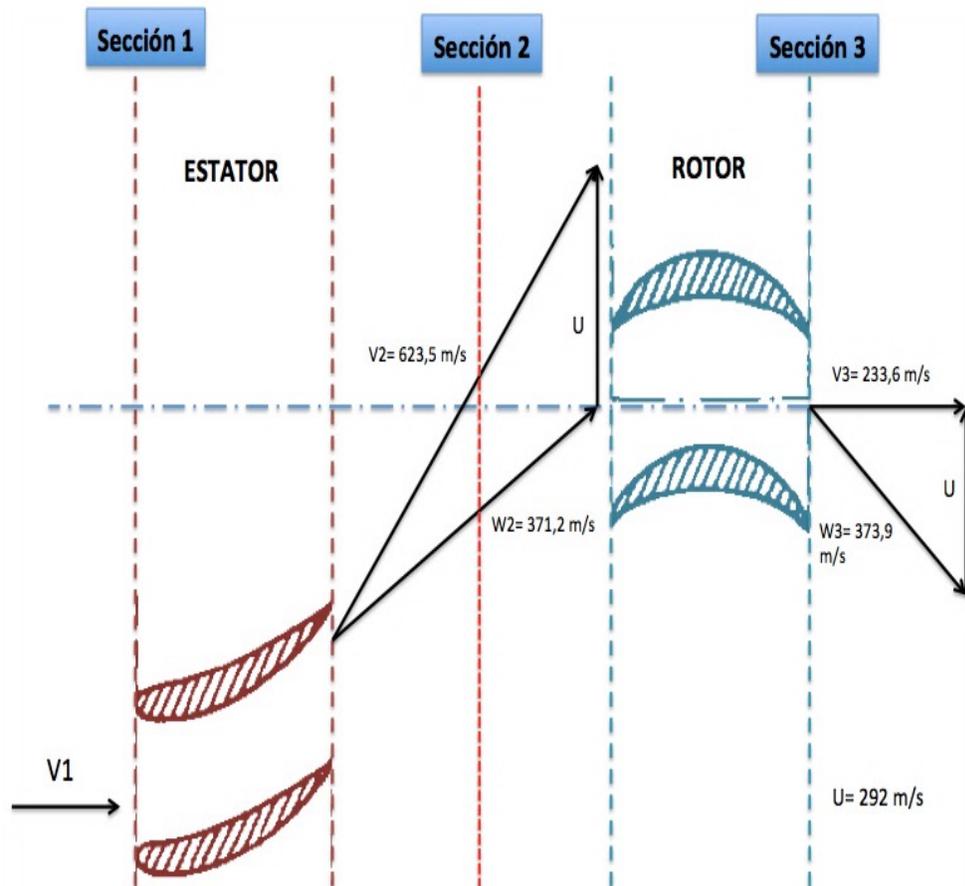
$$W_3 = \frac{V_{a3}}{\cos(\beta_3)} = \frac{233,6 \text{ m/s}}{\cos(51,34^\circ)} = 373,9 \text{ m/s} \quad \text{Ecuación 12}$$

Donde:

- V1: Velocidad Absoluta de Entrada del Fluido al Estator
- W2: Velocidad Relativa del Fluido a la Salida de los Álabes del Estator
- V2: Velocidad Absoluta de Salida del Fluido de los Álabes del Estator
- U: Velocidad Media del Rotor
- W3: Velocidad Relativa del Fluido a la salida de los Álabes del Rotor
- V3: Velocidad Absoluta de Salida del Fluido de los Álabes del Rotor

Con los datos obtenidos anteriormente se puede graficar el triángulo de velocidades correspondiente a la turbina libre como se muestra en la figura.

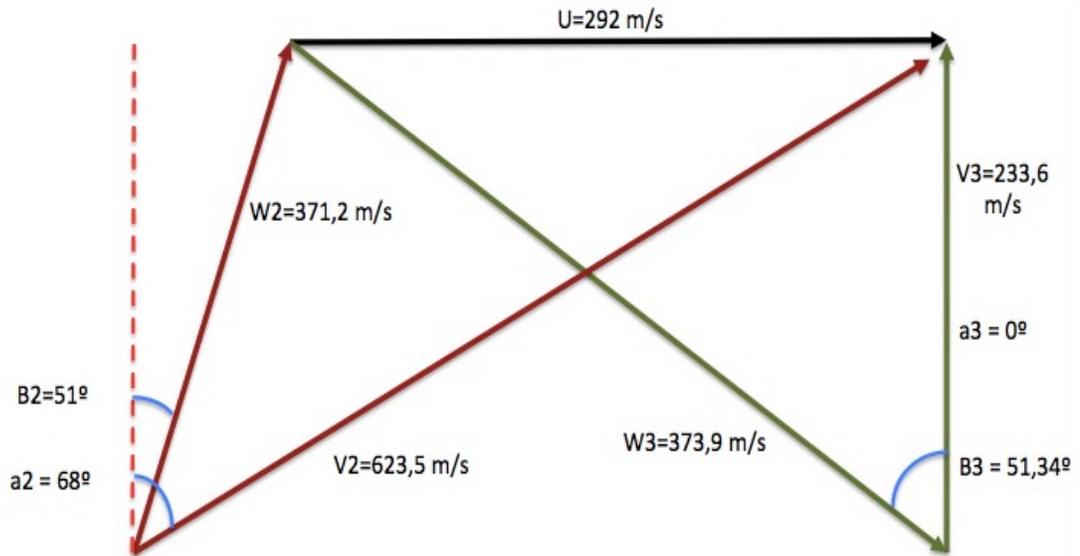
Figura 8. Triángulos de Velocidades por Secciones de la Turbina Libre



Fuente: Autores

Como se observa en el gráfico de los triángulos de velocidades por secciones para la turbina libre, se puede determinar que $W_2 = W_3$, tal cual indica *Martin Cuesta* para las turbinas de impulso, como lo es la turbina libre. A continuación, se presenta en la Figura 9. otro gráfico de los triángulos de velocidades con los correspondientes ángulos, los cuales direccionan las componentes de velocidades para la etapa de turbina libre.

Figura 9. Triángulos de Velocidades con los Ángulos Correspondientes



Fuente: Autores

Se procede a calcular las temperaturas y las presiones en las secciones 2 y 3 de la turbina libre, como se indica a continuación.

$$T_2 = T_{1t} = T_1 + \frac{(V_2)^2}{2 C_p} \quad \text{Ecuación 13}$$

$$T_2 = T_{1t} = 835,83 \text{ K} + \frac{(623,5 \text{ m/s})^2}{(2) \left(1148 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}\right)} = 1005,14 \text{ K}$$

Asumiendo un coeficiente de pérdida para el estator de $\eta_e = 0,05$, debido a que los conductos del estator actúan de manera convergente y pueden llegar a generar pérdidas en la temperatura de hasta un 5%¹⁹, se calcula la pérdida de temperatura del fluido a la salida del estator de la turbina libre.

¹⁹ ESCOBAR GARZÓN, Arnold. Diseño y Construcción de Turborreactores de Bajo Flujo Másico. Capítulo 5. Diseño de la Turbina. Expansión Térmica del Rotor. Ed. Militar Aeronáutica. 2008. Página 132.

$$T_2 - T_2' = \eta_e \frac{(V_2)^2}{2 C_p} \quad \text{Ecuación 14}$$

$$T_2 - T_2' = (0,05) \frac{(623,5 \text{ m/s})^2}{(2) \left(1148 \frac{\text{J}}{\text{Kg K}}\right)} = 8,46 \text{ K}$$

Con este ultimo valor se puede determinar la temperatura real del fluido en la sección 2 de la turbina libre.

$$T_2' = T_2 - (T_2 - T_2') = 1005,14 \text{ K} - 8,46 \text{ K} = 996,68 \text{ K}$$

Se procede a calcular P_2 con la relación isentropica como indica la siguiente ecuación,

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{T_{1t}}{T_2'}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad \text{Ecuación 15}$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{1005,14 \text{ K}}{996,68 \text{ K}}\right)^{\frac{1,33}{1,33-1}} = 1,03$$

$$P_2 = \left(\frac{P_1}{1,03}\right) = \left(\frac{187202,4 \text{ Pa}}{1,03}\right) = 181749,90 \text{ Pa} = 1,81 \text{ Bares}$$

Para la sección 3 se parte de que $T_{3t} = T_{1t}$ y con esto se procede a calcular T_3 y P_3 .

$$T_3 = T_{3t} - \frac{(V_3)^2}{2 C_p} \quad \text{Ecuación 16}$$

$$T_3 = 1005,14 \text{ K} - \frac{(233,6 \text{ m/s})^2}{(2) \left(1148 \frac{\text{J}}{\text{Kg K}}\right)} = 981,37 \text{ K}$$

Se calcula P_3 con la misma relación isentrópica como se muestra en la siguiente ecuación.

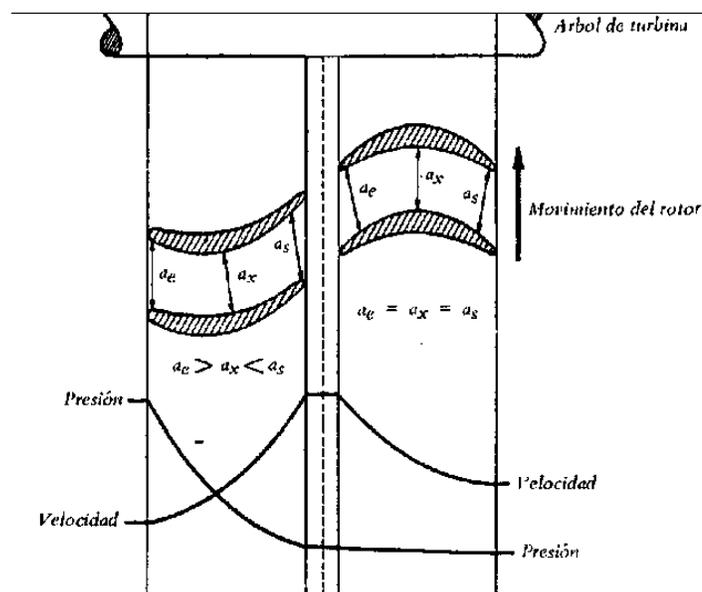
$$\frac{P_2}{P_3} = \left(\frac{T_2}{T_3} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad \text{Ecuación 17}$$

$$\frac{P_2}{P_3} = \left(\frac{996,68 \text{ K}}{981,37 \text{ K}} \right)^{\frac{1,33}{1,33-1}} = 1,06$$

$$P_3 = \left(\frac{P_2}{1,06} \right) = \left(\frac{181749,90 \text{ Pa}}{1,06} \right) = 171462,16 \text{ Pa} = 1,70 \text{ Bares}$$

En las Figuras 11. y 12., se puede observar el comportamiento de la presión y la velocidad en las secciones 1, 2 y 3 de la etapa de turbina, los cuales concuerdan con las graficas propuestas por *Martin Cuesta* que se observan en la Figura 10. para las turbinas de impulso.

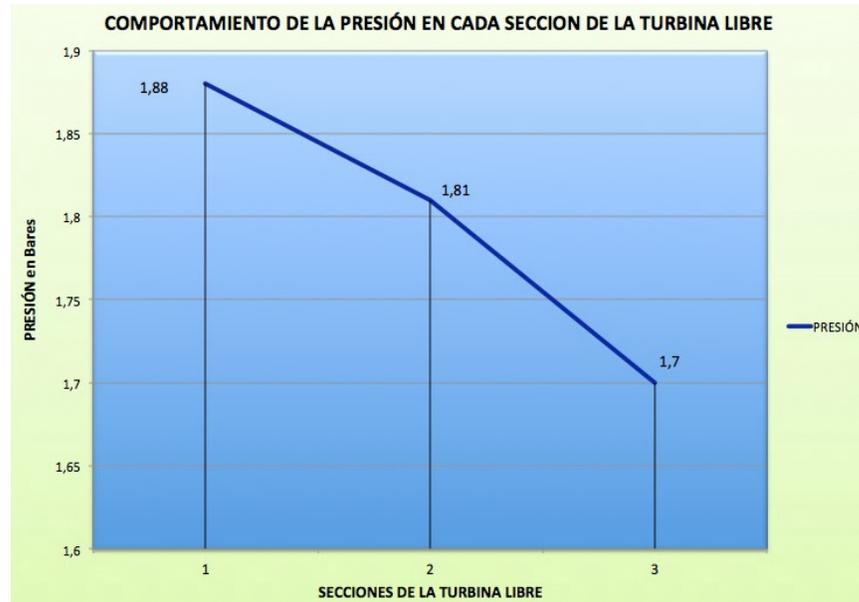
Figura 10. Comportamiento de la Presión y la Velocidad para la Etapa de Turbina Axial de Impulso



Fuente. CUESTA ÁLVAREZ, Martín. Motores a reacción. Tecnología y operación de vuelo. Capítulo IX. Turbinas. Turbinas de impulso. 5ta Edición. Ed Paraninfo. 1980. Página 174.

Donde se establece que la presión baja a lo largo de las secciones de la etapa de turbina libre de manera progresiva como se indica en la Figura 11.

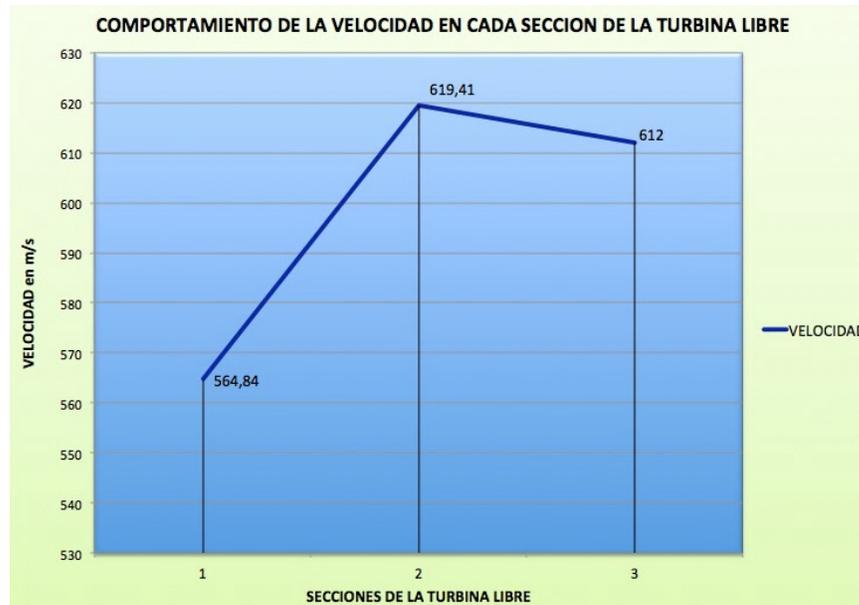
Figura 11. Comportamiento de la Presión en Cada Sección de la Turbina Libre



Fuente: Autores

En cuanto a la velocidad, como es una magnitud dependiente de la temperatura, se establece su momento crítico en la sección 2 donde la temperatura es máxima para la etapa de turbina libre y disminuye un poco en la sección 3 de salida de la etapa de turbina libre, pero en comparación con la velocidad de la sección 1 aumenta quitándole energía al gas generando mayor movimiento para el eje.

Figura 12. Comportamiento de la Velocidad en Cada Sección de la Turbina Libre



Fuente: Autores

5.2. CÁLCULOS GEOMÉTRICOS DE LA TURBINA LIBRE

Con base en los cálculos obtenidos anteriormente, se puede determinar por medio de las presiones y las temperaturas halladas, las densidades y áreas para cada una de las secciones de la turbina libre.

Sección 1

$$\rho_1 = \frac{P_1}{R T_1} = \frac{187202,4 \text{ Pa}}{\left(287 \frac{\text{J}}{\text{Kg K}}\right) (835,83 \text{ K})} = 0,871 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \text{Ecuación 18}$$

$$A_1 = \frac{m}{\rho_1 V_1} = \frac{1,5 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{\left(0,871 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) \left(233,6 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)} = 0,00737 \text{ m}^2 \quad \text{Ecuación 19}$$

Sección 2

$$\rho_2 = \frac{P_2}{R T_2} = \frac{181749,90 \text{ Pa}}{\left(287 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}\right) (1005,14 \text{ K})} = 0,639 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \text{Ecuación 20}$$

$$A_2 = \frac{m}{\rho_2 V_2} = \frac{1,5 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{\left(0,639 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) \left(623,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)} = 0,00381 \text{ m}^2 \quad \text{Ecuación 21}$$

Sección 3

$$\rho_3 = \frac{P_3}{R T_3} = \frac{171462,16 \text{ Pa}}{\left(287 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}\right) (981,37 \text{ K})} = 0,608 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \text{Ecuación 22}$$

$$A_3 = \frac{m}{\rho_3 V_3} = \frac{1,5 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{\left(0,608 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) \left(233,6 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)} = 0,0105 \text{ m}^2 \quad \text{Ecuación 23}$$

Se procede a calcular con el promedio de las áreas $A_1 - A_2$ para el estator y las áreas $A_2 - A_3$ para el rotor, los diámetros internos en la raíz de cada componente.

$$A_e = \frac{A_1 + A_2}{2} = \frac{(0,00737 \text{ m}^2) + (0,00381 \text{ m}^2)}{2} = 0,00559 \text{ m}^2$$

$$A_r = \frac{A_2 + A_3}{2} = \frac{(0,00381 \text{ m}^2) + (0,0105 \text{ m}^2)}{2} = 0,00715 \text{ m}^2$$

5.2.1. Expansión Térmica del Rotor de la Turbina Libre

Antes de calcular los diámetros finales de la turbina libre, es necesario establecer el análisis de la deformación térmica del rotor, lo que podría afectar la operación de la misma.

Por efectos de diseño, se plantea un diámetro externo de la turbina de 160mm, descartando el diámetro externo que se planteó inicialmente de 93mm.

Como el material a trabajar en la turbina es el acero inoxidable, se toma de la Tabla 3. los coeficientes que aplican para la temperatura entre 300 K – 1089 K, obteniendo un coeficiente de $13,5 \times 10^{-6} \text{ mm/K}$.

Tabla 3. Coeficiente de Expansión Térmica del Acero

RANGO DE TEMPERATURA	COEFICIENTE DE EXPANSIÓN (ϵ)(mm/mm/K $\times 10^{-6}$)
300 K – 356 K	10,4
300 K – 477 K	11,3
300 K – 700 K	12,4
300 K – 922 K	13,1
300 K – 1089 K	13,5

Fuente. ESCOBAR GARZÓN, Arnold. Diseño y Construcción de Turborreactores de Bajo Flujo Másico. Capítulo 5. Diseño de la Turbina. Expansión Térmica del Rotor. Ed. Militar Aeronáutica. 2008. Página 135.

Para calcular la deformación térmica de la turbina se tiene en cuenta la temperatura máxima de operación de ésta y la temperatura en frío. Así se calcula la diferencia de temperaturas.

$$\Delta T = T_{Max} - T_{Min} = 1010 \text{ K} - 300 \text{ K} = 710 \text{ K} \quad \text{Ecuación 24}$$

Para que la separación sea lo menor posible se asume que el diámetro del rotor es igual al diámetro del case de la turbina.

$$\Delta D = D_i \Delta T \epsilon \quad \text{Ecuación 25}$$

$$\Delta D = (0,16 \text{ m})(710 \text{ K}) \left(\frac{0,0000135}{\text{K}} \right) = 0,001533 \text{ m} = 1,533 \text{ mm}$$

Se repite la operación con un diámetro inicial de 159 mm, para comprobar si con el milímetro que se expande el material permite una tolerancia entre el rotor y la pared de la turbina libre.

$$\Delta D = D_i \Delta T \varepsilon$$

$$\Delta D = (0,158 \text{ m})(710 \text{ K}) \left(\frac{0,0000135}{\text{K}} \right) = 0,001524 \text{ m} = 1,524 \text{ mm}$$

5.2.2. Dimensionamiento de la Turbina Libre

Con este último resultado se pudo determinar que por la expansión térmica del material, el diámetro del rotor sea por lo menos 1 mm menor que el diámetro de la case de la turbina libre. Se concluye finalmente que:

$$D_{\text{externo estator}} = 160 \text{ mm}$$

$$D_{\text{externo rotor}} = 158 \text{ mm}$$

Con las áreas calculadas para estator - rotor, y la definición de los diámetros externos de la turbina, se calculan los diámetros internos para los mismos componentes con la siguiente ecuación; asumiendo los ángulos de posicionamiento de los alabes tanto para el estator y el rotor en el siguiente rango.

$$50^\circ < \theta > 80^\circ$$

$$d_i = \sqrt{(d)^2 - \frac{4A}{\text{Sin } \theta \cdot \pi \cdot \tau}}$$

Ecuación 26

Diámetro interno del estator, con $\theta_e = 55^\circ$

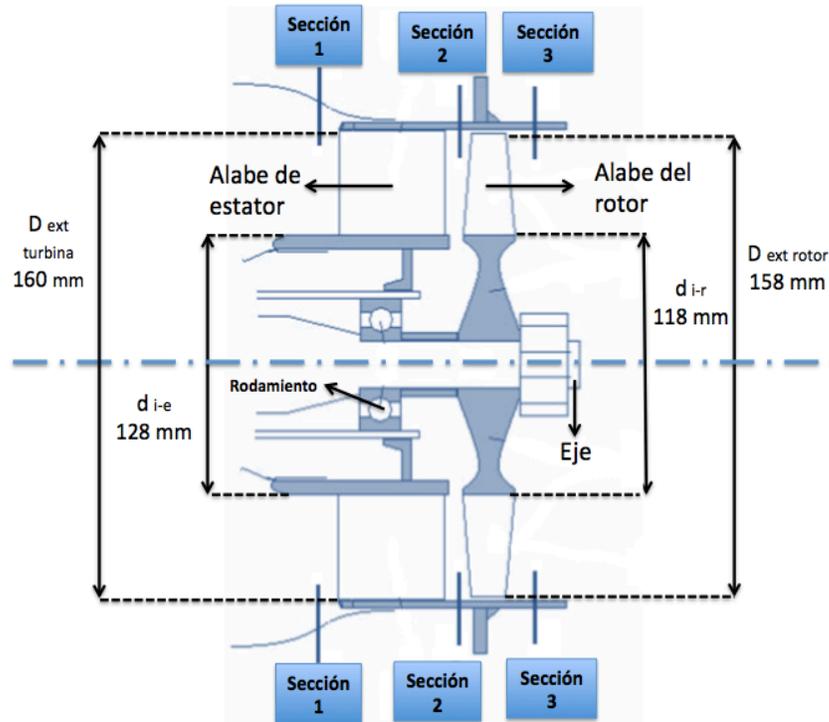
$$d_{i-e} = \sqrt{(0,16 \text{ m})^2 - \frac{(4)(0,00559 \text{ m}^2)}{(\text{Sin } 55^\circ)(\pi)(0,95)}} = 0,120 \text{ m} = 120 \text{ mm}$$

Diámetro interno del rotor, con $\theta_r = 60^\circ$

$$d_{i-r} = \sqrt{(0,158 \text{ m})^2 - \frac{(4)(0,0075 \text{ m}^2)}{(\text{Sin } 60^\circ)(\pi)(0,95)}} = 0,118 \text{ m} = 118 \text{ mm}$$

En la Figura 13., se representan las dimensiones definitivas calculadas para la turbina libre.

Figura 13. Dimensiones de la Turbina Libre



Fuente: Autores

Con los diámetros respectivos del estator y el rotor se puede determinar la altura de los álabes para cada componente con la siguiente ecuación.

Altura de los Álabes de Estator

$$h_e = \frac{D_{e-e} - d_{i-e}}{2} = \frac{(0,16\ m) - (0,120\ m)}{2} = 0,020\ m = 20\ mm \quad \text{Ecuación 27}$$

Altura de los Álabes de Rotor

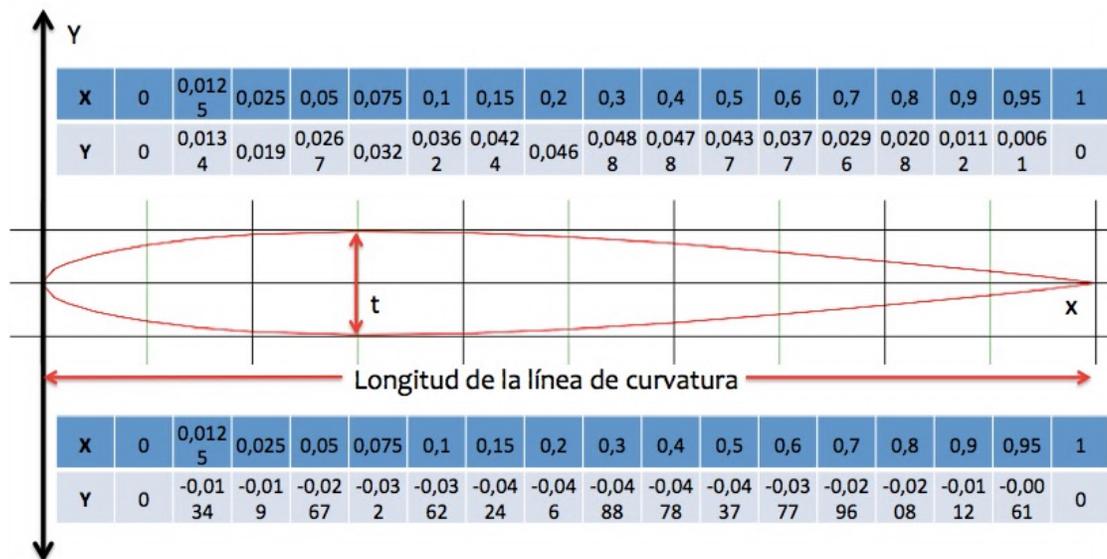
$$h_r = \frac{D_{e-r} - d_{i-r}}{2} = \frac{(0,158\ m) - (0,118\ m)}{2} = 0,020\ m = 20\ mm \quad \text{Ecuación 28}$$

5.3. CÁLCULOS PARA LOS ÁLABES DE LA TURBINA LIBRE

5.3.1. Diseño de los Álabes para la Turbina Libre

Para la turbina libre se ha establecido un perfil aerodinámico de nomenclatura RAF 27 recomendado para turbinas axiales²⁰, en la Figura 14. se puede observar el perfil y sus coordenadas para modelarlo, este perfil es simétrico respecto a su eje medio y presenta una relación de espesor/cuerda (t/c) de 0,1.

Figura 14. Perfil de Álabes RAF 27 y Sus Coordenadas



Fuente: Autores

Para la relación de paso/cuerda (s/c) se analizan turbinas de motores con diseño similar a esta turbina libre y de esta manera fijar los parámetros de diseño para los álabes que la conforman. En este caso se utilizarán especificaciones de las turbinas del motor FD3/64 Kurt Schreckling y de la turbina planteada por Arnold Escobar en su libro de Diseño y Análisis para Turborreactores de Bajo Flujo Másico, los cuales se resumen en la Tabla 4. para estator y en la Tabla 5. para rotor.

²⁰ HIH SARAVANAMUTTOO, ROGERS & COHEN. Gas Turbine Theory. Chapter 7. Axial and Radial Flow Turbines. Conventional Blading. 4 Edition. Ed. Macombo. 1983. Page 294.

Tabla 4. Mediciones y Relaciones de Álabes de Estator

ESTATOR	c (mm)	s (mm)	s/c
Kurt	29	19,5	0,67
Escobar	24	15,6	0,67

Fuente: Autores

Tabla 5. Mediciones y Relaciones de Álabes de Rotor

ROTOR	c (mm)	s (mm)	s/c
Kurt	9	975	0,98
Arnold	11	11,5	0,85

Fuente: Autores

Basados en los datos de las tablas y los calculados anteriormente, se establecen las siguientes dimensiones para los alabes del estator y rotor respectivamente como se indica en la Tabla 6.

Tabla 6. Dimensiones y Relaciones para los Álabes de la Turbina Libre

TURBINA	h (mm)	c (mm)	s (mm)	t (mm)	h/c	s/c	t/c
Estator	20	20	15	2	0,8	0,75	0,1
Rotor	20	15	9	2	1,33	0,6	0,1

Fuente: Autores

Basados en la geometría de los alabes de estator y rotor, se procede a calcular el número de álabes que cada uno de los componentes de la turbina libre debe tener. Primero se halla el radio medio para el rotor y estator.

$$r_m = \frac{d_i}{2} \quad \text{Ecuación 29}$$

Por lo tanto para estator el radio medio r_{m-e} es,

$$r_{m-e} = \frac{d_{i-e}}{2} = \frac{0,128 \text{ m}}{2} = 0,064 \text{ m} = 64 \text{ mm}$$

Se obtiene el radio medio r_{m-r} del rotor

$$r_{m-r} = \frac{d_{i-r}}{2} = \frac{0,118 \text{ m}}{2} = 0,059 \text{ m} = 59 \text{ mm}$$

Se procede a calcular el número de álabes de estator y rotor con la siguiente ecuación.

$$N = \frac{2\pi(r_m)}{s} \quad \text{Ecuación 30}$$

Para estator

$$N_e = \frac{2\pi (64 \text{ mm})}{15 \text{ mm}} = 26,3 \approx 26 \text{ alabes.}$$

Para rotor

$$N_r = \frac{2\pi (59 \text{ mm})}{9 \text{ mm}} = 41,18 \approx 40 \text{ alabes.}$$

Debido a las RPM a las que estará sometida la turbina libre, es necesario determinar el la fuerza centrífuga que soportarán los álabes del rotor, teniendo en cuenta que cada álabe tiene un peso de 0,01 Kg, resultado que se obtuvo al pesar los alabes en una balanza digital calibrada..

$$T_{ar} = \frac{W}{g} \cdot \left(\frac{2\pi}{60} \text{ RPM}\right)^2 \cdot h_r \quad \text{Ecuación 31}$$

$$T_{ar} = \frac{0,01 \text{ Kg}}{9,81 \text{ m/s}^2} \left(\frac{2\pi}{60} (60000 \text{ RPM})\right)^2 0,02 \text{ m}$$

$$T_{ar} = 804,8 \text{ Newton} \approx 805 \text{ Newton}$$

5.4. CÁLCULOS FINALES PARA LA TURBINA LIBRE

Se puede determinar ahora el número Mach a la salida de la turbina libre, este número debe ser menor que el número de entrada en turbinas de impulso, debido a que se busca absorber la mayor cantidad de energía que se pueda del fluido para transformarla en energía de otro tipo, que para este caso es energía eléctrica.

$$M = \frac{V_a}{V_o} \quad \text{Ecuación 32}$$

Siendo

$$V_o = \sqrt[2]{R \gamma T_3} \quad \text{Ecuación 33}$$

$$V_o = \sqrt[2]{\left(287 \frac{J}{Kg K}\right) (1,33) (981,37 K)} = 616 \text{ m/s}$$

el Numero Mach a la Salida de la Turbina Libre es,

$$M = \frac{233,6 \text{ m/s}}{616 \text{ m/s}} = 0,37$$

Se procede ahora a calcular la potencia entregada por la turbina libre y el torque generado por la misma.

$$Pot = m C_p \Delta T \quad \text{Ecuación 34}$$

$$Pot = \left(1,5 \frac{kg}{s}\right) \left(1148 \frac{J}{kg K}\right) (981,37 K - 835,83 K)$$

$$Pot = 250,6 Kw = 336 HP$$

Con la potencia calculada podemos hallar el torque.

$$T = \frac{60 Pot}{2\pi (RPM)} \quad \text{Ecuación 35}$$

$$T = \frac{(60)(250,6 Kw)}{2\pi(60000 RPM)} = 39,88 Nm$$

Para determinar la viabilidad de la turbina libre, se decide calcular la eficiencia isentrópica, cabe mencionar que se entiende por eficiencia isentrópica como la relación entre el trabajo real y el trabajo ideal. Para obtener la eficiencia se emplea la siguiente expresión.

$$\eta_{turbina} = \frac{T_1 - T_2}{T_1 - T_{3t}} \quad \text{Ecuación 36}$$

Reemplazando obtenemos que la eficiencia isentrópica de la turbina libre es:

$$\eta_{turbina} = \frac{835,83 K - 996,68 K}{835,83 K - 1005,14 K} = 0,91$$

$$\eta_{turbina} = (0,91)(100\%) = 91\%$$

5.4.1. Diagramas Presión-Volumen y Temperatura-Entropía para la Turbina Libre

Debido a que la turbina libre solo consta de una etapa de turbina, se procede a determinar los diagramas P-V y T-S para ésta. Para lograr lo mencionado anteriormente es necesario tener en cuenta el número de masa molar para el gas propano que es el gas que expulsa el motor RGG1 en el que se basa la turbina libre, este número es de $n = 0,044 kg/mol$ y la constante del gas propano $R = 188,55 J/Kg K$ ²¹, así con la ecuación de estado de los gases ideales y los cálculos

²¹ VILLAMAR CARLO G. Tablas y Diagramas de Termodinámica. Masa Molar, Constante del Gas y Punto Crítico. Propano. Tabla I. [29 de agosto de 2015]. Disponible en: <<http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/villamar/MATERIAS%20DICTADAS/TERMODINAMICA%201/Termo%201%20Presentaciones/Tablas%20Termodinamica.pdf>>

de presión y temperatura hallados anteriormente se procede a calcular el volumen a la entrada y salida de la turbina.

$$PV = nRT \quad \text{Ecuación 37}$$

Despejando el volumen, tenemos para la entrada a la turbina un volumen Vol_1 ,

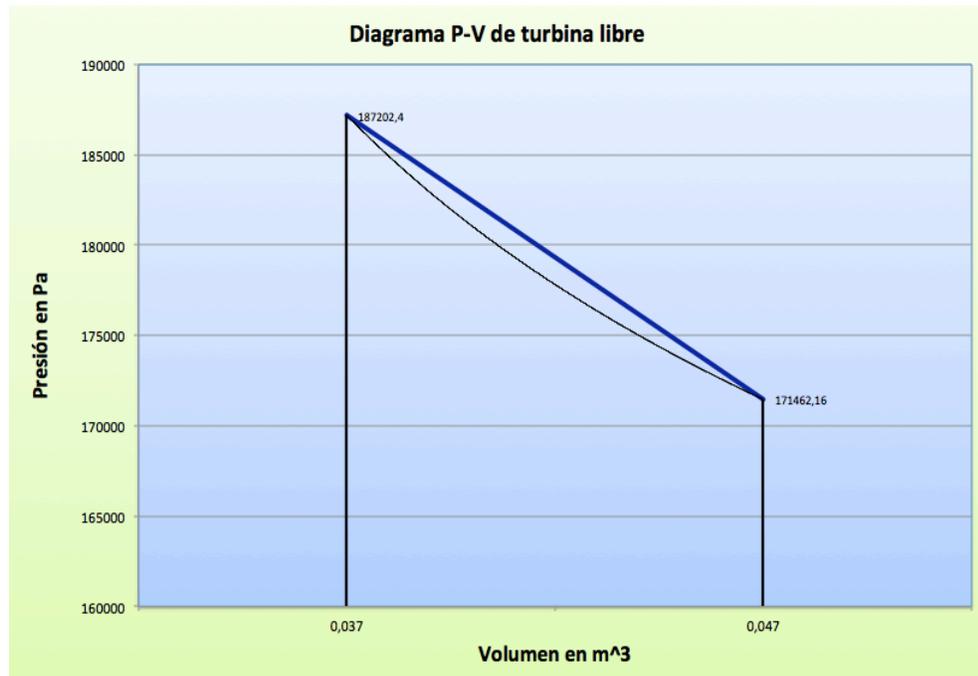
$$Vol_1 = \frac{nRT_1}{P_1} \quad \text{Ecuación 38}$$
$$Vol_1 = \frac{\left(0,044 \frac{kg}{mol}\right) \left(188,5 \frac{J}{kg K}\right) (835,83 K)}{187202,4 Pa} = 0,037 m^3$$

Una vez hallado el volumen a la entrada, se procede a calcular el volumen a la salida Vol_3 , es decir en la sección 3 de la turbina libre.

$$Vol_3 = \frac{nRT_3}{P_3} \quad \text{Ecuación 39}$$
$$Vol_3 = \frac{\left(0,044 \frac{kg}{mol}\right) \left(188,5 \frac{J}{kg K}\right) (981,37 K)}{171462,16 Pa} = 0,047 m^3$$

En la Figura 15. Se observa el diagrama resultante de P-V para la etapa de turbina libre, en este diagrama la presión a través de las diferentes secciones de la turbina disminuye a medida que el volumen aumenta, volumen que se pretende aprovechar para el intercambiador de calor propuesto en la continuidad de la central de ciclo combinado.

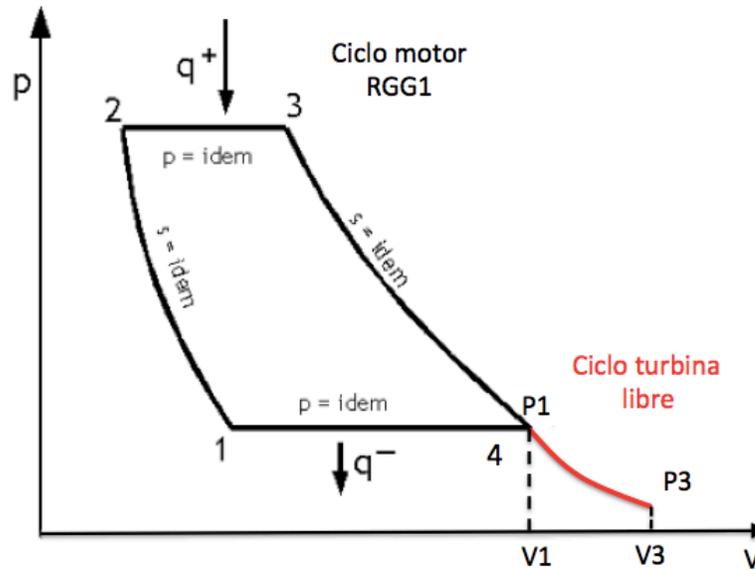
Figura 15. Diagrama P-V de Turbina Libre



Fuente: Autores

Ahora, en la Figura 16. se puede observar el ciclo termodinámico para el motor RGG1 (en negro) y el ciclo para la turbina libre (en rojo), de esta manera se puede concluir que la turbina trabaja con las líneas de potencia procedentes de la turbina libre y de esta forma aprovecha los gases de escape que el motor RGG1 genera, para convertirlos en energía.

Figura 16. Diagrama P-V Ciclo Brayton con el Diagrama P-V del Ciclo de Turbina Libre



Fuente: Modificado de Estudio del Ciclo Brayton. Diagramas P-V del ciclo Brayton. [En línea] [11 de junio de 2015]. Disponible en <http://www.uhu.es/gabriel.lopez/comun/pract_Brayton.pdf>

Finalmente se procede a determinar el diagrama T-S. Con el fin de obtener este diagrama se determinó la entropía a la entrada S_1 y a la salida S_3 de la turbina libre. Para poder hallar las entropías es necesario obtener la masa con la siguiente expresión.

$$m = \rho Vol \quad \text{Ecuación 40}$$

Con la expresión mencionada se procede a determinar la masa a la entrada de la turbina.

$$m_1 = \rho_1 Vol_1$$

$$m_1 = \left(0,871 \frac{kg}{m^3}\right) (0,037 m^3) = 0,032 kg$$

Ahora se procede a calcular la masa a la salida de la turbina libre.

$$m_3 = \rho_3 Vol_3$$

$$m_3 = \left(0,608 \frac{kg}{m^3}\right) (0,047 m^3) = 0,028 kg$$

Con la masa calculada se puede proceder a determinar la energía a la entrada de la turbina Q_1 y a la salida Q_3 , con la siguiente expresión.

$$Q = m Cp \Delta T \quad \text{Ecuación 41}$$

Con la expresión mencionada, se procede a determinar la energía a la entrada de la turbina.

$$Q_1 = m_1 Cp \Delta T$$

$$Q_1 = (0,032 Kg) \left(1148 \frac{J}{kg K}\right) (145,54 K) = 6346,55 J$$

Ahora se procede a calcular la masa a la salida de la turbina libre.

$$Q_3 = m_3 Cp \Delta T$$

$$Q_3 = (0,028 Kg) \left(1148 \frac{J}{Kg K}\right) (693,22 K) = 22282,86 J$$

Con estos datos es posible calcular la entropía a la entrada y a la salida de la turbina libre como se indica a continuación.

$$S = \frac{Q}{T} \quad \text{Ecuación 42}$$

Así, la entropía a la entrada de la turbina libre, es

$$S_1 = \frac{Q_1}{T_1}$$

$$S_1 = \frac{6346,55 J}{835,83 K} = 7,59 \frac{J}{K}$$

Y a la salida de la turbina libre,

$$S_3 = \frac{Q_3}{T_{amb}}$$

$$S_3 = \frac{22282,86 J}{288,15 K} = 77,33 \frac{J}{K}$$

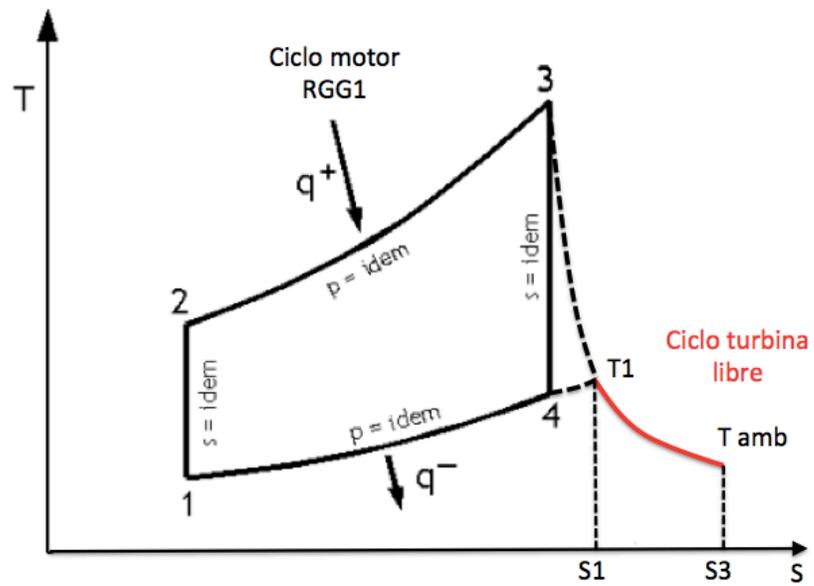
Finalmente, con estos valores se procede a graficar el diagrama de T-S para la turbina libre como se muestra en la Figura 17. y al igual que en el diagrama anterior se puede evidenciar en la Figura 18. el ciclo Brayton completo y como la turbina libre complementa el ciclo termodinámico en un caso real. En un ciclo real se sabe que la entropía aumenta, es por eso que se puede ver como esta entropía va aumentando a medida que la temperatura disminuye.

Figura 17. Diagrama T-S de Turbina Libre



Fuente: Autores

Figura 18. Diagrama T-S Ciclo Brayton con el Diagrama T-S del Ciclo de Turbina Libre



Fuente: Modificado de Estudio del Ciclo Brayton. Diagramas P-V del ciclo Brayton. [En línea] [11 de junio de 2015]. Disponible en <http://www.uhu.es/gabriel.lopez/comun/pract_Brayton.pdf>

6. CONSTRUCCIÓN DE LOS COMPONENTES DE LA TURBINA LIBRE

El proceso de construcción del prototipo de la turbina libre se realizó en diferentes etapas, partiendo de la modelación de los componentes, el análisis estructural computacional de las partes más críticas, la posterior selección de los materiales adecuados a utilizar y por último la fabricación de cada uno de los componentes que la conforman.

6.1. MODELAMIENTO DE LAS PIEZAS

Para iniciar el proceso de construcción del prototipo, es necesario como en todo trabajo de ingeniería realizar un diseño asistido por computador CAD de cada una las piezas a fabricar, con el fin de realizar el análisis estructural computacional, el corte a láser de algunas piezas y además obtener algunos planos de trabajo como se muestra en el Anexo D. Para realizar este modelamiento se empleó el software SOLIDWORKS de Dassault Systèmes, en el que se diseñaron todos los componentes empleados en la turbina libre.

6.1.1. Modelamiento de los Álabes de Rotor

Basados en los cálculos dimensionales realizados y en la selección del perfil para el álabes de rotor, en la Figura 19. se muestra el modelamiento de esta pieza donde se detallan entre las partes principales de ésta, el perfil y las puntas aseguradoras que servirán como sistema de acoplamiento al disco rotor.

Figura 19. Álabes Rotor Modelado

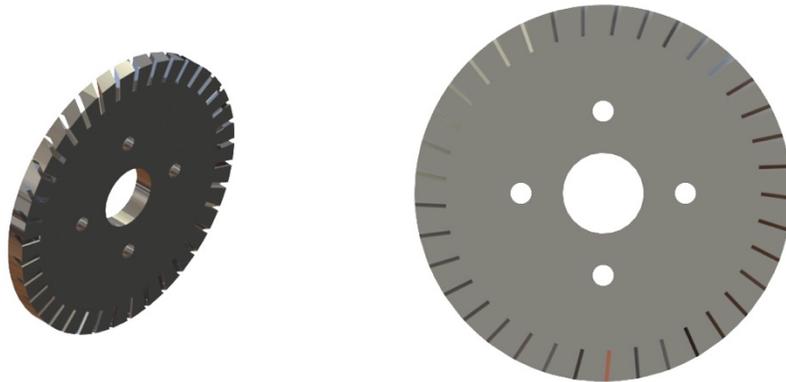


Fuente: Autores

6.1.2. Modelamiento del Disco Rotor

El disco rotor es la pieza de la turbina que alberga los álabes de rotor que se mencionaron anteriormente, este disco cuenta con 40 ranuras ubicadas a 60 grados según se mencionó en el numeral 5.2.2. En la Figura 20. se puede observar la pieza del disco rotor modelada y se detallan las ranuras en las cuales se posicionará cada álabe de rotor.

Figura 20. Disco Rotor Modelado



Fuente: Autores

6.1.3. Modelamiento del Anillo Retenedor

Los anillos retenedores tienen una función vital en el disco rotor, aseguran los álabes al disco para evitar que durante la operación estos se puedan salir. En la Figura 21. se muestra el modelamiento de este componente.

Figura 21. Anillo Retenedor Modelado



Fuente: Autores

6.1.4. Modelamiento de los Tornillos Aseguradores

Los tornillos aseguradores son los encargados de asegurar el ensamble del disco rotor, como se observa en la Figura 22. son unos tornillos cabeza bristol de un cuarto de pulgada con su correspondiente tuerca de aseguramiento.

Figura 22. Tornillos Ensamble Rotor Modelados

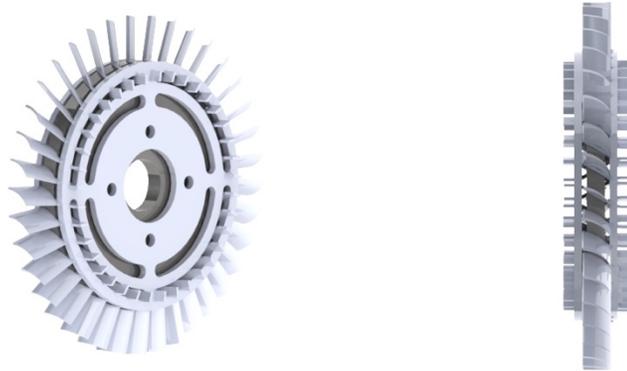


Fuente: Autores

6.1.5. Modelamiento del Ensamble del Rotor

El ensamble del conjunto rotor, es la unión de todos los componentes mencionados anteriormente, como se observa en la siguientes figuras. Este es uno de los principales componentes de la turbina libre.

Figura 23. Ensamble Rotor Modelado



Fuente: Autores

Figura 24. Explosionado Ensamble Rotor



Fuente: Autores

6.1.6. Modelamiento de los Álabes de Estator

Según los cálculos dimensionales realizados, en la Figura 25. se puede observar el modelamiento de la pieza del álabes de estator, la cual a diferencia de los álabes del rotor no cuenta con puntas aseguradoras, debido a que es una pieza fija dentro de la turbina que va soldada a la pared interna del case de la turbina y a la pared externa del disco del estator.

Figura 25. Álabes Estator Modelado



Fuente: Autores

6.1.7. Modelamiento del Disco del Estator

El disco de estator es una pieza que cuenta con una superficie exterior completamente lisa, para facilitar el proceso de soldado de los álabes de estator. Como se observa en la Figura 26., se detalla una rosca macho que sobresale de la pared anterior del disco de turbina, la cual sirve como medio de acoplamiento para el spinner del conjunto estator y un cajón en la pared interior para la instalación de los rodamientos que soportan el eje de la turbina.

Figura 26. Disco Estator Modelado



Fuente: Autores

6.1.8. Modelamiento del Spinner de Turbina

El spinner de turbina es el primer componente en tener contacto con el fluido de admisión, y cumple una función muy importante que es la de direccionar este flujo de forma laminar hacia el estator. A partir de lo anterior, el modelamiento del spinner visto en la Figura 27. es un componente en forma cónica con una rosca hembra en su parte posterior que sirve de acople con el disco de estator.

Figura 27. Spinner Turbina Modelado

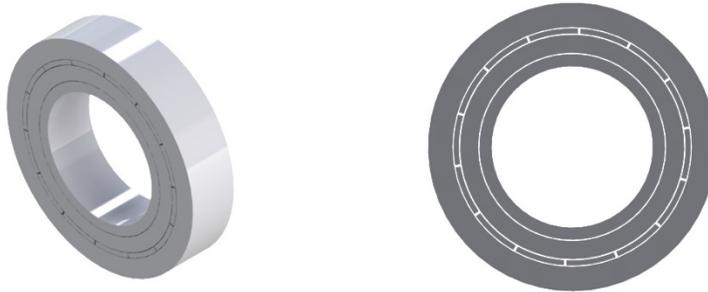


Fuente: Autores

6.1.9. Modelamiento de los Rodamientos

En la Figura 28. se pueden observar los rodamientos que se ubicarán en el disco estator y en el codo de la tobera de salida, los cuales permitirán el giro libre del eje de la turbina.

Figura 28. Rodamiento Modelado



Fuente: Autores

6.1.10. Modelamiento del Case de Turbina y Tobera

En el caso de la turbina libre, el case de turbina se diseño de tal forma que se acomode milimétricamente a los cálculos realizados, permitiendo el aseguramiento del disco de estator y el movimiento libre del disco rotor y con la capacidad de direccionar los gases restantes hacia la tobera de salida. En las siguientes figuras, se muestra el modelamiento de los dos componentes con sus correspondientes bridas de seguridad que sirven para el acoplamiento de los mismos.

Figura 29. Case Turbina Modelado



Fuente: Autores

Figura 30. Tobera de Salida Modelada

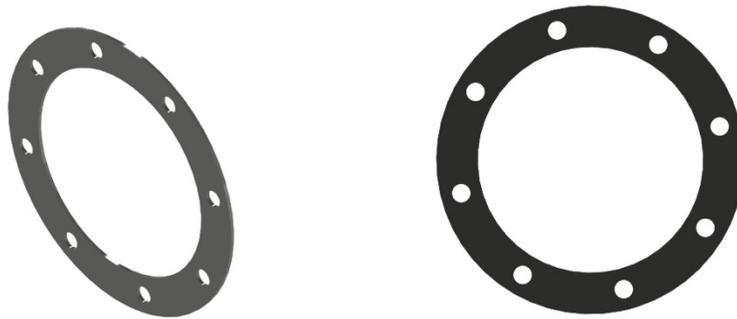


Fuente: Autores

6.1.11. Modelamiento del Sello para la Unión del Case

Para poder lograr una unión perfecta entre el case de turbina y la tobera, es necesario adicionar un sello de caucho que permita evitar pérdidas de fluido al pasar por la conexión de las bridas que unen estas dos piezas.

Figura 31. Sello de Caucho Modelado



Fuente: Autores

6.1.12. Modelamiento del Eje de Turbina

Uno de los componentes principales de la turbina libre es el eje de turbina, el cual es el encargado de transferir el movimiento del disco rotor al generador de energía eléctrica. Este eje cuenta con un roscado en su parte posterior que sirve como acople al generador como se muestra en la Figura 32.

Figura 32. Eje de Turbina Modelado



Fuente: Autores

6.1.13. Modelamiento del Generador Eléctrico

Para el caso del prototipo se decidió en el modelamiento diseñar un alternador de los que se encuentran habitualmente en los automóviles. En la Figura 33. se observa dicho componente.

Figura 33. Generador Eléctrico Modelado

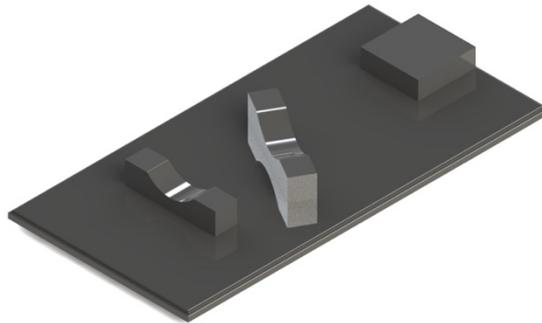


Fuente: Autores

6.1.14. Modelamiento del Soporte de la Turbina

Se diseñó un soporte para el prototipo de turbina libre, con el objetivo de sostenerla y hacer más estética su presentación, el cual se muestra en la siguiente figura.

Figura 34. Soporte Turbina Modelado



Fuente: Autores

6.1.15. Modelamiento Preliminar de la Turbina Libre

Figura 35. Turbina Libre Preliminar Modelada



Fuente: Autores

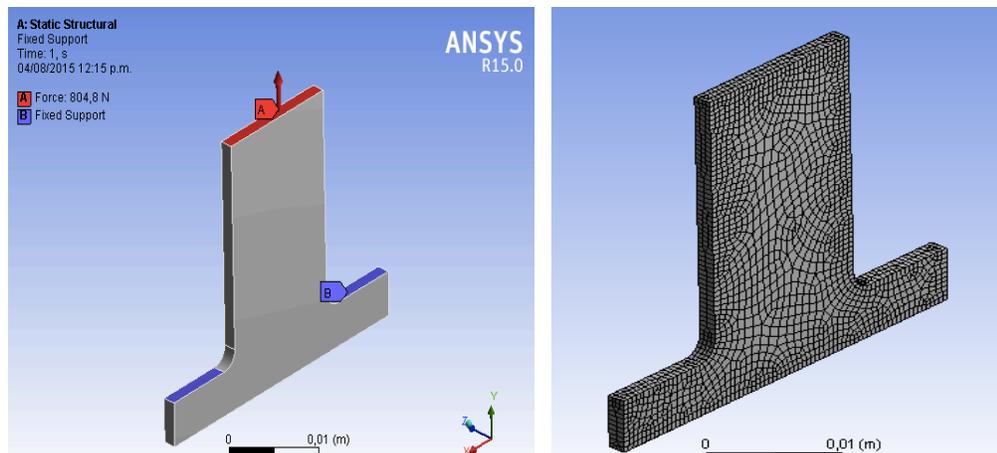
6.2. ANÁLISIS ESTRUCTURAL COMPUTACIONAL

Para continuar con el proceso de construcción del prototipo, es necesario realizar una serie de análisis estructurales computacionales, para poder determinar las diferentes cargas y esfuerzos que deben soportar las piezas más críticas de la turbina libre. En este caso se realizó un análisis por elementos finitos FEA (Finite Elements Analysis), con la ayuda del software ANSYS.

6.2.1. Análisis de los Álabes de Rotor

Por ser uno de los componentes más importantes de la turbina libre es necesario realizar un análisis FEA estático lineal en donde se aplica la carga y se marcan los puntos fijos para los álabes de rotor, éste se realiza sobre la pieza original antes de su modificación con el perfil RAF 27 en la parte de construcción. En la Figura 36. se puede observar el álabes original con una fuerza centrífuga de 804,8 Newton que se tomó de los cálculos hallados y la cual fue la única carga que se aplicó en el análisis.

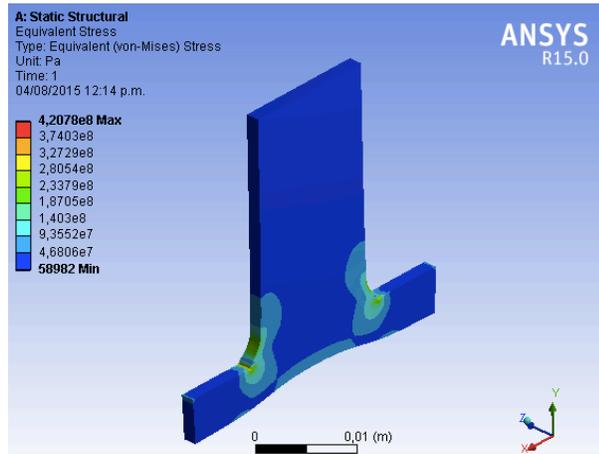
Figura 36. Carga Radial, Puntos Fijos del Álabes y Enmallado



Fuente: Autores

A continuación, se enmalla la pieza bien refinada para realizar la simulación con el fin de determinar el esfuerzo equivalente en el álabes. Como resultado se puede ver en la Figura 37. que el mayor esfuerzo se presenta en el radio de unión de las puntas aseguradoras y el álabes como tal, esto se debe a que es un área crítica donde se concentran esfuerzos a raíz de la carga centrífuga a la que esta expuesta.

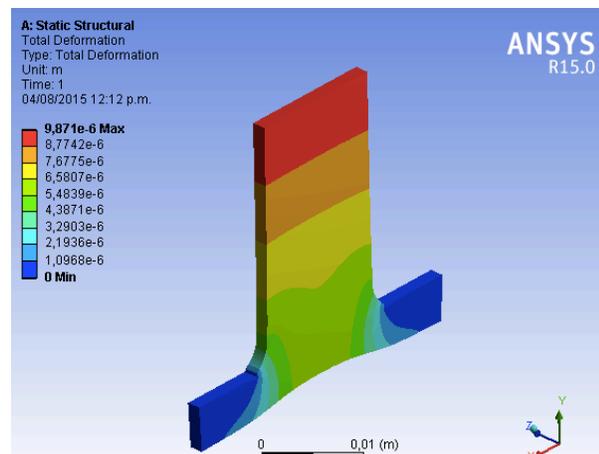
Figura 37. Esfuerzo Equivalente Álabes Rotor



Fuente: Autores

Después de esto, se procede a realizar el análisis por deformación total del álabes como se muestra en la Figura 38. La deformación es más evidente en la punta del álabes desde el borde de ataque al borde de salida, esto se da porque es donde se aplica directamente la carga centrífuga calculada y es una parte del álabes que se encuentra libre, y a medida que se va acercando a la raíz; es decir, a los puntos fijos esta deformación tiende a cero.

Figura 38. Deformación Total del Álabes de Rotor



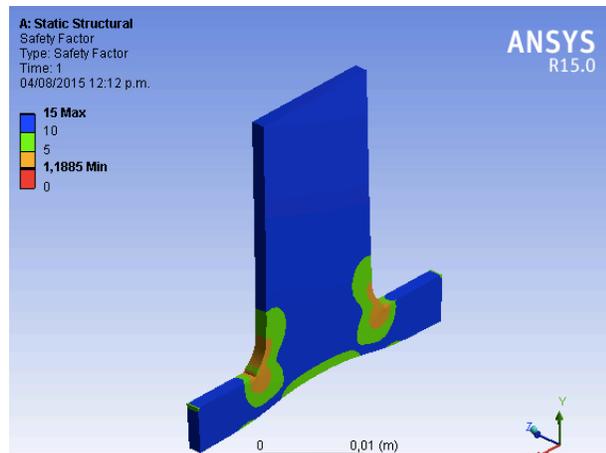
Fuente: Autores

Finalmente se procede a determinar el factor de seguridad para el álabe de rotor. Para determinar un factor de seguridad adecuado se decidió realizar el análisis en base al acero 4340, debido a que posee mejores propiedades que el acero inoxidable 304. Con este material se encontró un factor de seguridad mínimo de 1.2, lo que nos indica que soportará una vez la carga centrífuga y aproximadamente un 20% más del valor de esa carga.

Hay que tener en cuenta que para este factor de seguridad solo se utilizó una carga centrífuga de 804,8 Newton y se obviaron otras fuerzas como resistencia, sustentación, momento, además no se tuvo en cuenta la temperatura a la que este álabe estaría sometido según los cálculos. Lo anterior nos indica que al tener todos estas condiciones en cuenta, el factor de seguridad podría llegar a ser inferior a uno, lo que es crítico para la operación de la turbina.

Opciones a tener en cuenta para lograr un factor de seguridad superior a 1,5 que es el recomendado para componentes de aviación²², sería realizar nuevos análisis con un enmallado más fino o más simple para comparar los valores del factor de seguridad, tener en cuenta las condiciones mencionadas y probar con otro tipo de materiales que puedan llegar tener mejores propiedades.

Figura 39. Factor de Seguridad Álabe de Rotor



Fuente: Autores

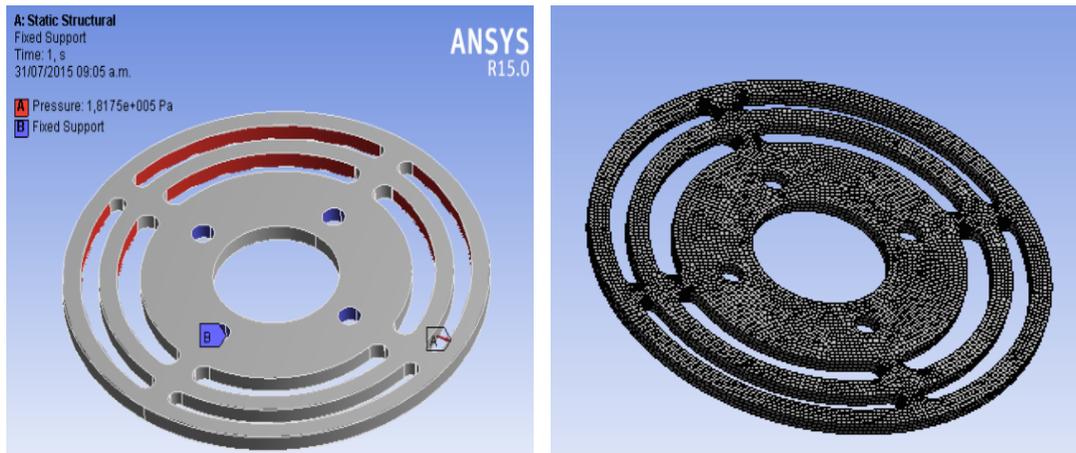
²² GATO GUTIERREZ, Felipe. Sistemas de Aeronaves de Turbina. Capitulo XI. Requisitos de Aeronavegabilidad. JAR 25.303 Factor de Seguridad. Ed. Club Universitario. 2011. Página 84.

6.2.2. Análisis del Anillo Retenedor

Al igual que los álabes de rotor, los anillos retenedores hacen parte de los componentes dinámicos de la turbina que más esfuerzo soportan, debido a que su espesor es mínimo, es necesario realizar un análisis sobre los esfuerzos que soportará este componente durante el funcionamiento.

En este caso también se realiza un análisis FEA estático lineal con un enmallado fino donde se demarcan los puntos fijos (B) de los anillos retenedores, y se somete a una carga elemental, en este caso la presión obtenida en los cálculos (182749,90 Pa) sobre el área (A) donde actúa críticamente, como se evidencia en la Figura 40.

Figura 40. Soportes Fijos en los Anillos Retenedores y Enmallado.



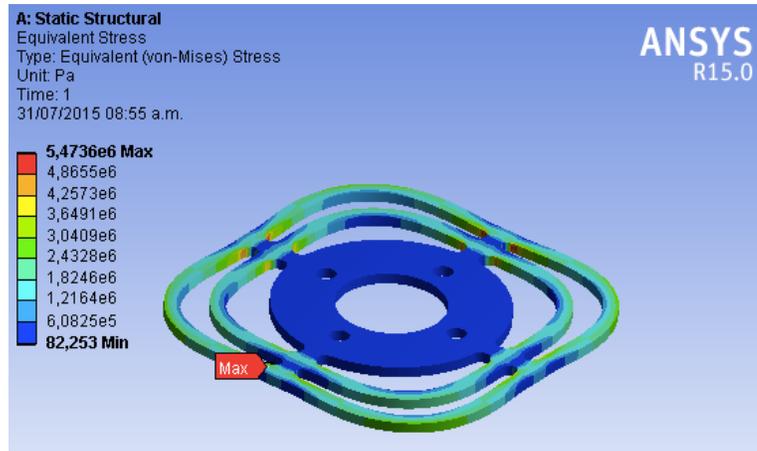
Fuente: Autores

Se procede a realizar el análisis por simulación de Von-Mises, que es un criterio tomado por el FEA que se refiere a la máxima energía de distorsión del material, lo que indica que el material falla cuando en algún punto de material la energía de distorsión sobrepasa cierto umbral ya establecido²³, así con esto se puede observar la deformación total del anillo retenedor. En la Figura 41. se puede observar como la concentración de esfuerzos es mayor en las uniones de las ranuras de los álabes de rotor, esto debido a la distribución de fuerzas en el componente. Por esta razón, estas uniones se modelaron con dimensiones específicas para evitar la fatiga y la ruptura del material debido a las altas

²³ GONZALES, Jorge Luis. Metalúrgica Mecánica. Capítulo II. Deformación: Criterio de Von-Mises. Ed Limusa. 1999. Página 82.

temperaturas y las RPM que debe soportar el disco rotor. En la misma simulación se encontró que la concentración de esfuerzos es mínima para el área de los soportes de los tornillos aseguradores, esto se puede deber a que el área es mayor en esta zona que en el exterior.

Figura 41. Deformación Total y Equivalencia de Esfuerzos del Anillo Retenedor

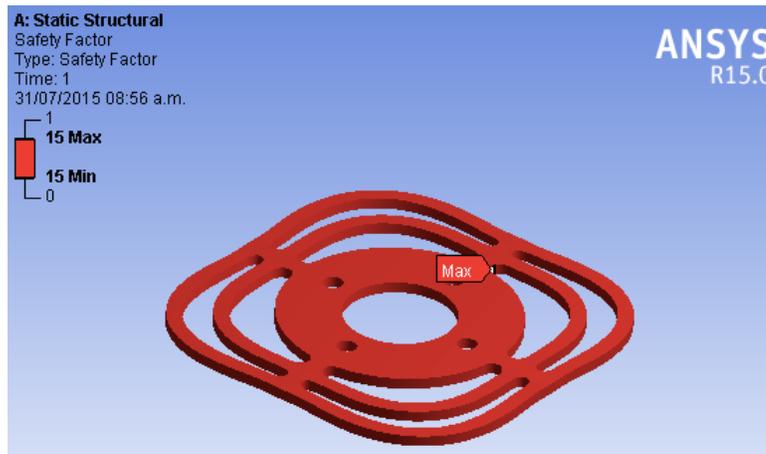


Fuente: Autores

Debido a la deformación total encontrada en el análisis, se puede observar en la Figura 42. que esta deformación ocurre para el caso del anillo retenedor con un factor de seguridad muy superior a 15, pero ha de aclararse que al igual que en los álabes de rotor solo se tuvo en cuenta una carga elemental que fue la presión y se obviaron la temperatura y la fuerza centrífuga de los álabes en la ranura exterior, lo que podría hacer que este factor de seguridad disminuya.

A pesar de esto, se puede decir que con los resultados obtenidos para un ciclo de 60000 RPM, construir el anillo en Acero Inoxidable 304 y con un espesor de 3 mm como se planteó en el modelamiento, es válido para los rangos de operación de la turbina libre en caso de hacerla funcional.

Figura 42. Factor de Seguridad Anillo Retenedor



Fuente: Autores

6.3. SELECCIÓN DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

En base al análisis estructural computacional realizado anteriormente y a los resultados obtenidos, se comparan los máximos esfuerzos estructurales con las propiedades físicas del acero inoxidable 304 que se muestran en la Tabla 9.

Tabla 7. Comparación de Resultados Estructurales

RESULTADO ANÁLISIS	PROPIEDADES FÍSICAS INOX 304
Álabe – Esfuerzo Equivalente Máximo: 420,7 MPa	Tensión de Rotura: 579,16 MPa
Anillo Retenedor – Esfuerzo Equivalente Máximo: 5,47 MPa	Límite Elástico: 255,16 MPa
Temperatura Máxima en la Turbina: 723,4 °C	Intervalo de Fusión: 1398 °C – 1454 °C

Fuente: Autores

Para la fabricación de todos los componentes usados en el prototipo de la turbina libre se escogió el Acero Inoxidable SAE 304, por su alta dureza, resistencia a altas temperaturas y facilidad de adquisición. Además, de ser una maqueta no funcional. En la Tabla 8. se puede observar la composición química de este tipo de acero.

Tabla 8. Composición Química del Acero Inoxidable SAE 304

TIPO AISI		304 / 304L	316 / 316L	310
Composición Química	C %	0,07/0,03 máx.	0,08/0,03 máx.	0,15 máx.
	Mn %	2,00 máx.	2,00 máx.	2,00 máx.
	Si %	1,00 máx.	1,00 máx.	1,50 máx.
	Cr %	18,0 a 20,0	16,0 a 18,0	24,0 a 26,0
	Ni %	8,0 a 10,5	10,0 a 14,0	19,0 a 22,0
	Mo %		2,00 a 2,50	

Fuente: INCO. Aceros inoxidables. Composición Química del Acero Inoxidable 304. [En Línea]. [10 de julio de 2015]. Disponible en: <<http://inco.com.uy/institucional/propiedades/>>

Entre las propiedades más importantes de este tipo de acero se encuentra su resistencia general a la corrosión, su buena formabilidad y soldabilidad. En la Tabla 9. se mencionan las propiedades físicas para el Acero Inoxidable SAE 304.

Tabla 9. Propiedades Físicas del Acero Inoxidable SAE 304

TIPO AISI	304	UNIDAD
Densidad	8,027	g/cm ³
Coefficiente de Expansión Térmica	0,00	0/°C
Conductividad Térmica	17	W/m°C
Calor Específico	500	J/kg°C
Modulo de Elasticidad	193.000	MPa
Coefficiente de Poisson	0,29	-
Límite Elástico	255,160	MPa
Tensión de Rotura	579,160	MPa
Elongación %	0,00	-
Intervalo de Fusión	1398-1454	°C

Fuente: LLANOS SERNA, Alexander; MANTILLA BARBOSA, Jorge y ZAMBRANO ÁNGEL, Jefferson. Model Design Engine Turbofan JP1. Trabajo de Grado. Ingeniería Aeronáutica. Bogotá D.C.: Universidad de San Buenaventura. Facultad de Ingeniería, 2008. 252 p.

6.4. FABRICACIÓN DE LOS COMPONENTES

Después de modelar cada uno de los componentes del prototipo de la turbina libre, realizar los análisis estructurales a sus piezas más críticas y seleccionar el material más adecuado para su construcción; se prosigue con el proceso de fabricación y manufactura de cada uno de sus componentes, en los que se llevaron a cabo procesos de maquinado, soldado y pulido que se muestran a continuación.

6.4.1. Construcción Álabes de Rotor y Estator

Para la construcción de los álabes de rotor y estator se contrato a la compañía TEC-LASER S.A. ubicada en la ciudad de Bogotá, los cuales a partir del modelamiento de las piezas mencionadas en el numeral 6.1.1. realizaron el corte de cada álabe a precisión en el equipo CNC, como se muestra en la Figura 43. Para el caso de los álabes de rotor la lámina usada fue de Acero Inoxidable calibre 14 y para los álabes de estator se uso una lámina de Acero Inoxidable calibre 12. Aunque en el numeral 6.2.1. se determinó que el material adecuado para los álabes es el Acero 4340, por las limitaciones económicas y por no ser un artefacto funcional, se decidió utilizar el Acero Inoxidable 304 para el prototipo de la turbina libre.

Figura 43. Corte a Láser de Álabes de Rotor y Estator



Fuente: Autores

Para lograr el perfil con forma aerodinámica en cada uno de los 40 álabes de rotor y cada uno de los 26 álabes de estator fue necesario el uso de esmeril y lima plana, como se muestra en la Figura 44.

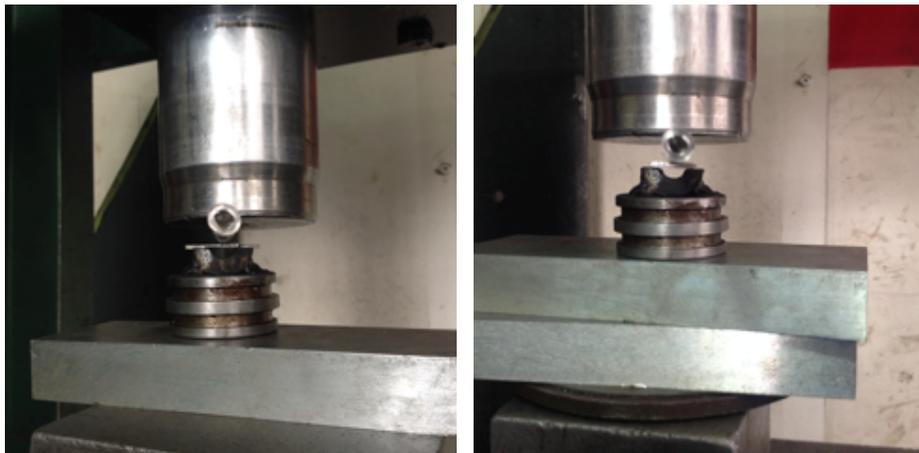
Figura 44. Trabajo del Perfil en Cada Álabes de Rotor y Estator



Fuente: Autores

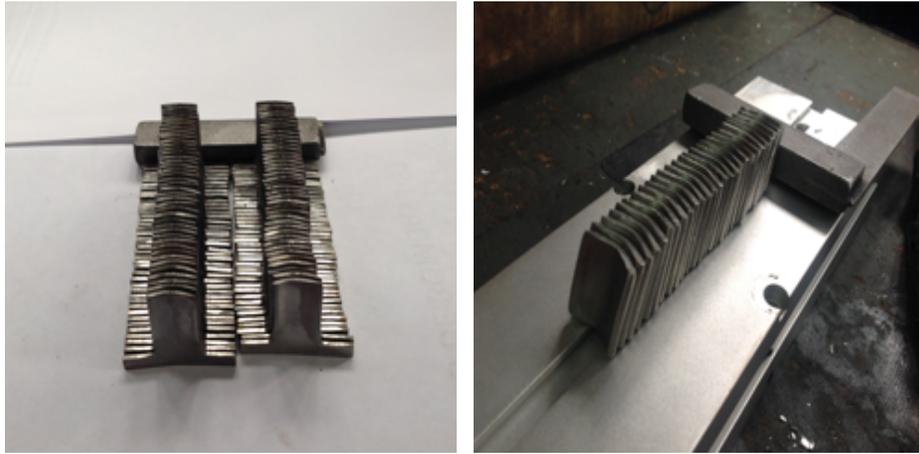
Después de lograr el acabado deseado en cada perfil, se prosiguió a realizar la curvatura (cámber) en cada álabes, por medio de la prensa hidráulica y con un conjunto troquel de macho-hembra en acero inoxidable.

Figura 45. Conjunto Troquel Macho-Hembra



Fuente: Autores

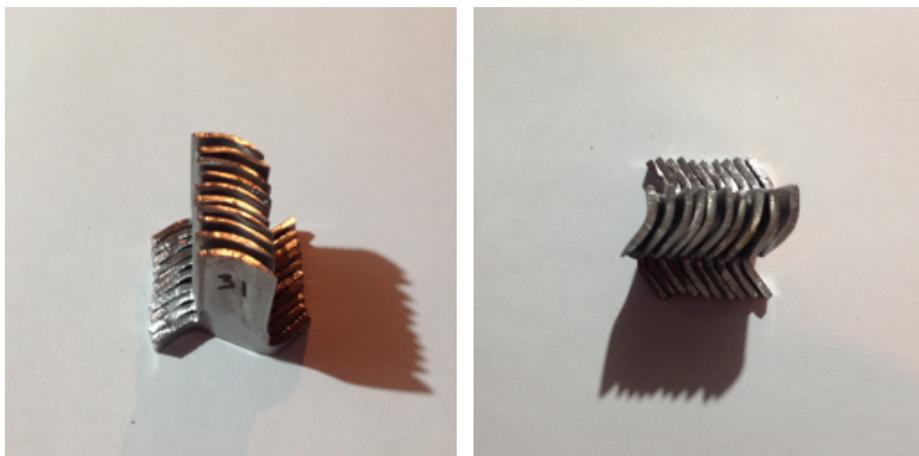
Figura 46. Cámbier de Álabes de Rotor y Estator



Fuente: Autores

Para finalizar la fabricación de los álabes de rotor, es necesario doblar las puntas que se aseguran en el anillo retenedor, esto con el fin de que encajen sin complicaciones en el disco rotor. Este procedimiento se llevó a cabo por medio de una prensa y un martillo, en la Figura 47. se muestra el resultado de este procedimiento.

Figura 47. Doble en Puntas Aseguradoras del Álabes de Rotor

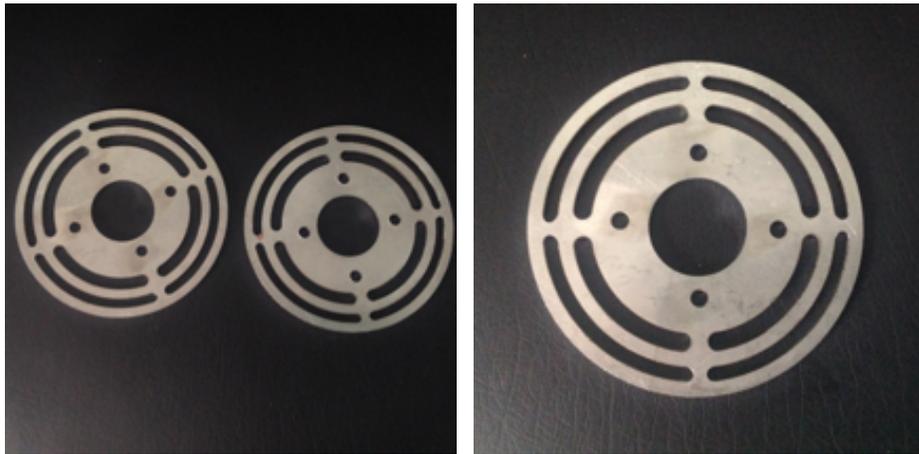


Fuente: Autores

6.4.2. Construcción del Anillo Retenedor

Al igual que los álabes de rotor y estator, los anillos retenedores que aseguran el ensamble del disco rotor, fueron cortados a láser en la empresa TEC-LÁSER S.A. según el modelo de diseño planteado en el numeral 6.1.3. Los anillos retenedores se cortaron en lámina de Acero Inoxidable calibre 10, una lamina gruesa debido a las cargas que este debe soportar.

Figura 48. Anillo Retenedor Cortado a Láser

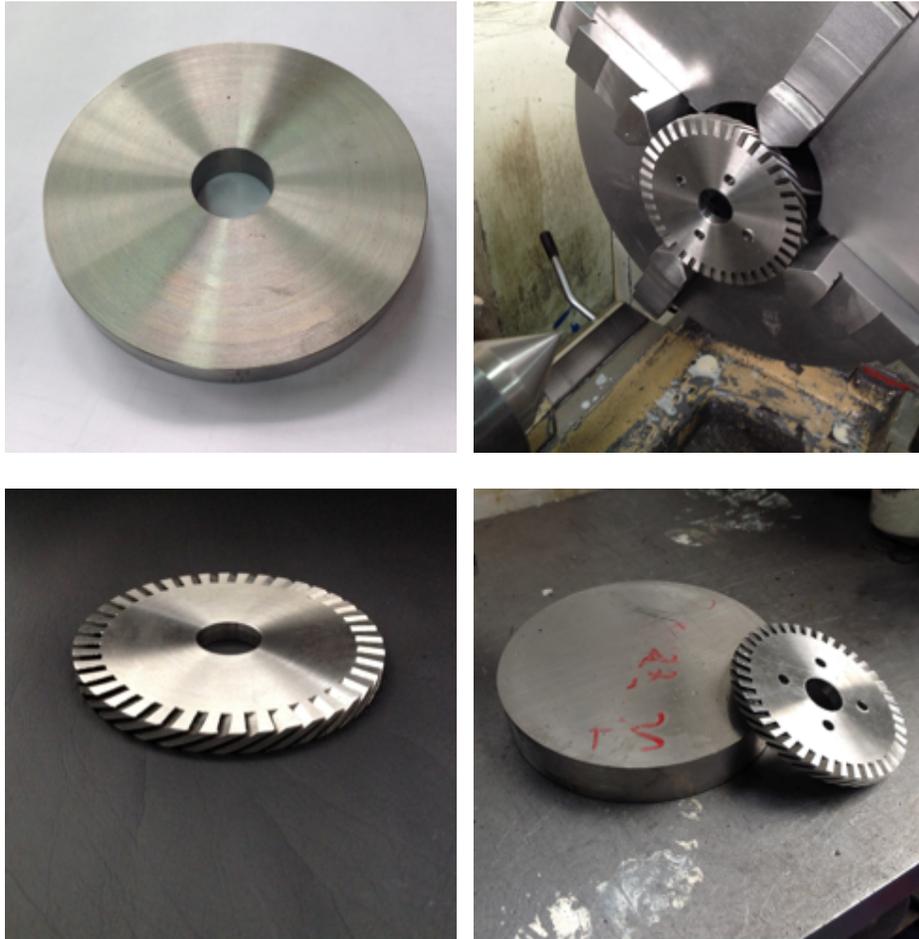


Fuente: Autores

6.4.3. Construcción del Disco de Rotor

Para la construcción del disco rotor se partió de un disco de acero inoxidable de 18 cm de diámetro por 3 cm de largo, el cual debe maquinarse hasta obtener las medidas necesarias. Para este proceso se contó con la contratación de la empresa COUCH AVIATION S.A.S., en donde fue necesario el uso de torno convencional para el desbaste del disco y de fresa con guía para el ranurado del disco a 60 grados, como se estableció en el numeral. En la Figura 49. se puede observar parte de este procedimiento.

Figura 49. Fabricación Disco de Rotor

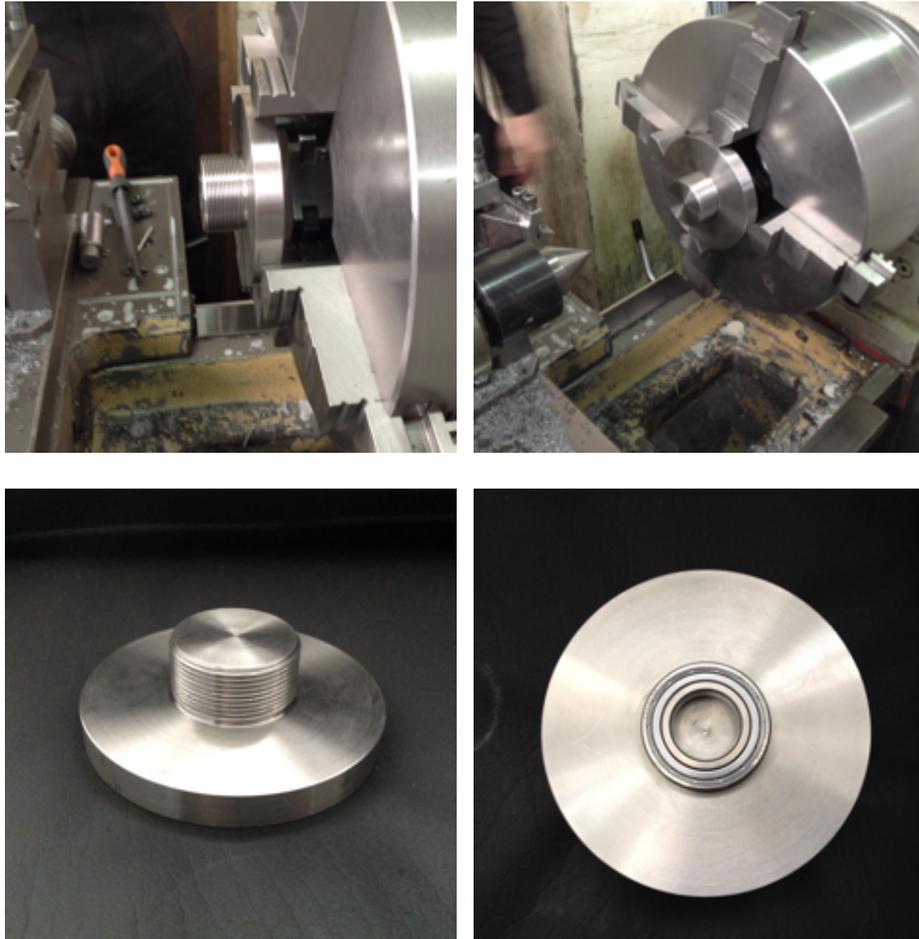


Fuente: Autores

6.4.4. Construcción del Disco de Estator

Para el disco de estator se partió igualmente de un disco de acero inoxidable de 18 cm de diámetro por 4 cm de longitud. Se realizaron procesos similares a los mencionados anteriormente en el numeral 6.4.3., además de la elaboración del roscado bajo el diseño planteado en el numeral 6.1.7. Todo este procedimiento se realizó igualmente bajo la contratación de la empresa COUCH AVIATION S.A.S.

Figura 50. Fabricación Disco de Estator

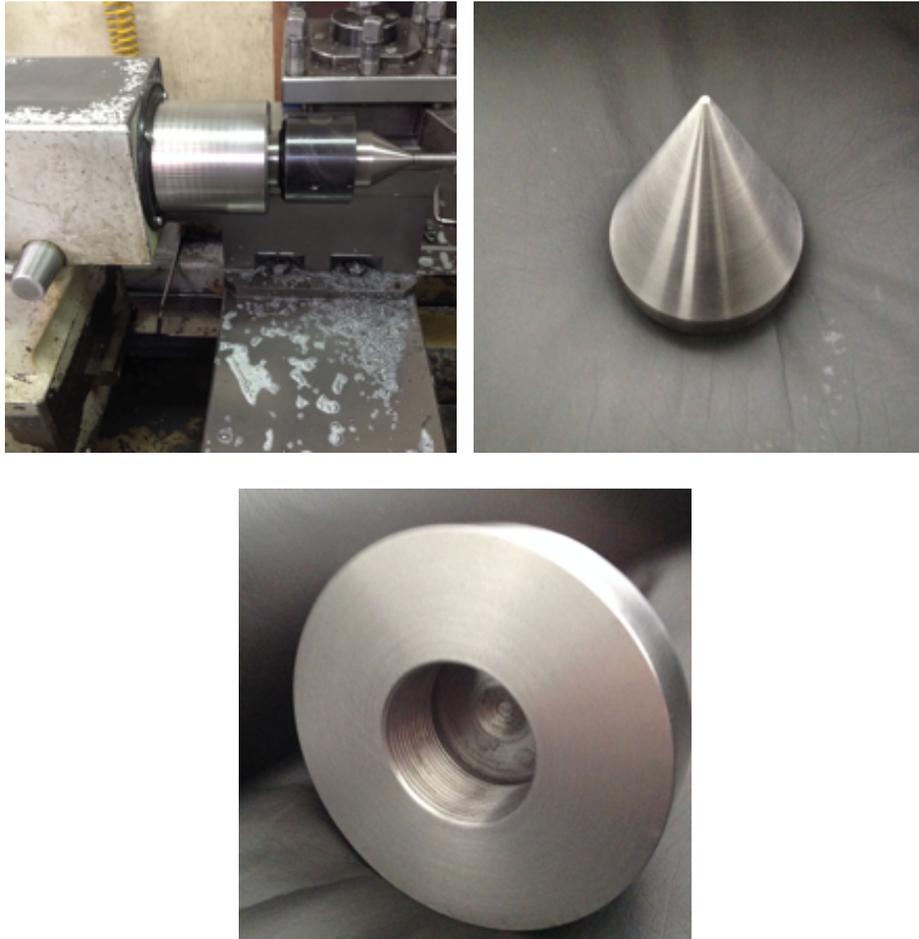


Fuente: Autores

6.4.5. Construcción del Spinner

En la construcción del spinner se utilizó un cilindro de acero inoxidable de 15 cm de diámetro por 16 cm de largo, al cual se le dio forma por medio de torno convencional, contando en su parte posterior con el roscado para poder acoplar el disco de estator y un poco más de luz para permitir que el eje gire libremente sin chocar con la pared.

Figura 51. Construcción Spinner de Turbina Libre



Fuente: Autores

6.4.6. Construcción del Case de Turbina

La construcción del case de turbina se realizó por medio de la adquisición de tubería petrolera de acero inoxidable con dimensiones de 16 cm de diámetro interno por 25 cm de longitud, a la cual por medio de soldadura especial con equipo MIG se le añadió la brida de unión a la tobera de salida como se muestra en la Figura 52. Para permitir la visualización de los componentes internos del prototipo de la turbina, se realizó un corte en el área longitudinal del case.

Figura 52. Construcción Case de Turbina



Fuente: Autores

6.4.7. Construcción de la Tobera de Salida

Al igual que el case de turbina, por medio de la adquisición de tubería petrolera de acero inoxidable, se realizó la tobera de salida y se soldó la brida de aseguramiento, pero a diferencia del anterior, ésta es un codo curvo que direcciona los gases de salida en un sentido diferente al generador.

Para permitir que el eje pueda salir hacia el generador, es necesario perforar el codo por medio del torno como se muestra en la Figura 54., así mismo después de perforado el codo; se suelda un acople especial en forma de tubo, al cual se le realiza una chaveta para que se amolde a la tobera; este acople tiene como

función albergar el segundo rodamiento que permite el libre giro del eje de la turbina.

Figura 53. Construcción Tobera de Salida



Fuente: Autores

Figura 54. Modificaciones Tobera de Salida



Fuente: Autores

6.4.8. Construcción del Sello del Case

Basados en las bridas construidas para la unión del case de turbina y la tobera de salida, se fabricó un sello de caucho para esta unión. El material a escoger fue el neopreno, debido a que es una goma sintética con propiedades para anticorrosivas y de resistencia a altas temperaturas.

Figura 55. Sello del Case de Turbina



Fuente: Autores

6.4.9. Construcción del Eje de Turbina

Se adquirió una barra de acero inoxidable en la compañía ACEFER Y CIA. LTDA., de una pulgada por 70 cm de largo, con la que se fabricó el eje de turbina. Para poder acoplar este eje al generador eléctrico se realizó un roscado en una de sus puntas como se observa en la Figura 56. Para finalizar el proceso de fabricación del eje, se realizó un proceso de cincado con el fin de eliminar impurezas en el material protegiéndolo de la oxidación y la corrosión.

Figura 56. Eje de Turbina Libre



Fuente: Autores

6.4.10. Rodamientos para la Turbina Libre

De acuerdo con los cálculos realizados para la turbina libre, en el Anexo A se menciona el tipo de rodamiento que cumple con los requerimientos de operación para un diseño funcional de la turbina. Sin embargo, para el caso del prototipo y por condiciones económicas, se adquirió un rodamiento que cumple con los requerimientos básicos de la turbina con la referencia SKF 6005-2Z.

Figura 57. Rodamiento SKF 6005-2Z



Fuente: Autores

6.4.11. Generador Eléctrico para la Turbina Libre

Para el prototipo de la turbina libre, se decidió acoplar el alternador de un automóvil como generador que se conecta al eje del rotor para la generación de energía. En el Anexo B de este documento, se especifica el tipo de generador eléctrico a utilizar y sus características principales, con el fin de emplearlo en una turbina libre completamente funcional.

Figura 58. Generador de Turbina Libre



Fuente: Autores

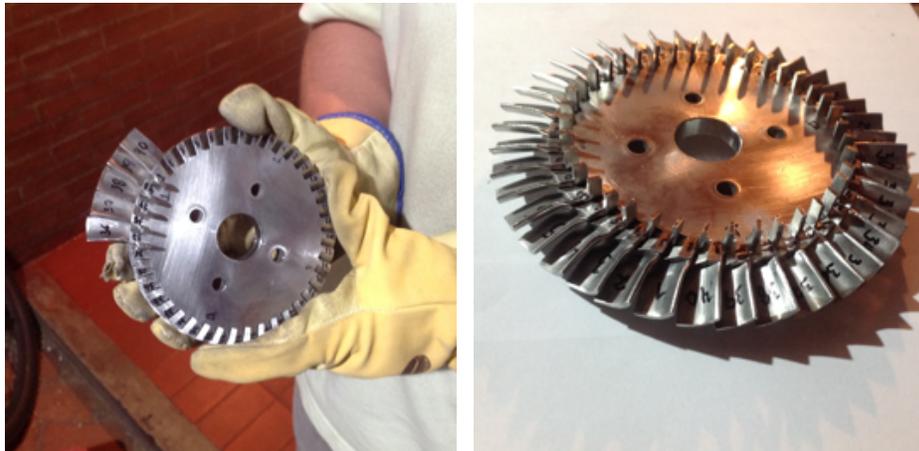
7. ENSAMBLE DEL PROTOTIPO DE TURBINA LIBRE

Una vez terminada la construcción de cada uno de los componentes del prototipo de la turbina libre, se procede a realizar el ensamble de cada uno de sus componentes principales, como los son el conjunto rotor, el conjunto estator, el case de la turbina y el acople al generador eléctrico.

7.1. ENSAMBLE DEL CONJUNTO ROTOR

El rotor es el principal componente de la turbina libre y de su ensamble depende una correcta operación cuando este prototipo se haga funcional. En la Figura 59. se muestra el proceso de ensamble entre los álabes y el disco de rotor.

Figura 59. Ensamble de los Álabes en el Disco Rotor



Fuente: Autores

Seguido al montaje de cada uno de los 40 álabes de rotor, se procede a fijarlos con los anillos retenedores en una especie de estructura tipo sándwich, para luego asegurarlos con los tornillos de cabeza brístol de un cuarto de pulgada como se observa en la Figura 60.

Figura 60. Ensamble Final del Rotor de Turbina



Fuente: Autores

Como se mencionó, el material de construcción del rotor de turbina es acero inoxidable 304, sin embargo, para evitar futuros daños en el material como corrosión u oxidación, se sometió el rotor completo a un proceso de cincado, con el fin de eliminar impurezas y dar un acabado más estético a la pieza completa como se puede ver en la Figura 61.

Figura 61. Rotor Cincado



Fuente: Autores

7.2. ENSAMBLE DE LA ETAPA DE TURBINA

La etapa de turbina se compone del conjunto rotor y del eje de turbina libre. Este es el ensamble principal de toda la turbina, ya que es el encargado de transmitir la energía mecánica al generador, para que este la transforme en energía eléctrica.

Para lograr este ensamble se inserta el eje en el disco rotor y se asegura con pin ejes para evitar el desplazamiento longitudinal del disco y situarlo en la posición deseada, como se muestra en la Figura 62.

Figura 62. Ensamble Etapa de Turbina

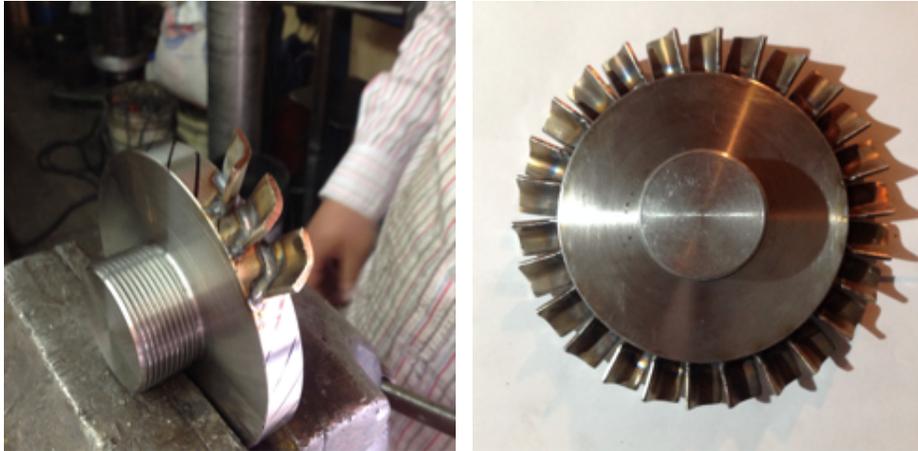


Fuente: Autores

7.3. ENSAMBLE DEL CONJUNTO ESTATOR

El ensamble completo del estator se realizó por medio de equipo de soldadura MIG, esto permitió fijar los alabes de estator a la pared externa del disco de estator ubicados a 55 grados cada uno del eje, como se muestra en la Figura 63.

Figura 63. Soldado Álabes de Estator



Fuente: Autores

Por último, se soldó el estator armado a la pared interna del case.

Figura 64. Estator Soldado al Case



Fuente: Autores

7.4. ENSAMBLE DEL CASE DE LA TURBINA LIBRE

El ensamble del case de la turbina libre se compone del case del rotor y la tobera de salida, los cuales se aseguran con ocho tornillos cabeza brístol de media pulgada por medio de las bridas de seguridad, como se muestra en la figura.

Figura 65. Ensamble Case de Turbina Libre



Fuente: Autores

Además, en este ensamble se debe insertar el segundo rodamiento que soporta el eje de turbina libre y el sello de caucho de seguridad.

7.5. ENSAMBLE DEL ROTOR AL GENERADOR ELÉCTRICO

El modo de ensamblar el rotor al generador eléctrico, es por medio del roscado del eje de la turbina al acople que se le adaptó al generador en la polea giratoria. Esta unión debe ser totalmente concéntrica y alineada, para que el disco rotor gire con total libertad dentro del case de la turbina, como se muestra en la Figura 66.

Además, es importante lubricar las partes móviles del generador eléctrico para que giren con facilidad y no actúen como freno del disco rotor.

Figura 66. Ensamble al Generador Eléctrico



Fuente: Autores

7.6. ENSAMBLE DEL CONJUNTO COMPLETO DE LA TURBINA LIBRE

Por último, para terminar de ensamblar todos los componentes de la turbina libre, se une el spinner al disco del estator y se coloca el prototipo ensamblado de la turbina en la base de soporte que se modelo en el numeral 6.1.14. Además, se dan los acabados de pintura que se detallan en el Anexo C.

Figura 67. Ensamble Final Prototipo Turbina Libre



Fuente: Autores

8. ENSAMBLE FINAL DEL PROTOTIPO DE TURBINA LIBRE

Figura 68. Vista Isométrica del Prototipo de Turbina Libre



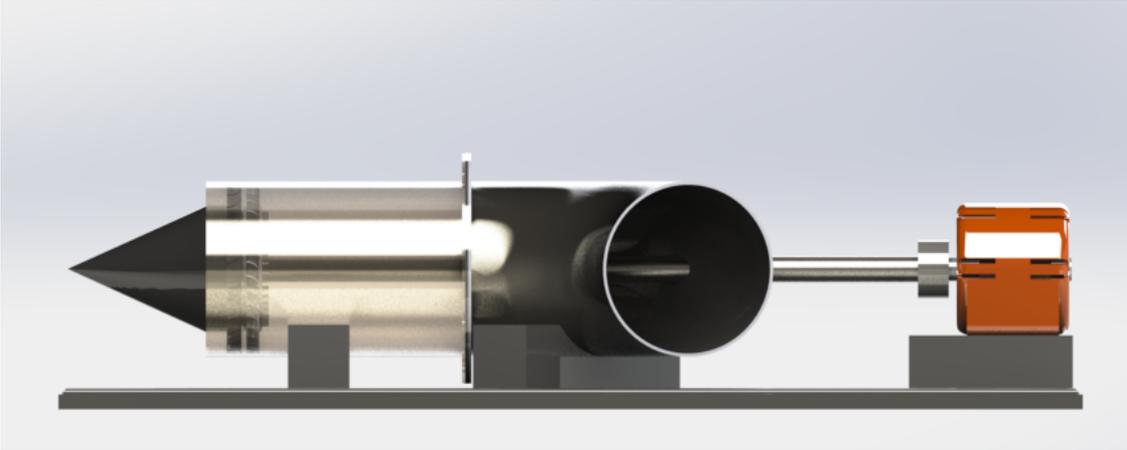
Fuente: Autores

Figura 69. Vista Superior del Prototipo de Turbina Libre



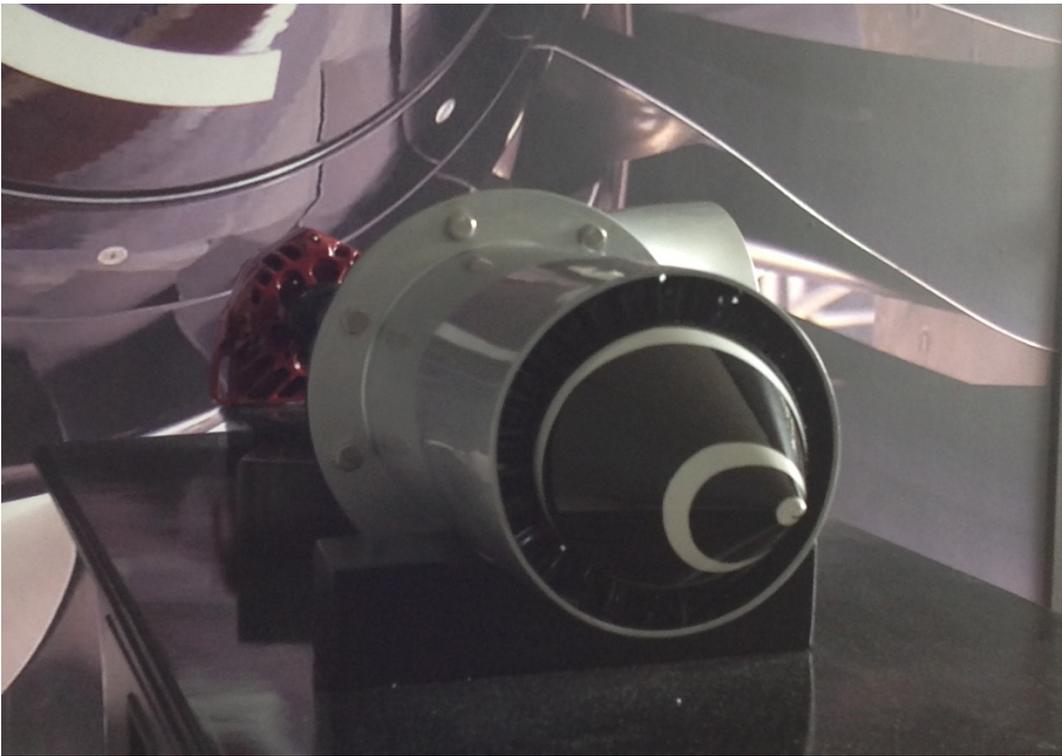
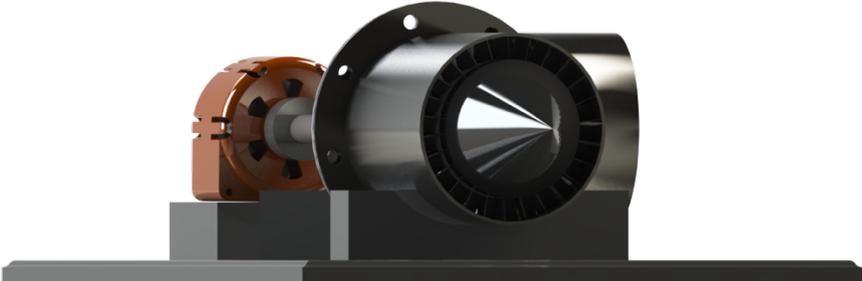
Fuente: Autores

Figura 70. Vista Lateral del Prototipo de Turbina Libre



Fuente: Autores

Figura 71. Vista Frontal del Prototipo de Turbina Libre



Fuente: Autores

Figura 72. Explosionado del Prototipo de Turbina Libre



Fuente: Autores

9. CONCLUSIONES

A continuación se presentan los resultados obtenidos durante la realización de este trabajo de investigación y en cada uno de sus procesos.

Cada resultado está directamente relacionado con cada uno de los objetivos que se plantearon en el inicio de este trabajo.

Con base en el Motor RGG1, se diseñó y fabricó una turbina libre para la generación de energía, obteniendo los siguientes resultados:

- ✓ Estableciendo los requerimientos preliminares, se diseñó y calculó la turbina libre por medio del análisis termodinámico y gasodinámico planteado en el fundamento teórico. Gracias a estos cálculos de diseño, se lograron obtener valores importantes, como la potencia de la turbina que es entregada al generador, con un valor de 336 HP, potencia suficiente para abastecer de energía eléctrica una casa de familia durante varios meses. Este es un valor significativo, debido a que a diferencia de las etapas de turbina de un motor a reacción, la turbina libre entrega casi el 90 por ciento de su potencia por medio del eje al generador eléctrico, y no al compresor, como sucede en dichos motores.
- ✓ Realizando cálculos geométricos, se determinaron las dimensiones físicas de los componentes principales de la turbina libre, como lo son el conjunto rotor y el conjunto estator, obteniendo un diámetro general para la turbina de 16 cm lo que la hace más fácil de acoplar al motor de reacción RGG1 en el que se basó este trabajo.
- ✓ Es necesario antes de comenzar cualquier proceso de construcción o fabricación, modelar en un software de diseño asistido cada una de las partes que se desean construir. Esto con el fin de evitar pérdidas en el material, realizar correcciones abruptas que puedan comprometer todo el trabajo, facilitar el análisis estructural computacional y el corte a láser de algunos componentes en base a dichos modelos, además de generar planos de trabajo que son de gran utilidad para el proceso de fabricación. Para el caso de la turbina libre, se modeló cada una de las piezas que la conforman, desde los tornillos aseguradores, hasta la base que soporta el prototipo. Esto con el objetivo de facilitar el proceso de construcción y llevarlo a cabo en el menor tiempo posible, además de reducir los costos en una manera considerable.

- ✓ Otro proceso importante antes de iniciar la fase de construcción, es el análisis computacional de esfuerzos y cargas a las partes más críticas de la turbina libre. En este proceso se determinó el material a utilizar en la construcción de los componentes principales de la turbina, como lo fue determinar que el material seleccionado para los álabes de rotor, el Acero 4340, no es adecuado estructuralmente para soportar los parámetros de operación de la turbina libre, por lo que se deben realizar análisis más detallados y llegado el caso seleccionar otro tipo de material para su construcción como se mencionó anteriormente. Sin embargo, para efectos del prototipo se seleccionó el acero inoxidable 304, como material de construcción.
- ✓ Una vez concluidos estos procesos y utilizando los resultados obtenidos en ellos, se fabricaron y ensamblaron cada uno de los componentes que conforman la turbina libre, como lo son el conjunto estator, el conjunto rotor, el case de turbina, y demás componentes que hacen que este prototipo se pueda modificar para hacerlo un artefacto totalmente funcional. Además, este proceso se consideró como uno de los más importantes, debido a que sirvió como fuente de conocimiento y destrezas en la construcción de componentes mecánicos.
- ✓ Por último, se cumplió con uno de los principales objetivos de este trabajo, si no el más importante. Se construyó un prototipo que sirve como base para la implementación de la turbina funcional y su adaptación en la central de ciclo combinado. Esto por medio de una serie de modificaciones y ajustes necesarios que se dan a conocer a continuación.

10. RECOMENDACIONES

Con el fin de hacer funcional el prototipo de turbina libre realizado y hacerlo parte de la central de ciclo combinado que se planea construir en la universidad, se recomienda realizar las siguientes modificaciones y ajustes:

- ✓ Adaptar al conjunto estator un dispositivo de admisión tipo divergente, unido a la tobera de salida del Motor a Reacción RGG1, con el fin de aprovechar por completo los gases de escape y dirigirlos hacia la turbina libre.
- ✓ Adquirir y cambiar los rodamientos convencionales por los rodamientos híbridos que se mencionan en el Anexo "A".
- ✓ Cambiar el material de los álabes del rotor, por Acero 4340, o por el material más adecuado que sirva para su construcción como se mencionó anteriormente. Esto con el fin de que en el momento de hacer funcional la turbina libre, estos álabes no se vean afectados estructuralmente.
- ✓ Aplicar recubrimiento cerámico a los componentes de la turbina libre que están expuestos a altas temperaturas, como lo son el spinner de turbina, el conjunto rotor y el eje de la turbina libre, con el objetivo de hacerlos más resistentes a la deformación térmica. Se debe tener en cuenta que este recubrimiento no afecte las dimensiones de los componentes, especialmente del conjunto rotor.
- ✓ Adquirir e implementar el generador eléctrico recomendado en el Anexo "B" y diseñar un acople que permita ensamblarlo al eje de turbina libre, para así producir la energía eléctrica deseada.

Una vez se hallan realizado cada una de las modificaciones mencionadas anteriormente, se podrán realizar las pruebas funcionales a la turbina libre, para finalmente implementarla a la central de ciclo combinado, que es lo que se busca con este trabajo.

11. BIBLIOGRAFÍA

ALVARADO VICUÑA, Yury Mike. Una Metodología de Diseño para Turbinas de Gas de Flujo Axial. Trabajo de Grado. Ingeniero Mecánico-Eléctrico. Lima: Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería, 2009. 157p.

CENGEL, Yunus y BOLES Michael. Termodinámica. Sexta Edición. México. Ed. McGraw Hill. 2009. 993p.

CUESTA ÁLVAREZ, Martín. Motores a Reacción. Tecnología y Operación de Vuelo. España. 5ta Edición. Ed. Paraninfo. 1980. 552p.

ENDESA. Endesa Educa. Centrales Térmicas de Ciclo Combinado. [En Línea] [10 de junio de 2015] Disponible en: <http://www.endesaeduca.com/Endesa_educa/recursos-interactivos/produccion-de-electricidad/ix.-las-centrales-termicas-de-ciclo-combinado>

ESCOBAR GARZÓN, Arnold. Diseño y Construcción de Turborreactores de Bajo Flujo Másico. Colombia. Ed. Militar Aeronáutica. 2008. 220p.

ESTUDIO DEL CICLO BRAYTON. Diagramas P-V del ciclo Brayton. [En línea] [11 de junio de 2015]. Disponible en <http://www.uhu.es/gabriel.lopez/comun/pract_Brayton.pdf>

FARRAND ALTERNATOR. Tecnología del Alternador. Generadores Síncronos y Asíncronos. [En línea] [20 de julio de 2015]. Disponible en: <<http://spanish.brushlessynchronousgenerator.com/sale-2707996-800-kw-1000kva-double-bearing-alternator-ac-brushless-exciter-synchronous-generator.html>>

GONZÁLEZ OLARTE, Oferman Darío; GUTIÉRREZ NOVOA, Jeison Fabián y QUINTERO RODRÍGUEZ, Jairo. Diseño y Construcción de un Turbo Jet Bajo el Funcionamiento de un Turbo Cargador. Trabajo de Grado. Ingeniería Aeronáutica. Bogotá D.C.: Fundación Universitaria Los Libertadores. Facultad de Ingeniería, 2014. 216p.

GONZÁLEZ BEJARANO, Leidy Johana y FLÓREZ CASTIBLANCO, Alexandra. Diseño y Simulación de una Turbina para un Motor Turbojet CJ 610-4. Trabajo de Grado. Ingeniería Aeronáutica. Bogotá D.C.: Universidad de San Buenaventura. Facultad de Ingeniería, 2013. 142p.

HIH SARAVANAMUTTOO. Gas Turbine Theory. 4th Edition. Cambridge. Ed. Macomb. 1983. 435p.

ICONTEC. Compendio. Tesis y Otros Trabajos de Grado. Quinta Actualización. Bogotá D.C. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. 2008. 110p.

INCO. Aceros inoxidables. Composición Química del Acero Inoxidable 304. [En Línea]. [10 de julio de 2015]. Disponible en: <<http://inco.com.uy/institucional/propiedades/>>

LLANOS SERNA, Alexander; MANTILLA BARBOSA, Jorge y ZAMBRANO ÁNGEL, Jefferson. Model Design Engine Turbofan JP1. Trabajo de Grado. Ingeniería Aeronáutica. Bogotá D.C.: Universidad de San Buenaventura. Facultad de Ingeniería, 2008. 252p.

MALDONADO QUISPE, Francisco. Diseño de una Turbina de Río para la Generación de Electricidad. Trabajo de Grado. Ingeniería Mecánica. Lima: Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Facultad de Ciencias Físicas. 2005. 69p.

MATTINGLY, Jack D. Elements of Propulsion: Gas Turbines and Rockets. United States. Ed. American Institute of Aeronautics and Astronautics. 2006. 852p.

OÑATE, Esteban. Turborreactores. Teoría, Sistemas y Propulsión de Aviones. España. Ed. Paraninfo. 1981. 495p.

MOTT, Robert L. Diseño de Elementos de Máquinas. Cuarta Edición. México. Ed. Pearson Educación. 2006. 868p.

SÁINZ DÍEZ, Valentín. El Motor de Reacción y sus Sistemas Auxiliares. Novena Edición. España. Ed. Paraninfo. 2007. 241p.

SKF. Hybrid Bearings. A solution for improved reability under severe operating conditions. Product Catalog. [en línea] [20 de Julio de 2015]. Page 1. Disponible en <<http://www.skf.com/binary/96-48505/12507-EN-Hybrid-bearings.pdf>>

UNESA. Asociación Española de la Industria Eléctrica. Sector Eléctrico. Central de Ciclo Combinado. [En Línea] [20 de marzo de 2015] Disponible en: <<http://www.unesa.es/sector-electrico/funcionamiento-de-las-centrales-electricas/1343-central-ciclo-combinado>>

ANEXOS

Anexo A. RODAMIENTOS RECOMENDADOS PARA LA TURBINA LIBRE FUNCIONAL

Rodamientos Híbridos SKF de Alta Velocidad y Temperatura

Los rodamientos adecuados para usar en la turbina libre funcional son los rodamientos híbridos, fabricados por la compañía SKF. Estos cuentan con una gran variedad de características que hacen posible la correcta operación de la turbina libre.

La gama de rodamientos híbridos SKF de una hilera de bolas, cuentan con recubrimientos cerámicos y se encuentran lubricados con grasa para su óptimo funcionamiento, es por esta razón que este tipo de rodamientos son especialmente adecuados para instalarse en:

- ✓ Motores de Turbinas de Aire
- ✓ Motores Eléctricos
- ✓ Motores Neumáticos

Los rodamientos híbridos tienen aros de acero cromados y elementos rodantes de nitruro de silicio especial. El material cerámico, nitruro de silicio, se fabrica mediante un proceso de compactación de polvo a alta temperatura (~1.800 °C) y alta presión (~200 MPa), como se muestra en la Figura. El proceso especificado por SKF crea un material cerámico sólido sin ninguna porosidad y con una buena resistencia²⁴.

²⁴ SKF. Hybrid Bearings. A solution for improved reability under severe operating conditions. Product Catalog. [En línea] [20 de Julio de 2015]. Disponible en <<http://www.skf.com/binary/96-48505/12507-EN-Hybrid-bearings.pdf>>

Figura 73. Rodamientos Híbridos SKF



Fuente: SKF. Hybrid Bearings. A solution for improved reability under severe operating conditions. Product Catalog. [en línea] [20 de Julio de 2015]. Page 1. Disponible en <<http://www.skf.com/binary/96-48505/12507-EN-Hybrid-bearings.pdf>>

Esta gama de rodamientos híbridos puede sustituir a los rodamientos convencionales de acero lubricados con grasa, en los motores eléctricos de alta velocidad y turbinas de gas.

Los rodamientos híbridos pueden ofrecer una mayor duración gracias a:

- ✓ Una mayor vida de la grasa
- ✓ El buen rendimiento en corrientes de aire y condensación
- ✓ La alta resistencia al desgaste por contaminación de partículas (arena, pigmentos, abrasivos, acero, óxido de hierro, etc.)
- ✓ La resistencia a las corrientes eléctricas

Fuerzas Centrífguas en los Rodamientos

Normalmente, los rodamientos híbridos SKF se pueden usar a velocidades superiores a las normales de referencia indicadas en el Catálogo General de SKF para los rodamientos rígidos de bolas estándar lubricados con grasa. Esto se debe a que el nitruro de silicio tiene una mayor densidad en comparación con el acero. La fuerza centrífuga de una bola cerámica en un rodamiento es del 40% de la de una bola de acero a la misma velocidad. Cuanto mayores sean las cargas centrífugas, más elevadas serán las temperaturas en el rodamiento²⁵. En la Tabla 10. se observan las propiedades que diferencian los rodamientos de acero normal con los de nitruro de silicio especial, como es el caso de los rodamientos híbridos de SKF.

Tabla 10. Diferencia entre los Rodamientos Generales y los Rodamientos de Nitruro de Silicio Especial

Comparison of material properties		
Properties	Bearing steel	Bearing grade silicon nitride
Compressive strength [MPa]	-2 300	3 000
Tensile strength [MPa]	-1 900	800
Elastic modulus [GPa]	210	310
Hardness HV10 [kg/mm ²]	700	1 600
Electrical resistivity [Ω m]	$0,4 \times 10^{-6}$ (conductor)	10^{12} (insulator)
Density [g/cm ³]	7,9	3,2
Coefficient of thermal elongation [10^{-6} /K]	11,7	3

Fuente: SKF. Hybrid Bearings. A solution for improved reability under severe operating conditions. Product Catalog. [en línea] [20 de Julio de 2015]. Page 2. Disponible en <<http://www.skf.com/binary/96-48505/12507-EN-Hybrid-bearings.pdf>>

²⁵ SKF. Hybrid Bearings. A solution for improved reability under severe operating conditions. Product Catalog. [En línea] [20 de Julio de 2015]. Disponible en <<http://www.skf.com/binary/96-48505/12507-EN-Hybrid-bearings.pdf>>

Anexo B. GENERADOR ELÉCTRICO RECOMENDADO PARA LA TURBINA LIBRE FUNCIONAL

Generadores Síncronos para Turbinas de Gas

Los generadores síncronos son conocidos en el mundo de la ingeniería como máquinas eléctricas rotativas con la capacidad de transformar energía mecánica en energía eléctrica, también son conocidos como alternadores.

En la actualidad existen generadores asíncronos y síncronos, ambos con principios de funcionamiento muy diferentes. En las turbinas de gas son más usados los generadores síncronos, estos generadores se componen de dos partes principales:

- ✓ Estator
- ✓ Rotor

Estas partes son alimentadas desde afuera (en el caso de las turbinas de gas se alimentan del movimiento generado por el eje principal), ambas partes se encuentran devanadas, al mover el rotor desde afuera a través del eje que se observa en la Figura., se mueve el campo magnético del rotor lo cual acciona el campo magnético del estator que induce la tensión final.

Figura 74. Generador Síncrono



Fuente: FARRAND ALTERNATOR. Tecnología del Alternador. Generadores Síncronos y Asíncronos. [En línea] [20 de julio de 2015]. Disponible en: <<http://spanish.brushlesssynchronousgenerator.com/sale-2707996-800-kw-1000kva-double-bearing-alternator-ac-brushless-exciter-synchronous-generator.html>>

Una de las series de generadores síncronos recomendadas para turbinas de gas es la serie PMG de la casa fabricante INDAR, esta serie abarca un amplio abanico de soluciones de refrigeración, niveles de tensión y diseño constructivo; así mismo, esta serie se subdivide en otras series según la velocidad de operación.

- ✓ PMG LS Series: para máquinas de accionamiento directo, acopladas directamente a las palas de la turbina, sin necesidad de multiplicadora.
- ✓ PMG MS Series: para máquinas de media velocidad incluyendo multiplicadoras de 1 y 2 etapas, en el que la optimización del paquete completo multiplicadora, generador y convertidor tiene un impacto fuerte en las prestaciones finales de la turbina.
- ✓ PMG HS Series: para máquinas de muy alta velocidad. Este rango de producto se adapta especialmente bien a desarrollos anteriores en tecnología DFIG permitiendo una adaptación de la turbina de forma sencilla a esta tecnología mediante el uso de imanes permanentes adecuando dimensiones, reduciendo peso e incrementando el rendimiento de la solución.

Todas las series mencionadas anteriormente se encuentran disponibles en el mercado, parte de sus características principales se encuentran en la Tabla 11.

Tabla 11. Características Generadores Síncronos PMG

Características Principales Generadores Síncronos PMG	
Rango de potencia nominal	Hasta 8 MW
Conversión eléctrica	Full converter
Tensión	690 V-6600 V
Frecuencia de gen./red	Variable/50 Hz-60 Hz
Refrigeración	Aire-Aire / Aire-Agua / Camisa de agua
Aislamiento	F-H
Rango de temperatura	-30 °C / +50 °C (-40 °C opcional)
Forma constructiva	Horizontal (IM1001 / IM1101 / IM3001)
Grado de protección	IP54 / IP55
Protección anticorrosiva	C3H-C4H-C5M

Fuente: INDAR. Indar PMG series. Energía Eólica y Turbinas de Gas. Generadores Síncronos y Asíncronos. [En línea] [20 de julio de 2015]. Disponible en <http://www.ingeteam.com/es-es/electronica-de-potencia/energia-eolica/pc28_3_23/generadores.aspx>

Anexo C. PROCESO DE PINTURA PARA EL PROTOTIPO DE TURBINA LIBRE

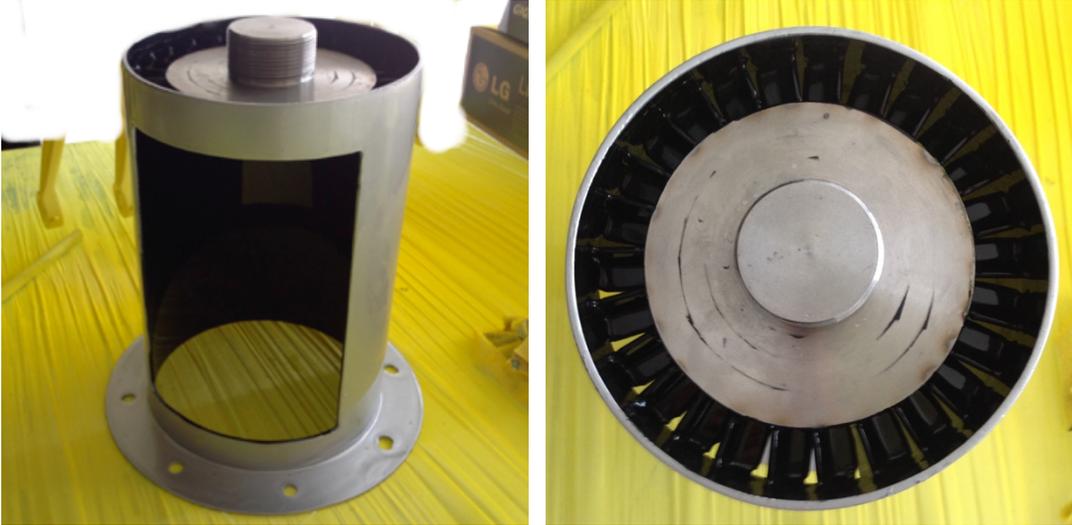
Al prototipo de turbina libre se le realizó un proceso de pintado especial, que le ayuda a prevenir la corrosión y a protegerlo de las condiciones atmosféricas a las que se vaya a someter.

Este proceso fue muy similar al que se utiliza en la industria aeronáutica para el pintado de los componentes de las aeronaves, tal cual como se describe a continuación.

1. Se prepara la superficie a pintar, aplicando masilla hueso duro en las imperfecciones y lijando la pieza completa, esto con el fin de emparejar toda la superficie.
2. Se aplica una base de Primer en la superficie que se desea pintar, esto con el fin de proporcionarle al material una capa base para que se adhiera la pintura y además protegerlo de la corrosión.
3. Posterior al secado del Primer, se aplica una pintura de fondo en la superficie; esta es la encargada de crear la adherencia necesaria entre el Primer y la pintura final a utilizar.
4. Luego de aplicar el fondo, se procede al pintado de la pieza con el color deseado, por medio de una pistola de aire, que es la encargada de distribuir uniformemente las partículas de pintura en la superficie.
5. Por último, una vez se de el secado de la pintura, es opcional aplicar una capa de barniz para dar brillo a la superficie y además proteger la pintura aplicada de rayones y otro tipo de afectaciones.

A continuación se muestran los resultados obtenidos en los principales componentes del prototipo de la turbina libre, que fueron pintados mediante este proceso.

Figura 75. Conjunto Estator Pintado



Fuente: Autores

Figura 76. Tobera de Salida Pintada



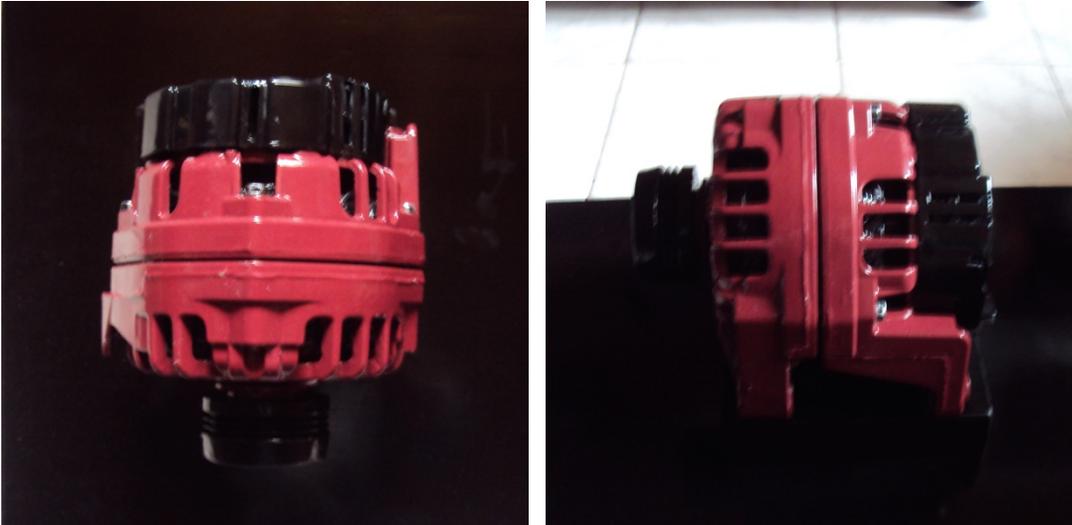
Fuente: Autores

Figura 77. Spinner de Turbina Pintado



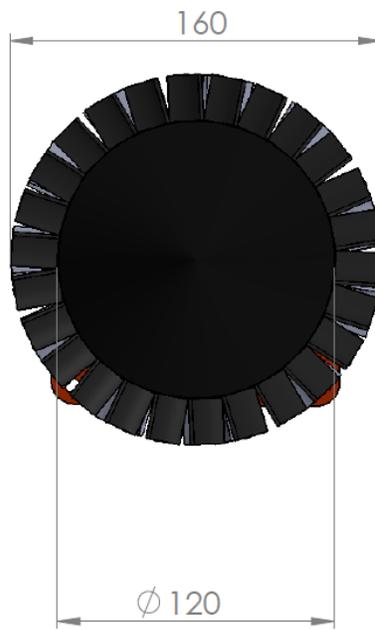
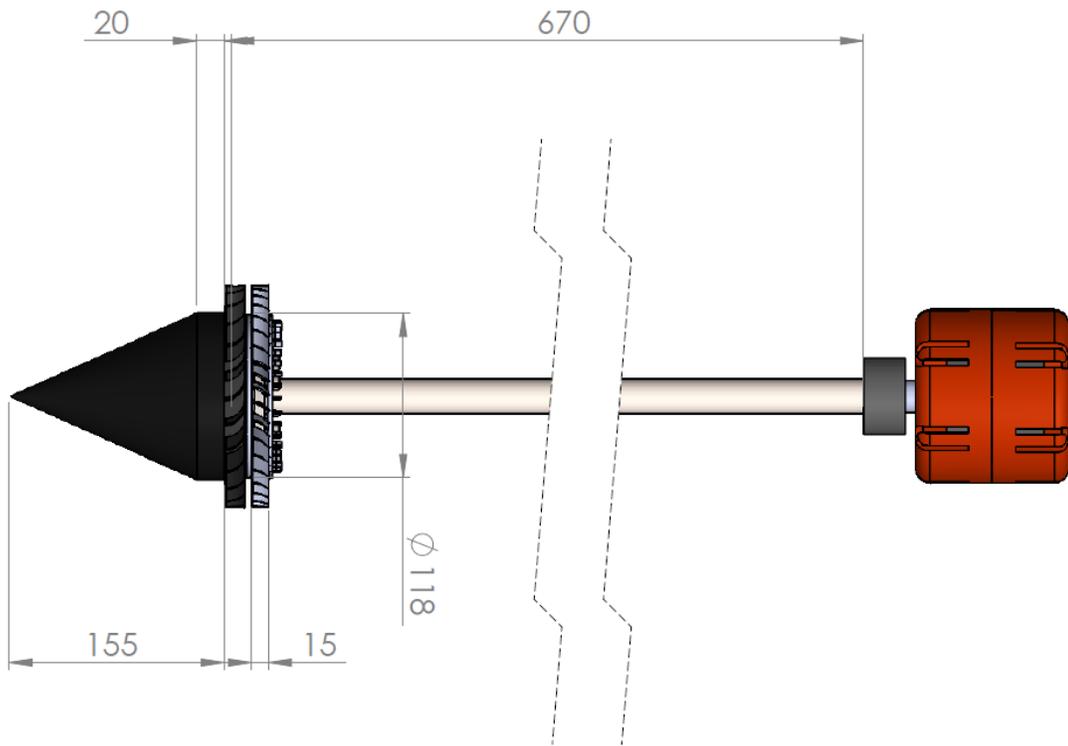
Fuente: Autores

Figura 78. Generador Eléctrico Pintado

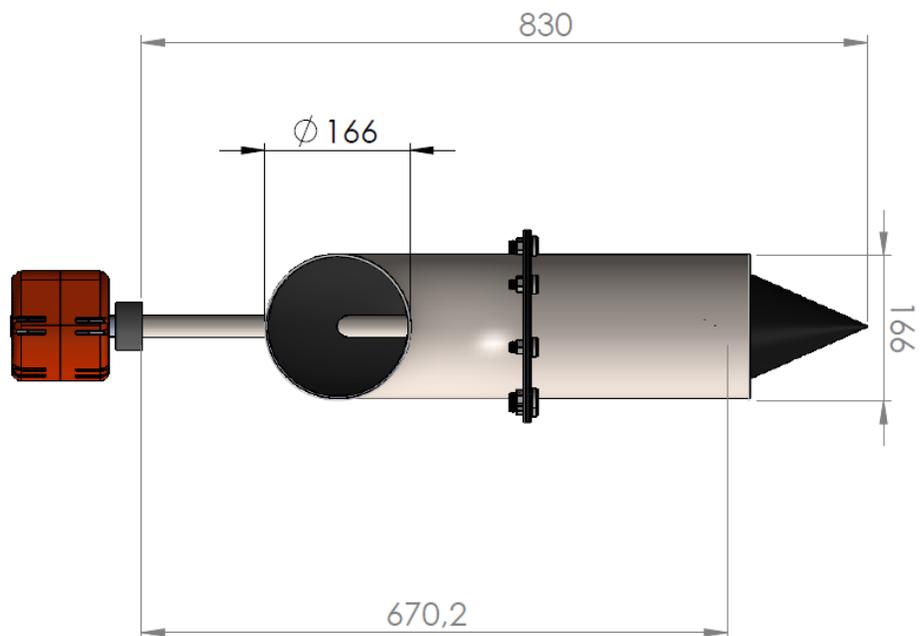
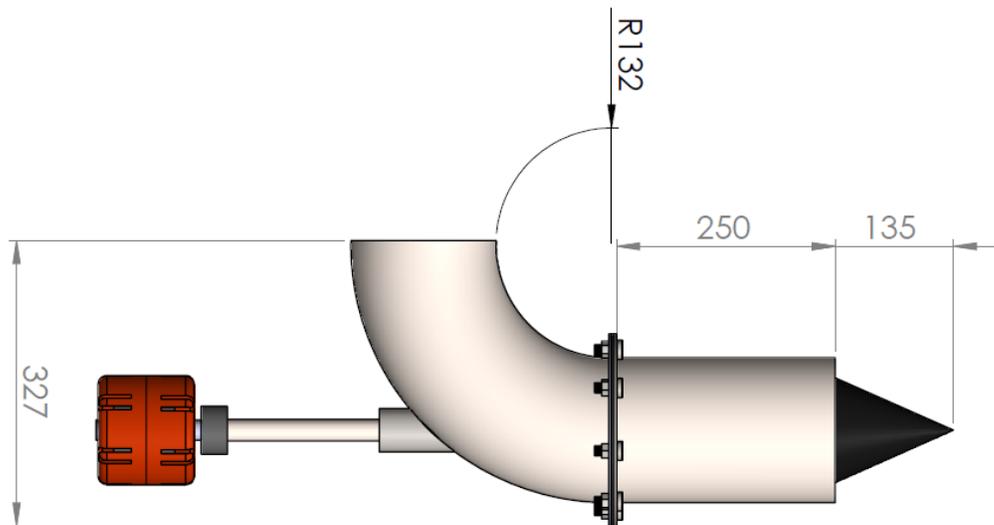


Fuente: Autores

Anexo D. PLANOS GENERALES DEL PROTOTIPO DE TURBINA LIBRE



TURBINA LIBRE PARA GENERACION DE ENERGIA
CONSTRUIDO Y DISEÑADO POR:
MIGUEL ANGEL BERNAL
JHOAN ALEXANDER BARRIOS



TURBINA LIBRE PARA GENERACION DE ENERGIA

CONSTRUIDO Y DISEÑADO POR:

MIGUEL ANGEL BERNAL

JHOAN ALEXANDER BARRIOS