

DISEÑO DE UNA TURBINA A GAS REFRIGERANTE
SOBRECALENTADO, PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA EN UN POZO
PETROLERO EN EL CAMPO CAÑO LIMÓN, ARAUCA.

CARINA ANDREA GÓMEZ SALAZAR
NELSON DAVID RODRÍGUEZ GONZÁLEZ

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BOGOTÁ D.C.
2020

DISEÑO DE UNA TURBINA A GAS REFRIGERANTE SOBREALENTADO,
PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA EN UN POZO PETROLERO EN EL
CAMPO CAÑO LIMÓN, ARAUCA.

CARINA ANDREA GÓMEZ SALAZAR
NELSON DAVID RODRÍGUEZ GONZÁLEZ

Proyecto Integral de Grado para optar al título de
INGENIERO MECÁNICO

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BOGOTÁ D.C.

2020

Nota de aceptación

Jurado 1

Ing. Libardo Enrique Mendoza Geney

Jurado 2

Ing. Claudio Alberto Moreno Arias

Bogotá D.C., agosto 2020

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

DR. MARIO POSADA GARCÍA-PEÑA

Consejero Institucional

DR. LUIS JAIME POSADA GARCÍA-PEÑA

Vicerrectora Académica y de Posgrados

DRA. MARÍA CLAUDIA APONTE GONZÁLEZ

Vicerrector Administrativo y Financiero

DR. RICARDO ALFONSO PEÑARANDA CASTRO

Secretaria General

DRA. ALEXANDRA MEJÍA GUZMÁN

Decano Facultad de Ingeniería

ING. JULIO CESAR FUENTES ARISMENDI

Director Programa de Ingeniería Mecánica

ING. CARLOS MAURICIO VELOZA VILLAMIL

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y los docentes no son responsables por las ideas y conceptos emitidos en el presente documento. Estos corresponden únicamente al autor.

DEDICATORIA

A mis padres, Alirio Gómez y Nubia Salazar por tanto esfuerzo y dedicación para permitirme culminar esta etapa de mi vida, a mi hermana Maira Gómez por siempre guiarme y motivarme en los momentos difíciles y a mis amigos con los que compartí diferentes situaciones las cuales hicieron parte de esta gran experiencia.

Carina Gómez

A mis padres, Lilibian González y Nelson Rodríguez, y a mi hermano Juan Pablo Rodríguez, por su apoyo, esfuerzo y perseverancia en mi formación como Ingeniero.

David Rodríguez

AGRADECIMIENTOS

Al Ing. Carlos Mendoza, por su guía en la propuesta del tema central de este trabajo de grado; por su orientación en el área de turbomáquinas y termofluidos; su acompañamiento en la culminación de esta etapa y por todas sus enseñanzas académicas y personales.

Al Ing. Jair Loaiza, por su orientación en el área de diseño y simulación; su apoyo, paciencia, entrega y el tiempo dedicado en el desarrollo de este proyecto donde nos compartió su conocimiento y experiencia para así guiarnos como profesionales.

A la Universidad de América quien fue pilar principal en nuestra formación como profesionales, y así mismo nos permitió crecer como personas; a los departamentos administrativos y de bienestar que la componen, donde se encontró un apoyo y un lugar de esparcimiento; a su cuerpo docente que hizo parte de nuestro aprendizaje académico y quienes aportaron al desarrollo de este proyecto.

A nuestros familiares, amigos y compañeros que hicieron parte de nuestro proceso y fueron aporte relevante en la realización y culminación de esta etapa.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	20
OBJETIVOS	21
1. GENERALIDADES DE TURBINAS DE VAPOR	22
1.1 CICLO RANKINE	22
1.2 CICLO ORGANICO RANKINE (ORC)	22
1.3 REFRIGERANTES	23
1.4 TURBINA EN EL CICLO RANKINE ORGÁNICO	25
1.5 CLASIFICACIÓN DE TURBINAS DE VAPOR	26
1.5.1 Acción o reacción	26
1.5.2 Multietapa o monoetapa	27
1.5.3 Axiales o radiales	27
1.5.4 Con extracción de vapor	27
1.5.5 Contrapresión, escape libre o condensación	27
1.6 SISTEMAS DE UNA TURBINA A GAS REFRIGERANTE SOBRECALENTADO	28
1.6.1 Sistema de alimentación	28
1.6.2 Sistema dinámico	29
1.6.3 Sistema de potencia	30
1.6.4 Sistema de control	30
1.6.5 Sistema de lubricación	31
1.6.6 Sistema de sellado de vapor	32
1.6.7 Sistema estructural	33
1.6.8 Virador	33
1.6.9 Compensador	33
2. GENERALIDADES DE LA TURBINA A GAS REFRIGERANTE SOBRECALENTADO	36
2.1 Diseño conceptual	36
2.1.1 Proceso por sistemas de la turbina a gas refrigerante sobrecalentado	36
2.1.2 Selección del tipo de turbina a gas refrigerante sobrecalentado	37
2.1.3 Análisis comparativo de fabricantes de turbinas a vapor	37
2.2 NORMATIVA	40
2.2.1 Normativa API 611	40
2.2.2 Normativa API 612	40
2.2.3 Normativa NEMA SM-23	41
2.3 PARÁMETROS DE INGENIERÍA	41
2.4 PARÁMETROS DE DISEÑO	42

2.4.1	Potencia	42
2.4.2	Flujo másico	43
2.4.3	Temperaturas, presiones y entalpías	44
3.	DISEÑO DETALLADO DE UNA TURBINA A GAS REFRIGERANTE SOBREALENTADO	46
3.1	SISTEMA DE ALIMENTACIÓN	46
3.1.1	Tobera	46
3.1	SISTEMA DINÁMICO	49
3.2.1.	Álabe	49
3.1.2	Rueda	55
3.1.3	Virador	58
3.2	SISTEMA DE POTENCIA	58
3.2.1	Rotor	58
3.3.2	Sellos Retenedores	78
3.3.3	Sellos Laberínticos	79
3.3.4	Buje QD	79
3.4	SISTEMA DE CONTROL	81
3.4.1	Tablero de control	82
3.4.2	Plano eléctrico del sistema de control	83
3.4.3	Selección de elementos del sistema de control	84
3.5	SISTEMA ESTRUCTURAL	89
3.5.1	Selección del material de la carcasa	89
3.5.2	Carcasa	89
3.5.3	SOPORTES	94
3.6	SISTEMA DE GENERACIÓN	99
3.6.3	Generador eléctrico	99
4.	MANUALES PARA UNA TURBINA A GAS REFRIGERANTE	102
4.1	MANUAL DE ENSAMBLE	102
4.1.1	Identificación de las piezas	102
4.1.2	Preparación del terreno	105
4.1.3	Ensamble de la turbina	106
4.2.	MANUAL DE OPERACIÓN	115
4.2.1	Verificar que todos los tornillos estén correctamente ajustados.	117
4.2.2	Averías visibles en las tuberías que conectan a la turbina.	117
4.3	MANUAL DE MANTENIMIENTO	121
4.3.1	Recomendaciones	122
4.4	MANUAL DE SEGURIDAD	122
4.4.1	Normatividad	123
4.4.2	Ámbitos de aplicación	123
4.4.3	Responsabilidades	123
4.4.4	Definiciones y reglamentación	124
4.4.5	Señalización	125

4.4.6	Equipos de protección personal	126
4.4.7	Identificación de riesgos y medidas preventivas	126
5	ANÁLISIS DE COSTOS Y DE IMPACTO AMBIENTAL	129
5.1	IMPACTO AMBIENTAL	129
5.1.1	Metodología de evaluación	129
5.1.2	Matriz de identificación de aspectos a evaluar	132
5.1.3	Matriz de impacto ambiental	133
5.2	ANÁLISIS DE COSTOS	135
6.	APORTES DEL PROYECTO	141
7.	CONCLUSIONES	142
8.	RECOMENDACIONES	144
	BIBLIOGRAFÍA	145
	ANEXOS	150

LISTA DE IMÁGENES

	pág.
Imagen 1. Turbina de vapor multietapa y monoetapa	26
Imagen 2. Sistema de alimentación, cámara de vapor	28
Imagen 3. Alabes turbina multietapa	29
Imagen 4. Rueda con álabes de turbina monoetapa	29
Imagen 5. Rotor	30
Imagen 6. Controlador y válvula de regulación de una turbina de vapor.	31
Imagen 7. Partes de una turbina de vapor monoetapa	33
Imagen 8. Componentes de una turbina de vapor	34
Imagen 9. Elementos de una turbina de vapor	34
Imagen 10. Perfil del álabe	49
Imagen 11. Triangulo de velocidades de entrada	51
Imagen 12. Triangulo de velocidades de salida	52
Imagen 13. Análisis por elementos finitos de los álabes	54
Imagen 14. Comportamiento del fluido en los álabes	55
Imagen 15. Rueda de álabes	56
Imagen 16. Análisis por elementos finitos	57
Imagen 17. Virador helical gearbox R SERIES	58
Imagen 18. Arreglo conjunto de rodamientos	77
Imagen 19. Dimensiones principales de los rodamientos seleccionados	77
Imagen 20. Dimensiones del retenedor seleccionado	78
Imagen 21. Sello laberintico Espey WKA400HD	79
Imagen 22. Buje QD	80
Imagen 23. PLC Seleccionado SIMATIC S7-1200, Siemens	81
Imagen 24. Tablero de control	82
Imagen 25. Válvula de alivio	85
Imagen 26. Válvula de regulación	85
Imagen 27. Voltímetro	86
Imagen 28. Tacómetro	86
Imagen 29. Sensor de desplazamiento	87
Imagen 30. Manómetro	87
Imagen 31. Presostato	88
Imagen 32. Termocupla PT100	88
Imagen 33. Diseño de la carcasa	89
Imagen 34. Valor de C'	91
Imagen 35. Dimensiones del perno	92
Imagen 36. Placa inferior del soporte	95
Imagen 37. Dimensiones de una soldadura en filete	96
Imagen 38. Placas superiores del soporte	97
Imagen 39. Generador Tianyi	100
Imagen 40. Acople Hub Type	100
Imagen 41. Base en concreto	105
Imagen 42. Acople de álabes en los diafragmas inferiores	106

Imagen 43.	Instalación de diafragmas en la carcasa	106
Imagen 44.	Perno de sujeción del diafragma	107
Imagen 45.	Instalación de soportes	107
Imagen 46.	Anclaje en la base en concreto	108
Imagen 47.	Instalación de álabes en los rodetes	108
Imagen 48.	Instalación de álabes en el rodete	109
Imagen 49.	Instalación de bujes QD	109
Imagen 50.	Acople de cuñas	110
Imagen 51.	Acople de rodetes en el rotor	110
Imagen 52.	Instalación de accesorios en el rotor	111
Imagen 53.	Acople del subensamble en la carcasa inferior	111
Imagen 54.	Disposición de sensores	112
Imagen 55.	Acople de álabes en los diafragmas superiores	112
Imagen 56.	Instalación de diafragmas en la carcasa superior	113
Imagen 57.	Acople del subensamble superior al inferior	113
Imagen 58.	Sujeción de la carcasa	114
Imagen 59.	Instalación de válvula de regulación	114
Imagen 60.	Tablero de control	115
Imagen 61.	Componentes turbina a gas refrigerante sobrecalentado	116
Imagen 62.	Verificación ajustes de pernos	117
Imagen 63.	Revisión de tuberías	117
Imagen 64.	Verificación del funcionamiento del virador	118
Imagen 65.	Verificación del PLC	118
Imagen 66.	Flujómetro	119
Imagen 67.	Encendido en el panel de control	119
Imagen 68.	Regulación del fluido	120
Imagen 69.	Verificación de instrumentos de control	120
Imagen 70.	Salida de turbina	121
Imagen 71.	Cotización elementos para la turbina	163
Imagen 72.	Cotización sensor de desplazamiento	164
Imagen 73.	Cotización proceso de fabricación de los álabes	165
Imagen 74.	Cotización PLC	166
Imagen 75.	Cotización rodamientos y retenedores	167
Imagen 76.	Cotización acero 4130	168
Imagen 77.	Cotización 1 turbina de vapor de la empresa DEC	169
Imagen 78.	Cotización 2 turbina de vapor de la empresa NCON Turbo Tech	171
Imagen 79.	Cotización 3 turbina de vapor de la empresa AXET	174

LISTA DE DIAGRAMAS

	pág.
Diagrama 1. Ciclo Rankine y diagrama T-s	22
Diagrama 2. Ciclo Orgánico Rankine	23
Diagrama 3. Síntesis clasificación turbinas de vapor	28
Diagrama 4. Síntesis sistemas de una turbina de vapor	35
Diagrama 5. Sistemas de la turbina a gas refrigerante	36
Diagrama 6. Síntesis de la turbina a diseñar	45
Diagrama 7. Tobera	46
Diagrama 8. Diagrama de cuerpo libre del rotor	59
Diagrama 9. Diagrama de cuerpo libre en el plano XY	59
Diagrama 10. Diagrama de cuerpo libre en el plano XZ	60
Diagrama 11. Fuerza cortante plano XY	62
Diagrama 12. Momento flector plano XY	62
Diagrama 13. Fuerza cortante plano XZ	63
Diagrama 14. Momento cortante plano XZ	64
Diagrama 15. Sistema de control	83
Diagrama 16. Plano eléctrico del sistema de control	84

LISTA DE CUADROS

	pág.
Cuadro 1. Refrigerantes en ORC	24
Cuadro 2. Selección turbinas a gas refrigerante sobrecalentado	37
Cuadro 3. Análisis comparativo de fabricantes de turbinas de vapor	38
Cuadro 4. Escala de calificación para la selección del componente	39
Cuadro 5. Sistemas para la turbina a diseñar	39
Cuadro 6. Componentes del sistema de bombeo electrosumergible (BES)	43
Cuadro 7. Temperatura, presión y entalpía de trabajo	44
Cuadro 8. Propiedades del fluido en la tobera	48
Cuadro 9. Resultados dimensiones de los álabes	50
Cuadro 10. Resultados triángulos de entrada	53
Cuadro 11. Resultados triángulos de salida	53
Cuadro 12. Resultados de fuerzas en los álabes móviles	53
Cuadro 13. Torque generado con diferentes ángulos	54
Cuadro 14. Números de pernos según diámetro	94
Cuadro 15. Identificación de los componentes de la turbina	102
Cuadro 16. Normatividad en la seguridad de operación	123
Cuadro 17. Identificación de riesgos y medidas preventivas	127
Cuadro 18. Criterios para la evaluación ambiental	129
Cuadro 19. Criterios apoderados para la evaluación ambiental	130
Cuadro 20. Escala de colores según el valor de impacto ambiental	132
Cuadro 21. Matriz de identificación de aspectos	132
Cuadro 22. Costos de materiales	136
Cuadro 23. Costos de fabricación	138
Cuadro 24. Costos de Ingeniería	138
Cuadro 25. Costo total de una turbina a gas refrigerante sobrecalentado	139
Cuadro 26. Costos de una turbina de vapor comercial en USD	139
Cuadro 27. Costos de una turbina de vapor comercial en COP	140
Cuadro 28. Beneficios del proyecto	141
Cuadro 29. Matriz de priorización para la selección del sistema de alimentación	151
Cuadro 30. Matriz de priorización para la selección de la salida del fluido	151
Cuadro 31. Matriz de priorización para la selección del sistema de control	151
Cuadro 32. Matriz de priorización para la selección del sistema dinámico	152
Cuadro 33. Matriz de priorización para la selección del sistema estructural	152
Cuadro 34. Resultados análisis dinámico de álabes parte 1	153
Cuadro 35. Resultados análisis dinámico de álabes parte 2	153
Cuadro 36. Análisis periódico en los elementos de la turbina	154
Cuadro 37. Análisis de falla	156
Cuadro 38. Matriz de evaluación de impacto ambiental	160

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Composición química del acero AISI 4130	65
Tabla 2. Propiedades del acero AISI 4130	65
Tabla 3. Factores de concentración de esfuerzos	66
Tabla 4. Parámetros en el factor de la condición superficial de Marin	67
Tabla 5. Factor de tamaño	70
Tabla 6. Factor por tipo de carga	71
Tabla 7. Factor de confiabilidad	71
Tabla 8. Límite de resistencia a la fatiga en viga rotatoria	72
Tabla 9. Características del Buje QD-SK	80
Tabla 10. Conexiones PLC	81
Tabla 11. Tipo de electrodo	95
Tabla 12. Selección del acople, catálogo TB WOOD'S	101

LISTA DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1. Termodinámica en la tobera	46
Ecuación 2. Perfil del álabe	49
Ecuación 3. Triángulo de velocidades de entrada	51
Ecuación 4. Triángulos de velocidades en la salida	52
Ecuación 5. Diámetro del eje	65
Ecuación 6. Factor de seguridad	74
Ecuación 7. Factor de seguridad por fluencia	74

TABLA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Matriz de priorización para la selección de alternativas	151
Anexo B. Resultados análisis dinámico (álabes)	153
Anexo C. Manual de Mantenimiento	154
Anexo D. Matriz de Impacto Ambiental	160
Anexo E. Cotizaciones	163

GLOSARIO

GAS REFRIGERANTE SOBRECALENTADO: Fluido en condición de sobrecalentamiento en la cual el refrigerante es completamente evaporado¹.

SISTEMA DE BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE: Sistema de levantamiento artificial que emplea energía eléctrica para elevar una columna de fluido desde un nivel determinado hasta la superficie².

FLUJO MÁSSICO: Es una medida del número de moléculas que fluyen a través de instrumento, independientemente de cuanto espacio ocupen esas moléculas³.

VIRADOR: Motor eléctrico o hidráulico que hace girar lentamente la turbina cuando no está en funcionamiento⁴.

ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS: Modelado de segmentos específicos o conexiones de una estructura que se someten a determinados casos de cargas⁵.

FUNDICIÓN A LA CERA PERDIDA: Es una técnica metalúrgica donde el metal fundido se vierte en un molde cerámico desechable y el molde se fabrica con un modelo de cera⁶.

¹ DANAHE. Sobrecalentamiento. Cero grados Celsius. [en línea]. 2016., [Consultado agosto 20, 2020]. Disponible en: <https://0grados.com.mx/sobrecalentamiento/>

² LA COMUNIDAD PETROLERA. Bombeo electrosumergible de petróleo. [en línea]. 2017., [Consultado agosto 20, 2020]. Disponible en: <https://lacomunidadpetrolera.com/2017/11/bombeo-electrosumergible-petroleo.html>

³ ALICIA SCIENTIFIC. ¿Qué son el flujo de masa y el flujo volumétrico.? Alicat scientific. [en línea]. Estados Unidos. 2020., [Consultado agosto 20, 2020]. Disponible en: <https://www.alicat.com/spanish/que-son-el-flujo-de-masa-y-el-flujo-volumetrico/>

⁴ ENERGIZA.ORG. Partes de una turbina de vapor. Renovetec. [en línea]. España. 2011., [Consultado agosto 20, 2020]. Disponible en: <http://www.renovetec.com/590-mantenimiento-industrial/110-mantenimiento-industrial/306-partes-de-una-turbina-de-vapor>

⁵ SEISMOUS. Análisis por elemento finito: qué es y cómo funciona. Seismous engineering and research. [en línea]. Guadalajara. 2019., [Consultado agosto 20, 2020]. Disponible en: <https://seismous.com/analisis-por-elemento-finito-que-es-y-como-funciona/>

⁶ SOLUCIONES GLOBALES Y GESTIÓN DE COMPRAS S.L. Colada a la cera perdida. Gestión de compras industrial sourcing. [en línea]. España., [Consultado agosto 20, 2020]. Disponible en: <https://www.gestiondecompras.com/es/productos/fundicion/colada-a-la-cera-perdida>

RESUMEN

La metodología actual de generación de energía en un pozo petrolero en el Campo Caño Limón, Arauca, posee algunos problemas que podrían ocasionar una detención en la producción de petróleo, y además de no ser un proceso ecosostenible; esto permite incursionar en energías alternativas donde se propone la generación de energía eléctrica mediante un ORC (ciclo orgánico Rankine), para el cual, al realizar un estudio se concluye que la mejor alternativa como fluido de trabajo es refrigerante R-134a; en base a este ciclo de potencia, se requiere el diseño de una turbina de vapor.

Se establecen los tipos de turbinas de vapor convencionales, su respectiva estructuración por sistemas y componentes, y su modo funcional, con el fin de determinar la mejor alternativa para el diseño que se busca implementar en el desarrollo de este proyecto, esto último, mediante una matriz de priorización como apoyo para la evaluación de alternativas.

Con base en la alternativa seleccionada, se realiza el diseño detallado de la turbina a gas refrigerante sobrecalentado, donde se realiza un análisis matemático y en algunos casos por elementos finitos para garantizar el diseño propuesto. Por otra parte, se realiza la selección de los demás componentes como rodamientos, sellos laberínticos, válvulas, generador, acoples, buje QD, entre otros, los cuales hacen parte del proceso de operación de la turbina.

En conclusión, el diseño de turbina a gas refrigerante sobrecalentado resulta una propuesta viable en diferentes aspectos; en primer lugar, según los respectivos análisis realizados el diseño es apropiado; en segundo lugar, es una propuesta ecosostenible teniendo en cuenta la inclusión del refrigerante R134a como fluido de trabajo; y por último, financieramente es un proyecto viable teniendo una comparación con turbinas de vapor comerciales.

Palabras clave: turbina de vapor, gas refrigerante sobrecalentado, R134a, ciclo orgánico Rankine.

INTRODUCCIÓN

En el campo petrolero Caño Limón, la red eléctrica interconectada nacional no supe la demanda energética de todos los pozos del campo, debido a que la red interna del campo es distribuida por medio de contratos a diferentes compañías, las cuales dependiendo de las condiciones de este cuentan o no con los diferentes beneficios que el campo posee. Todos los pozos petroleros de Caño Limón son de bombeo electrosumergible (BES) el cual debe tener una fuente de energía constante, de este modo, los pozos que no tienen suministro eléctrico deben proveer su energía a través de generadores accionados con motores diesel, que conlleva a intermitencias en el servicio eléctrico.

Los generadores eléctricos deben estar en operación continua todos los días de la semana porque de ello depende la extracción y producción de petróleo, para ello se debe contar con combustible diesel a disposición para el accionamiento de estos.

Actualmente el transporte y almacenamiento del combustible diesel presenta dificultades en vista de que se requieren estrictas medidas de seguridad para las personas y el ambiente, entre otras dificultades que contraen estas labores, de igual manera, realizar el proceso de combustión con diesel conlleva a un impacto ambiental negativo generando gases perjudiciales para la salud y el medio ambiente.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Diseñar una turbina a gas refrigerante sobrecalentado, para la generación de energía en un pozo petrolero en Caño Limón, Arauca.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

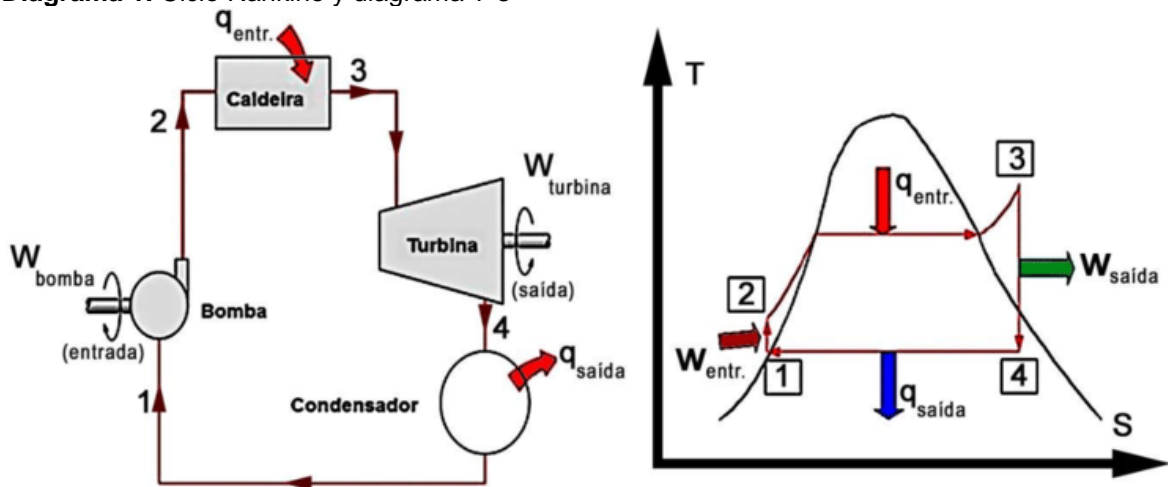
1. Identificar los sistemas de una turbina a gas refrigerante sobrecalentado y su funcionamiento.
2. Realizar el diseño conceptual, la evaluación de alternativas y los parámetros de diseño.
3. Realizar el diseño detallado de una turbina a gas refrigerante sobrecalentado.
4. Elaborar los manuales de ensamble, operación, seguridad y mantenimiento.
5. Realizar un análisis de costos y de impacto ambiental del proyecto.

1. GENERALIDADES DE TURBINAS DE VAPOR

1.1 CICLO RANKINE

El ciclo Rankine, como se observa en el diagrama 1, es un ciclo termodinámico que contiene una serie de fases, en donde a través de ellas se busca convertir calor en trabajo, por medio de calentar agua hasta evaporarla, este vapor es llevado hacia la turbina donde se consigue energía mecánica que puede ser transformada en energía eléctrica.

Diagrama 1. Ciclo Rankine y diagrama T-s



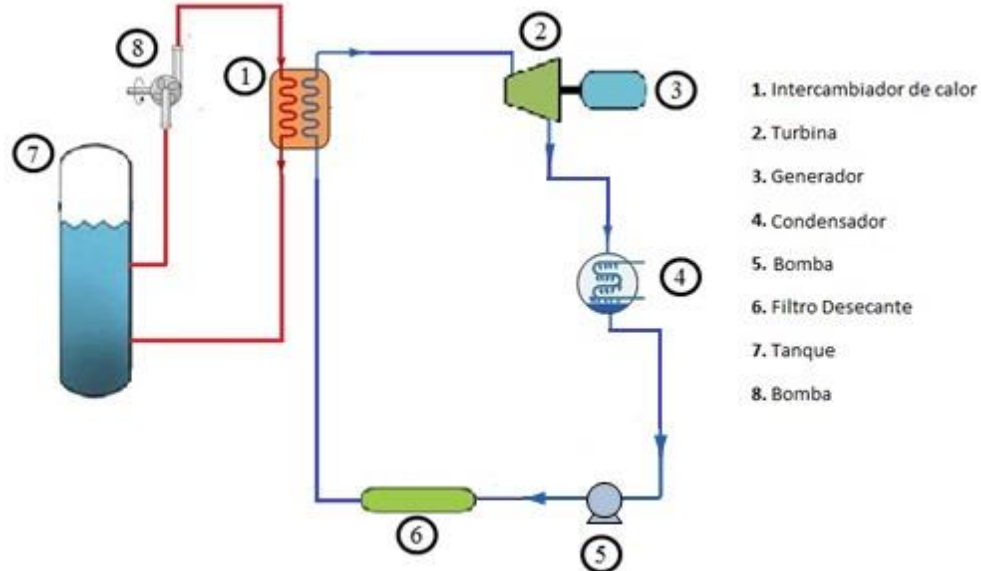
Fuente: CHEN et al. A review of thermodynamic cycles and working fluids for the conversion of low-grade heat. Renewable and Sustainable Energy Reviews. [en línea]. 2010, Vol. 14 ,(Nro. 9)., pp. 3059-3067 .ISSN 1364-0321 .[Consultado Feb 13, 2020]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.006>.

1.2 CICLO ORGANICO RANKINE (ORC)

El ciclo orgánico Rankine consiste en cambiar el agua utilizada en el proceso por un fluido con el cual se obtenga un cambio de fase de líquido a vapor a menor temperatura. Para el desarrollo de este proyecto se plantea utilizar un refrigerante que posea una baja temperatura de ebullición con la cual se pueda obtener un cambio de temperatura adecuado.

Por otro lado, como se observa en el diagrama 2, con el propósito de que este ciclo tenga mayor desarrollo ambiental se sustituye la caldera por un intercambiador de calor que proporciona gas refrigerante sobrecalentado, y en donde se aprovecha el agua residual de la extracción de petróleo para realizar dicho proceso que tiene la capacidad de proporcionar 65 lb/min de gas, teniendo en cuenta las condiciones del campo.

Diagrama 2. Ciclo Orgánico Rankine



Fuente: elaboración propia, con base en PADILLA, Ricardo. Uso de Ciclos Rankine Orgánicos para generación de potencia acoplados a fuentes renovables y calor de desecho [en línea]. 2013. [Consultado 3, febrero, 2020]. Disponible en: <http://latinoamericarenovable.com/2013/03/28/uso-de-ciclos-rankine-organicos-para-generacion-de-potencia-acoplados-a-fuentes-renovables-y-calor-de-desecho/>

De este modo, el proceso consiste en sobrecalentar el refrigerante a través de un intercambio de calor con agua residual que se obtiene del proceso de extracción de petróleo, posteriormente el refrigerante en estado gaseoso se usará para impulsar una turbina, la cual está enlazada a un generador para así convertir la energía cinética en eléctrica y suplir la demanda requerida.

Debido a lo extenso que es el proyecto, se debe sedimentar en dos etapas: La primera etapa consiste en diseñar la turbina anteriormente mencionada. En la segunda etapa se debe diseñar el intercambiador de calor que sustituye la caldera en el ciclo Rankine y en el cual se generará el cambio de estado del refrigerante. Este proyecto se basa en el desarrollo de la primera etapa.

1.3 REFRIGERANTES

Industrialmente hay diferentes tipos de refrigerantes, según Chen et al.⁷, a través de un análisis a este tipo de fluidos, donde se determina que los refrigerantes R-32,

⁷ CHEN, Huijuan; GOSWAMI, D. Yogi y STEFANAKOS, Elias K. A review of thermodynamic cycles and working fluids for the conversion of low-grade heat. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. [en línea]. 2010. Vol. 14. (No. 9)., pp. 3059-3067. [Consultado Feb 13, 2020]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.006>.

R-125 y R134a, son potenciales fluidos de trabajo en un ORC, además de ello, poseen una temperatura crítica adecuada para que posteriormente puedan ser condensados sin problema alguno.

Cuadro 1. Refrigerantes en ORC

Refrigerante	Tc (K) a 1 atm	Te (°C) a 1 atm	Pc (MPa)	Cp (J/kg K) Gas. a 25°C
R-32	351,26	-51,63	5,78	2301,61
R-125	339,17	-48,5	3,62	1643,89
R-134a	374,21	-26,3	4,06	1211,51

Fuente: elaboración propia, con base en CHEN et al. A review of thermodynamic cycles and working fluids for the conversion of low-grade heat. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. [en línea]. 2010, Vol. 14 ,(Nro. 9)., pp. 3059-3067 .ISSN 1364-0321 .[Consultado Feb 13, 2020]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.006>.

Roy et al.⁸, realiza una comparación entre los refrigerantes R-12, R-123 y R-134a en un ORC, en donde se determina que el R123 tiene mayor eficiencia y a su vez genera mayor potencia en la turbina, seguido del R-12, no obstante, el refrigerante R-12 es un clorofluorocarbono (CFC), este tipo de fluidos han sido descontinuados debido a que son contaminantes para el medio ambiente y la capa de ozono, lo mismo sucede con el R-123, hidroclorofluorocarbono (HCFC), el cual por las mismas razones se establece que su producción sea eliminada entre el 2020 y 2030⁹.

Sin embargo, el R-134a posee excelentes características medioambientales, debido a que es un hidrofluorocarbono (HFC), el cual ha sido sustituto de los anteriormente mencionados; además es un excelente fluido de trabajo para la producción de energía útil, como se demuestra Vélez et al.¹⁰.

Por otro lado, el refrigerante R134a es un fluido que como se observa en el cuadro 1, su temperatura de ebullición es de -26,3°C, esto quiere decir que en un proceso de transferencia de calor entre refrigerante y agua se requiere un corto salto de temperatura para lograr que el refrigerante se sobrecaliente, dicho esto, con el fin de aprovechar el cambio de volumen del refrigerante a bajas temperaturas, estos

⁸ ROY, J. P.; MISHRA, M. K. y MISRA, Ashok. Parametric optimization and performance analysis of a waste heat recovery system using organic rankine cycle. *Energy*. [en línea]. 2010. Vol. 35. (No. 12)., pp. 5049-5062. [Consultado Feb 16, 2020]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2010.08.013>.

⁹ MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Boletín ozono. [en línea]. Bogotá. 2010., pp. 16. 24. [Consultado Feb, 2020]. Disponible en: http://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/Boletines_de_Ozono/boletin_ozono_24.pdf.

¹⁰ VÉLEZ, Fredy; CHEJNE, Farid y QUIJANO, Ana. Thermodynamic analysis of R134a in an organic rankine cycle for power generation from low temperature sources. *Dyna*. [en línea]. 2014. Vol. 81. (No. 185)., pp. 153-159. [Consultado Feb 16, 2020]. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0012-73532014000300021&lng=en&tlng=en.

dos fluidos serán los implementados en el intercambiador de calor que sustituye la caldera.

Según la enmienda de Kigali al protocolo de Montreal para la cual Colombia es país firmante, se establece que se debe eliminar el consumo y uso de los HFC en un 80% para el 2045¹¹, por ende, el refrigerante R-134a cuenta con unos sustitutos, algunos directos “drop in”, es decir, se sustituyen muy bien debido a que son adecuados en los mismos equipos, componentes, lubricante, entre otros¹², los cuales deben realizar esta sustitución cuando el refrigerante R-134a deje de ser producido¹³.

El refrigerante R-134a es compatible con la mayoría de los componentes metálicos incluyendo los aceros al carbón estándar, el aluminio y el cobre, además de ello, lubricantes y accesorios¹⁴.

1.4 TURBINA EN EL CICLO RANKINE ORGÁNICO

Mediante un intercambiador de calor se obtiene gas refrigerante sobrecalentado a alta presión y velocidad, este es conducido por una tubería hasta una tobera por donde ingresa a la turbina que puede monoetapa o multietapa (imagen 1) según la potencia que se requiera suministrar, aquí se canaliza a través de álabes móviles y fijos que poseen un ángulo efectivo entre estos y la dirección del fluido para generar un movimiento rotatorio en dichos álabes, el cual también es gracias a las condiciones con las que viene el fluido, por medio de dicha rotación se produce energía cinética, a lo largo de este proceso se pierde energía potencial y térmica pero se gana energía mecánica debido a que el movimiento en los álabes hacen girar el rotor y a través de él trasmite la energía al generador donde suplirá la potencia requerida.

El refrigerante R-134a como fluido de trabajo no trae consecuencias negativas en los materiales y/o componentes de las turbinas comerciales, pero si disminuye la eficiencia de esta en vista de que el refrigerante en mención trabaja con presiones

¹¹ MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. HFC-134a. [en línea]. Bogotá. 2020., pp. 1. 8141-2_00579. [Consultado Mar 10, 2020].

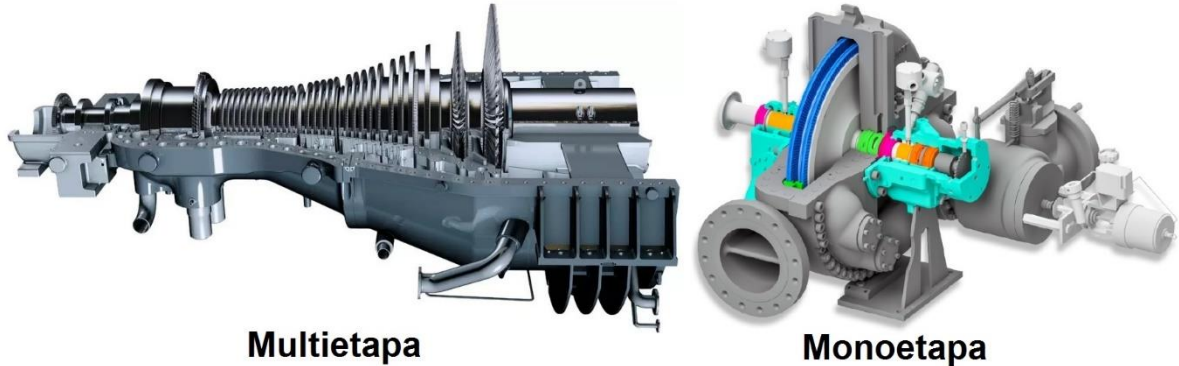
¹² GASSERVEI. Ficha técnica R-450a. Gasservei. [en línea]. España. pp. 3. [Consultado Feb, 2020]. Disponible en: <http://www.gas-servei.com>.

¹³ UNEP. Montreal protocol on substances that deplete the ozone layer: 2014 report of the refrigeration, air conditioning and heat pumps technical options committee. Unep. [en línea]. 2015. Vol. 1. pp. 244. [Consultado Feb, 2020]. Disponible en: <http://conf.montreal-protocol.org/meeting/mop/mop-27/presession/Background%20Documents%20are%20available%20in%20English%20only/RTOC-Assessment-Report-2014.pdf>.

¹⁴ DUPONT SUVA REFRIGERANTES. HFC-134a propiedades, usos, almacenamiento y manipulación. Nature Biotechnology. [en línea]. Ecuador. 2014., pp. 596. [Consultado Feb 18, 2020]. Disponible en: <http://www.refecol.com.ec/wp-content/uploads/2015/02/FichaTecnica-SUVA-R134a-Dupont.pdf>.

menores que las del vapor; esto quiere decir que una turbina comercial no proporcionaría la energía eléctrica para la cual está diseñada, de este modo, resulta indispensable un diseño propio de turbina para la correcta operación con este fluido.

Imagen 1. Turbina de vapor multietapa y monoetapa



Fuente: ELLIOTT GROUP. Dryhh steam turbine. [en línea]. 2016. [Consultado 5, febrero, 2020]. Disponible en: <https://www.elliottturbo.com/Files/Admin/Literature/Literature%20Updates%20July%202018/dyrhh-steam-turbine.pdf>, y GENERAL ELECTRIC POWER. Steam turbine STF-200/100 series. [en línea]. 2017. [Consultado 5, febrero, 2020]. Disponible en: https://www.ge.com/content/dam/gepowerpgdp/global/en_US/documents/product/steam%20turbines/Fact%20Sheet/gea33036-steam-200-100-series-2017.pdf.

El diseño de esta turbina se diferencia en que será autosostenible de acuerdo con la fuente de alimentación del fluido y que no hay pérdida del mismo debido al ORC, la selección de materiales a causa del tipo de fluido, ser un proceso no contaminante y solo tendrá etapas de acción por el bajo volumen manejado.

1.5 CLASIFICACIÓN DE TURBINAS DE VAPOR

Entre las turbinas de vapor existen diferentes tipos dependiendo de la aplicación requerida, entre las cuales se encuentran las de reacción o acción, multietapa o monoetapa, axiales o radiales, con extracción de vapor, contrapresión, escape libre o condensación¹⁵.

1.5.1 Acción o reacción. Este tipo de turbinas se caracteriza por la forma de aprovechamiento de la energía contenida en el flujo de vapor, es decir, en como transforma la energía cinética en mecánica.

En la turbina de acción el fluido es impulsado mediante una tobera que transforma la energía térmica en energía cinética, hacia los álabes los cuales hacen girar el rotor y por consiguiente el eje; generalmente poseen varias etapas en la cuales se

¹⁵ ENERGIZA.ORG. Especial turbinas de vapor. Renovetec. [en línea]. España. 2011., [Consultado Feb 10, 2020]. Disponible en: <http://www.energiza.org/antiores/energizadiciembre2011.pdf>.

genera una caída de presión de forma escalonada y una expansión volumétrica del vapor.

La turbina de reacción a diferencia de la de acción posee también álabes fijos quienes cumplen una función de impulsión como lo hace la tobera mediante un ángulo determinado mientras el vapor se expande a través de las diferentes etapas.

1.5.2 Multietapa o monoetapa. Estos tipos de turbinas se diferencian según el número de etapas; las turbinas monoetapa son usadas en potencias relativamente bajas debido a la facilidad de construcción y la seguridad que generan, aunque esto acarrea a que sean más robustas.

Por otro lado, las turbinas multietapas se hacen necesarias cuando la potencia requerida es alta, debido a que la presión del vapor debe ser mayor y si se tiene una presión elevada, y no se tiene las suficientes etapas, las dimensiones de la turbina deberían ser muy grandes lo cual no es viable mecánicamente. Generalmente se encuentran turbinas multietapas con las primeras etapas de acción y las últimas de reacción¹⁶.

1.5.3 Axiales o radiales. Esta clasificación en turbinas es debido a la dirección del flujo del vapor. Las turbinas de tipo axial son las más utilizadas en la industria, y son en donde el paso del vapor es paralelo al eje de las turbinas; mientras que las turbinas de tipo radial, el paso del vapor es perpendicular al eje¹⁷.

1.5.4 Con extracción de vapor. Este tipo de turbinas se usa cuando se extrae algo de vapor para llevarlo de vuelta a la caldera con el fin de sobrecalentarlo nuevamente y reenviarlo a las etapas intermedias de la turbina, o también para ser utilizado en otros procesos¹⁸.

1.5.5 Contrapresión, escape libre o condensación. Esta clasificación en las turbinas de vapor se debe a la presión de salida del vapor.

En una turbina de contrapresión la presión del vapor es mayor que la presión atmosférica, el fluido es condensado obteniendo agua caliente o sobrecalentado y se puede aprovechar en algún proceso térmico; mientras que en una turbina de condensación la presión del vapor de salida es menor a la presión atmosférica, también se condensa el fluido pero se obtiene un mayor aprovechamiento energético; en la turbina de escape libre el vapor va hacia la atmósfera y no se aprovecha¹⁹.

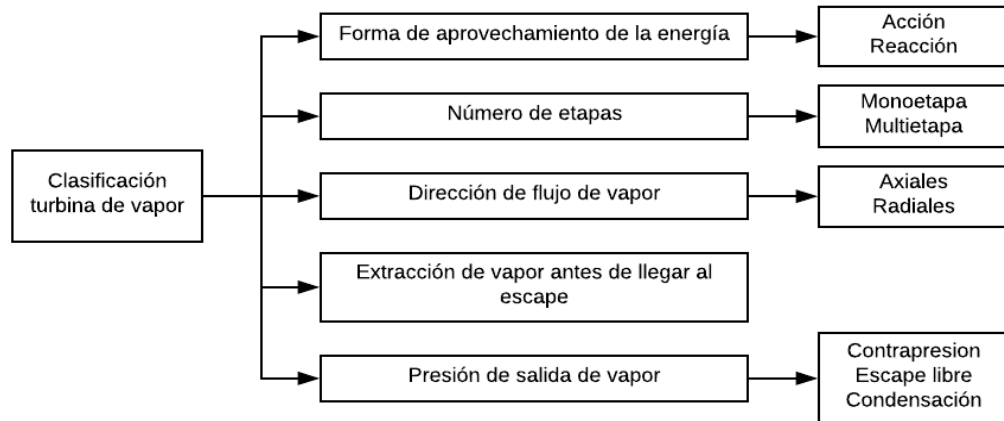
¹⁶ ENERGIZA.ORG. Especial turbinas de vapor. Renovetec. [en línea]. España. 2011., [Consultado Feb 10, 2020]. Disponible en: <http://www.energiza.org/antiores/energizadiciembre2011.pdf>.

¹⁷ *Ibíd.*, p. 5.

¹⁸ *Ibíd.*, p. 5.

¹⁹ *Ibíd.*, p. 6.

Diagrama 3. Síntesis clasificación turbinas de vapor



Fuente: elaboración propia.

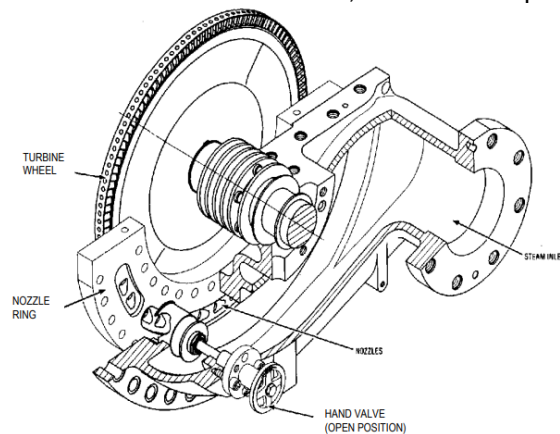
Teniendo en cuenta esta previa clasificación de turbinas de vapor, se realiza un análisis de estas para determinar cuáles de estas características tendrá la turbina objeto de estudio de este proyecto.

1.6 SISTEMAS DE UNA TURBINA A GAS REFRIGERANTE SOBREALENTADO

1.6.1 Sistema de alimentación

1.6.1.1 Tobera. Es el dispositivo mediante el cual se transforma la energía potencial del vapor en energía cinética, por medio de esta el vapor ingresa a la turbina con un ángulo determinado para así generar un movimiento rotatorio en los álabes.

Imagen 2. Sistema de alimentación, cámara de vapor



Fuente: DRESSER RAND Instruction manual for single stage 350, 500, and 700 frame steam turbines. Dresser Rand. Ohio. 2011., pp. 523 .[Consultado Mar 03, 2020]. [catálogo].

1.6.2 Sistema dinámico. El sistema dinámico para una turbina multietapa, consiste en el conjunto de álabes que posee la turbina, entre los cuales existen dos tipos: Álabes móviles, este tipo de álabes están dispuestos alrededor de una corona; y los álabes fijos, se disponen alrededor de una corona única a la carcasa²⁰. Para una turbina monoetapa el sistema dinámico se compone de una rueda la cual posee álabes de menor longitud dispuestos a lo largo de su perímetro como se observa en la imagen 4.

Imagen 3. Alabes turbina multietapa



Fuente: SHIN NIPPON MACHINERY CO. Steam turbines: High performance steam turbine with interacted shroud type blade. [en línea]. [Consultado 4, febrero, 2020]. Disponible en: <http://www.snm.co.jp/products/turbines.html>.

Imagen 4. Rueda con álabes de turbina monoetapa



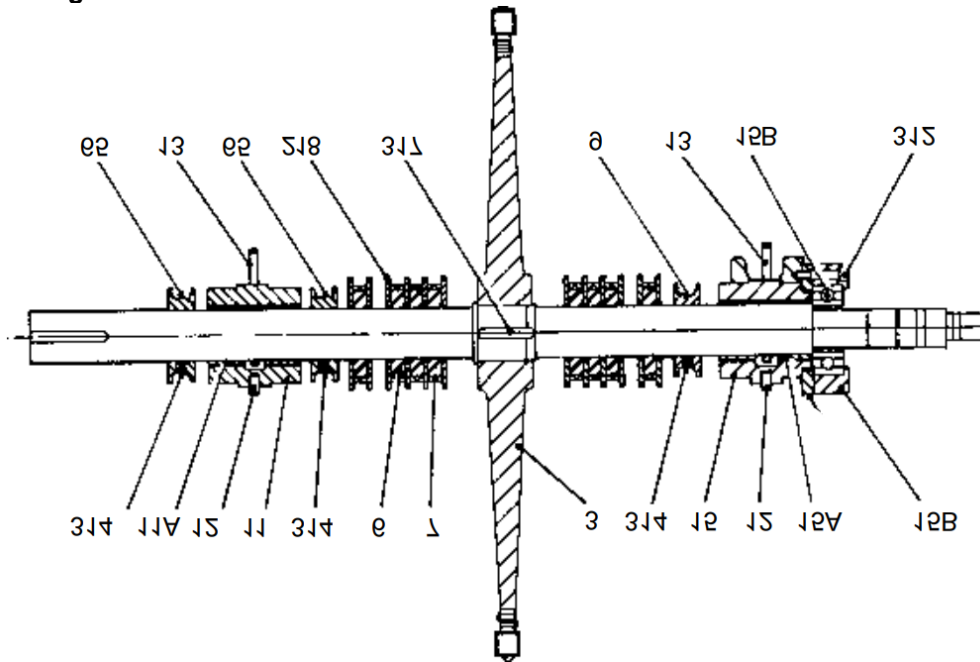
Fuente: HYUNDAI. Steam Turbine Type SSH MSS CSH HGS. [en línea]. South Korea. 2010., pp. 8. [Consultado Feb 25, 2020], [catálogo].

²⁰ ENERGIZA.ORG. Especial turbinas de vapor. Renovetec. [en línea]. España. 2011., [Consultado Feb 10, 2020]. Disponible en: <http://www.energiza.org/antiores/energizadiciembre2011.pdf>.

1.6.3 Sistema de potencia. Este sistema tiene diferentes componentes:

- Rotor: Descrito en la imagen 5, es donde se transforma la energía cinética del vapor producida en la tobera, a energía mecánica; este es fijo mediante dos rodamientos, además, en su extremo posee una sección que permite el acoplamiento al generador.

Imagen 5. Rotor



Fuente: SKINNER POWER SYSTEMS. Instruction and Maintenance Manual 'S-Series Turbine'. [en línea]. US. pp. 49. [Consultado Mar 05, 2020], [catálogo].

- Cojinetes de empuje: Por medio de este se impide el movimiento axial del rotor, puede ser de tipo bola o zapata²¹, siendo el tipo bola el más usado en los diseños convencionales.

1.6.4 Sistema de control. Mediante este sistema se controla la velocidad establecida de giro del rotor, y a su vez permite controlar la válvula de regulación (imagen 6).

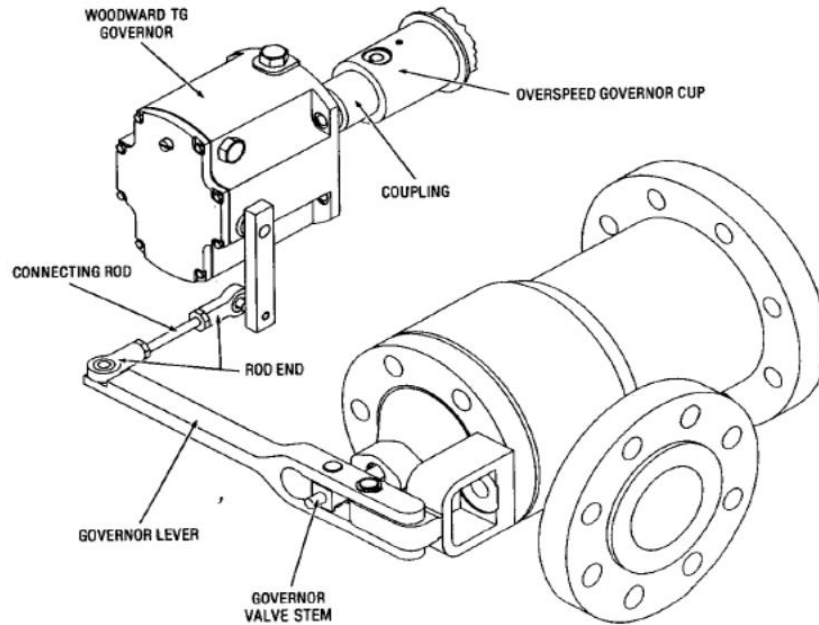
- Válvula de regulación: Es la que controla la cantidad de vapor requerido en la turbina para mantener la velocidad que previamente se ha establecido en el controlador²².

²¹ DRESSER RAND. Instruction manual for single stage 350, 500, and 700 frame steam turbines. Dresser Rand. Ohio. 2011., pp. 523. [Consultado Mar 03, 2020], [catálogo].

²² *Ibíd.*, p. 27.

- Copa de disparo de sobrevelocidad de emergencia: Permite realizar una parada de emergencia y apaga la turbina en caso de que alcance su velocidad máxima establecida, esto se puede generar también mediante una palanca manual, eléctrica o neumática que es conectada a esta copa²³.

Imagen 6. Controlador y válvula de regulación de una turbina de vapor.



Fuente: SKINNER POWER SYSTEMS. Instruction and Maintenance Manual 'S-Series Turbine'. [en línea]. US. pp. 49. [Consultado Mar 05, 2020], [catálogo].

1.6.5 Sistema de lubricación. Es el que proporciona el fluido lubricante y asegura su circulación en todo momento, además de permitir el movimiento de los elementos mecánicos que se requieren²⁴.

- Bomba mecánica principal: Se encarga de procurar que la presión del bombeo sea la indicada, girando a la vez que gira la turbina.
- Bomba auxiliar: Es por la cual se garantiza la presión del aceite en el arranque de la turbina, mientras la bomba mecánica principal realiza esta labor.
- Bomba de emergencia: Esta bomba está implementada en caso de que hubiese una interrupción en el suministro energético y las dos bombas anteriores no puedan trabajar.

²³ DRESSER RAND. Instruction manual for single stage 350, 500, and 700 frame steam turbines. Dresser Rand. Ohio. 2011., pp. 523. [Consultado Mar 03, 2020], [catálogo].

²⁴ ENERGIZA.ORG. Especial turbinas de vapor. Renovetec. [en línea]. España. 2011., [Consultado Feb 10, 2020]. Disponible en: <http://www.energiza.org/antiores/energizadiciembre2011.pdf>.

- Anillos de aceite: Estos realizan la lubricación de los rodamientos o cojinetes, están ubicados en una ranura de estos, pero giran libremente sobre el eje, con el fin de sumergirse dentro de un depósito de aceite y así llevar lubricación al rodamiento²⁵.

El sistema de lubricación también posee algunos subsistemas que permiten su funcionamiento.

1.6.5.1 Subsistema de extracción de vahos. Es el que permite la extracción de vapores y dificulta una posible fuga de aceite al exterior, para lograr esto, el depósito del aceite debe tener una presión inferior a la atmosférica.

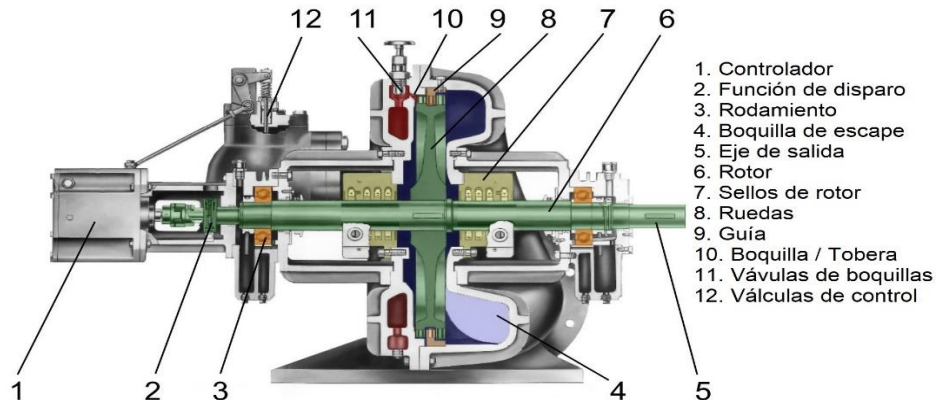
1.6.5.2 Subsistema de extracción de aceite. Evita la degradación del aceite por temperaturas excesivas a través de intercambiadores, evacuando el calor del aceite a la atmosfera o es transferido al circuito cerrado.

1.6.5.3 Subsistema de aceite de control. Es el que dirige la válvula de salida del grupo, que hace llegar al aceite hasta la válvula de regulación de entrada de vapor con la presión adecuada, por medio de este, se permite que las válvulas funcionen debido a que son hidráulicas.

1.6.6 Sistema de sellado de vapor. Evita la disminución de la eficiencia térmica de la turbina mediante sellos laberínticos, y a su vez evita que el vapor se escape de la turbina, en turbinas a contrapresión limita y controla el flujo del vapor, mientras que en turbinas de condensación controla la entrada del aire, se ubican en cada extremo de la turbina por donde pasa el eje.

²⁵ DRESSER RAND. Instruction manual for single stage 350, 500, and 700 frame steam turbines. Dresser Rand. Ohio. 2011., pp. 523. [Consultado Mar 03, 2020], [catálogo].

Imagen 7. Partes de una turbina de vapor monoetapa



Fuente: SKINNER POWER SYSTEMS. Instruction and Maintenance Manual 'S-Series Turbine'. [en línea]. US. pp. 49. [Consultado Mar 05, 2020], [catálogo].

1.6.7 Sistema estructural. Este sistema permite que la turbina tenga un soporte sobre el cual trabajar.

- **Carcasa:** La parte inferior de la carcasa está unida a la bancada, en esta se soporta los elementos mecánicos de la turbina; y la parte superior es desmontable para acceder al interior de la máquina, posee algunos de los álabes fijos.
- **Estructura soporte o bancada:** Es la estructura que soporta todos los elementos de la turbina.

1.6.8 Virador. Cuando la turbina no está en funcionamiento el virador hace que esta gire a una baja velocidad con el fin de evitar fallas en el rotor. Si se es necesario detener por completo la turbina ya sea por mantenimiento o alguna otra razón, es necesario que el virador haga girar la turbina por unas horas antes del nuevo arranque.²⁶

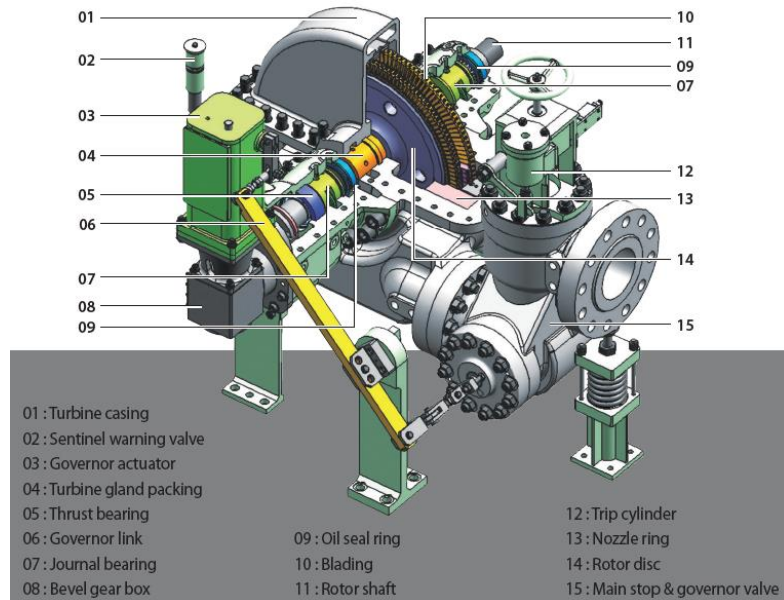
1.6.9 Compensador. Es un elemento que se encuentra a la salida de la turbina con el fin de mitigar el efecto de dilataciones y contracciones que se presentan debido a los cambios de temperatura²⁷.

Todos los sistemas y componentes anteriormente descritos se pueden observar en la imagen 8 y de 9 de una forma global dentro de la una turbina monoetapa y multietapa respectivamente.

²⁶ ENERGIZA.ORG. Especial turbinas de vapor. Renovetec. [en línea]. España. 2011., [Consultado Feb 10, 2020]. Disponible en: <http://www.energiza.org/antiores/energizadiciembre2011.pdf>.

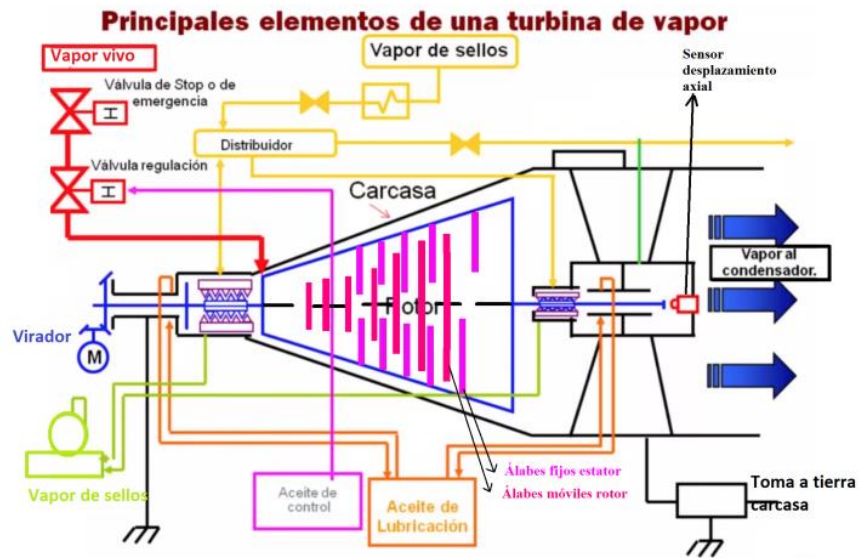
²⁷ Ibíd., p. 9.

Imagen 8. Componentes de una turbina de vapor



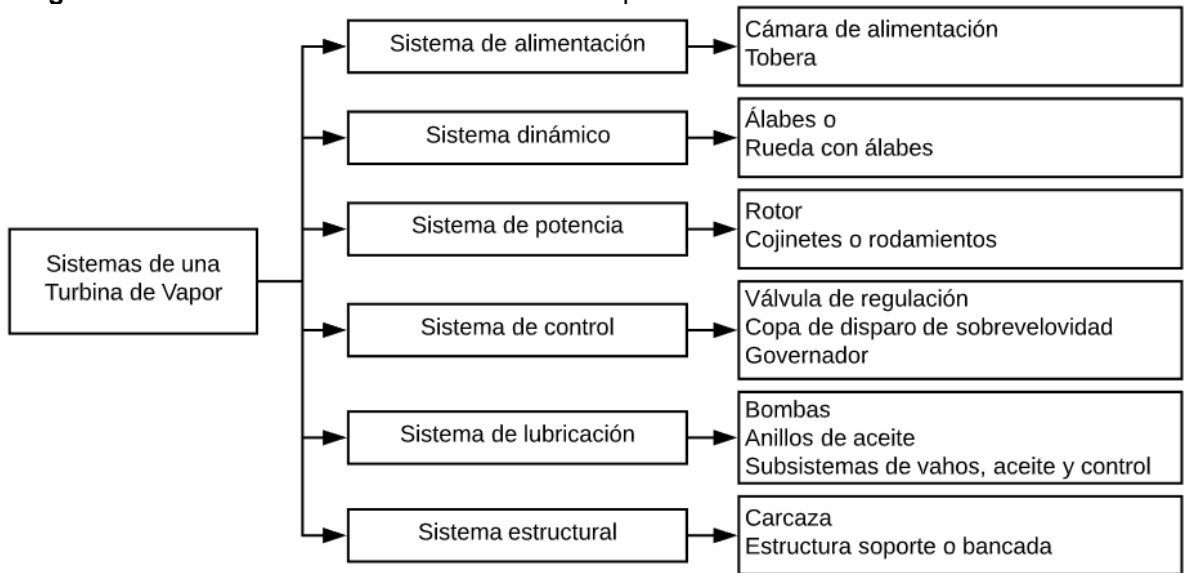
Fuente: HYUNDAI. Steam Turbine Type SSH MSS CSH HGS. [en línea]. South Korea. 2010., pp. 8. [Consultado Feb 25, 2020], [catálogo].

Imagen 9. Elementos de una turbina de vapor



Fuente: ENERGIZA.ORG Especial turbinas de vapor. Renovetec. [en línea]. España. 2011., [Consultado Feb 10, 2020]. Disponible en: <http://www.energiza.org/antiores/energizadiciembre2011.pdf>.

Diagrama 4. Síntesis sistemas de una turbina de vapor



Fuente: elaboración propia.

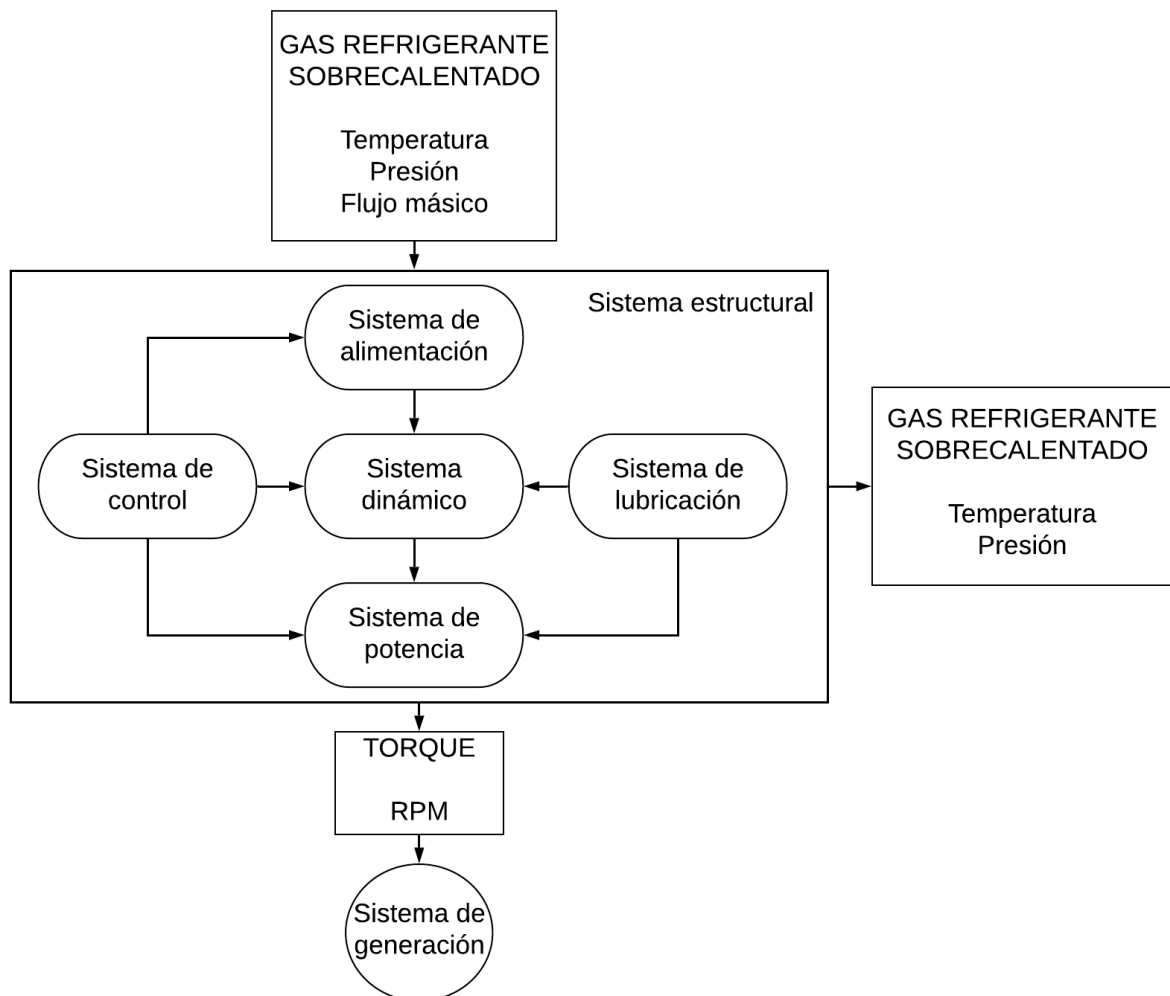
2. GENERALIDADES DE LA TURBINA A GAS REFRIGERANTE SOBREALENTADO

2.1 DISEÑO CONCEPTUAL

2.1.1 Proceso por sistemas de la turbina a gas refrigerante sobreaqueado.

Teniendo en cuenta los sistemas explicados anteriormente, se establece el diagrama de flujo que permite visualizar la relación de los sistemas en el funcionamiento de la turbina y como esta se compone.

Diagrama 5. Sistemas de la turbina a gas refrigerante



Fuente: elaboración propia, con base en DRESSER RAND. Instruction Manual for Single Stage 350, 500, and 700 Frame Steam Turbines.

Por medio del diagrama 5 se establece el modo funcional de la turbina que se desarrollará a lo largo de este proyecto, en síntesis el gas refrigerante

sobrecalentado en la entrada debe tener los parámetros de temperatura, presión y flujo másico establecidos, consiguiente, en el interior de la turbina se encuentran los sistemas principales de paso del gas refrigerante sobrecalentado, el primero de ellos es el sistema de alimentación donde se genera la energía cinética y se direcciona el flujo del refrigerante sobrecalentado hacia el sistema dinámico, en el cual el flujo genera un movimiento rotatorio en la rueda y los álabes que la componen, de este modo producir energía mecánica en el rotor que hace parte del sistema de potencia; estos sistemas están apoyados mediante los sistemas de lubricación y de control que permiten el correcto funcionamiento, de igual manera, los cinco sistemas ya mencionados están dentro de un sistema estructural, para así componer la turbina. Por otro lado, esta turbina cuenta con dos salidas, la primera es el torque producido en el sistema de potencia, el cual será llevado a un generador de energía eléctrica para de este modo obtener la demanda establecida; la segunda salida es la del refrigerante sobrecalentado el cual continuará a lo largo del ORC, fluido que deberá tener también una temperatura y presión establecida.

2.1.2 Selección del tipo de turbina a gas refrigerante sobrecalentado. En base a la clasificación de las turbinas que previamente se realizó, y unos criterios que se han establecido, se determina el tipo de turbina a diseñar en este proyecto.

Cuadro 2. Selección turbinas a gas refrigerante sobrecalentado

CLASIFICACIÓN DE LAS TURBINAS DE VAPOR		
SELECCIÓN		CRITERIO
ETAPAS		
Monoetapa	Multietapa	Se debe suplir una potencia alta
APROVECHAMIENTO DE VAPOR		
Acción	Reacción	Solo tendrá etapas de acción por el bajo volumen manejado.
DIRECCIÓN DEL FLUJO DE VAPOR		
Axial	Radial	Es el método más utilizado en la industria y tiene una fabricación más sencilla.
EXTRACCIÓN DE VAPOR		
SI	NO	No se aprovechará en fluido en etapas intermedias y el ORC no tiene derivaciones para aprovechar el vapor en otros procesos industriales.
PRESIÓN DE SALIDA DEL VAPOR		
Contrapresión	Condensación	La turbina hace parte de un ORC donde el vapor de salida está direccionado a un condensador para posteriormente aprovechar el cambio de fase en el ciclo.

Fuente: elaboración propia.

2.1.3 Análisis comparativo de fabricantes de turbinas a vapor. Mediante un comparativo de algunas compañías fabricantes de turbinas de vapor, se determina los factores diferenciadores que se presentan entre los diseños de estas con el fin de establecer el diseño a implementar en este proyecto.

Cuadro 3. Análisis comparativo de fabricantes de turbinas de vapor

Fabricante	Dresser Rand	Skinner Power System	Hyundai
Sistemas			
Sistema de alimentación	Cámara-tobera	Tobera	Cámara - Disco
Salida del vapor	Ducto directo	Ducto directo	Ducto en semicírculo
Sistema de control	PLC	Mecánico	Integrados cerrados
Sistema dinámico	Rueda con álabes	Corona de álabes	Corona de álabes de medio cuerpo
Sistema estructural	Soportes estructurales	Base estructural	Soporte placa base

Fuente: elaboración propia, con base en DRESSER RAND. Instruction Manual for Single Stage 350, 500, and 700 Frame Steam Turbines. SKINNER POWER SYSTEMS. Instruction and maintenance manual S-series turbine. HYUNDAI. Steam turbine type SSH MSS CSH HGS. 2010.

Por medio de este análisis se puede diferenciar la composición de las diferentes turbinas de vapor que se encuentran comercialmente, para así, por medio de una matriz de priorización establecer qué tipo de sistemas harán parte de la turbina a desarrollar en este proyecto.

2.1.3.1 Matriz de priorización para selección de alternativas. Es una matriz que permite evaluar opciones para así realizar la elección de la mejor alternativa; es usada con el fin de darle relevancia a ideas, actividades, características, u opciones de acción entre varias alternativas que se presenten, evaluando en base algunos criterios determinados²⁸.

Dentro de esta matriz se evalúa los criterios de eficiencia, fabricación o implementación, costos y selección de materiales, con el fin de determinar la mejor alternativa por sistema entre los fabricantes, para definir los componentes que tendrá la turbina a diseñar.

- **Eficiencia:** Mediante este criterio se evalúa la efectividad del componente en la turbina a diseñar para los requerimientos establecidos. Este factor tendrá la mayor relevancia porcentual (35%) en vista de que los componentes proporcionen mayor eficiencia.
- **Fabricación o implementación:** En este criterio se evalúa la facilidad de fabricación del componente a evaluar, o la implementación de este dentro del sistema. La fabricación o implementación será el segundo en la escala de relevancia con una ponderación del 30%.

²⁸ CASAS RIVERA, Gerardo Andrés y GIRALDO GÓMEZ, Herbert. Método de priorización para la identificación de los parámetros determinantes que generan los cambios de gran magnitud en los proyectos de construcción. Dearq. [en línea]. 2014. (No. 14)., pp. 224-235. Disponible en: <https://doaj.org/article/306a3a5f2cb64f4884b2d6b9000643f1>.

- **Costos:** Se evalúa el costo de la implementación del componente en la turbina, con un valor porcentual del 20%.
- **Mantenimiento:** En este criterio se busca evaluar el menor mantenimiento posible del componente, su peso porcentual será del 15%.

Definidos los parámetros a evaluar y la relevancia ponderada que cada uno de estos recibe, se establece la escala con la que se calificarán estos criterios en los diferentes componentes.

Cuadro 4. Escala de calificación para la selección del componente

VALOR NUMÉRICO	EFICIENCIA	FABRICACIÓN O IMPLEMENTACIÓN	COSTOS	MANTENIMIENTO
1	No es eficiente la implementación del componente en la turbina	La fabricación del componente es muy complicada y/o su implementación no es apropiada	No es financieramente viable la implementación del componente	El mantenimiento del componente es complejo y requiere de un conjunto técnico especializado
2	El componente genera una eficiencia insuficiente en la turbina	El componente tiene difícil fabricación y/o su implementación no buena opción	La implementación del componente es costosa	El mantenimiento del componente es complejo y requiere de un equipo especializado
3	La eficiencia que brinda el componente es aceptable para su implementación	La facilidad de fabricar el componente es media y/o su implementación es medianamente apropiada	Los costos de implementación del componente son aceptables	El mantenimiento del componente requiere de algún equipo especializado
4	La eficiencia que genera el componente es sobresaliente para su implementación	La fabricación del componente es factible y/o su implementación es apropiada	La implementación del componente no genera mayores costos	El mantenimiento del componente puede realizarse sin mayor complejidad y con equipo simple
5	Es eficiente el uso del componente en la turbina	La fabricación del componente es fácil y/o su implementación es muy conveniente	Es financieramente viable la implementación del componente	El mantenimiento del componente no es complejo

Fuente: elaboración propia.

Una vez establecidos los criterios y la escala de calificación se realizan las matrices correspondientes para cada sistema las cuales se encuentran en el anexo A, en donde se evalúan las diferentes alternativas y se obtiene lo siguiente:

Cuadro 5. Sistemas para la turbina a diseñar

SISTEMA	COMPONENTE	CALIFICACIÓN
Sistema de alimentación	Cámara - Disco	3,95
Salida del vapor	Ducto en semicírculo	3,5
Sistema de control	PLC	3,8
Sistema dinámico	Rueda con álabes	4,35
Sistema estructural	Soportes estructurales	4,10

Fuente: elaboración propia.

A partir del cuadro anterior se puede concluir que la alimentación de la turbina será mediante una cámara con disco, tendrá una salida de vapor directa, el sistema de control será mediante PLC, poseerá un sistema dinámico compuesto por un disco con álabes y finalmente el sistema estructural será mediante soportes estructurales, lo anterior teniendo en cuenta los criterios considerados en las matrices.

2.2 NORMATIVA

2.2.1 Normativa API 611. La norma del Instituto Americano del Petróleo (American Petroleum Institute) 611, se basa en el conocimiento y la experiencia de los fabricantes y usuarios de turbinas de vapor, cubre requisitos mínimos incluyendo diseño básico, materiales, sistemas de lubricación relacionados, controles, equipos auxiliares y accesorios. Esta norma incluye solo turbinas de uso general horizontales o verticales que se utilizan para conducir equipos de dimensiones pequeñas y bajas potencias²⁹.

Los aspectos requeridos para el proyecto que cubre la norma son:

- Diseño básico de carcaza
- Conexiones carcaza
- Sellos
- Rodamientos y soportes
- Lubricación
- Materiales
- Reductores
- Acoplamientos y guardias

2.2.2 Normativa API 612. La norma del Instituto Americano del Petróleo (American Petroleum Institute) 612, se enfoca en las turbinas para aplicaciones de propósito especial como turbinas horizontales que conducen equipos que generalmente son de gran tamaño y altas potencias. Esta norma incluye requisitos de diseño, materiales, fabricación, pruebas de inspección, sistemas de aceite lubricante relacionados, instrumentación, sistemas de control, y el equipo auxiliar³⁰.

Los aspectos requeridos para el proyecto que cubre la norma son:

- Ejes
- Perfilado
- Caja de rodamientos
- Sellos del eje
- Soldaduras

²⁹ API STD 611. General-purpose steam turbines for petroleum, chemical, and gas industry services. General API. [en línea]. US. 2008., [Consultado Mar 02, 2020]. Disponible en: https://global.ihs.com/doc_detail.cfm?gid=PAKPCCAAAAAAAAAAAA&input_doc_number=API STD 611.

³⁰ API STD 612. Petroleum, petrochemical, and natural gas industries-steam turbines-special-purpose applications. Energy API. [en línea]. US. 2014., [Consultado Mar 02, 2020]. Disponible en: https://global.ihs.com/doc_detail.cfm?gid=ZFXJIFAAAAAAAAAAAA&input_doc_number=API STD 612.

2.2.3 Normativa NEMA SM-23. La norma de la Asociación Nacional de Fabricantes Eléctricos (National Electrical Manufacturers Association), tiene como propósito facilitar la aplicación de las turbinas de vapor de accionamiento mecánico de una etapa y etapas múltiples³¹.

Los aspectos requeridos para el proyecto que cubre la norma son:

- Componentes
- Carcasa
- Válvulas
- Accesorios de escape
- Condiciones del vapor
- Conexiones de turbina
- Lubricación
- Dispositivos de control
- Sistemas de protección
- Instalación
- Operación y mantenimiento

2.3 PARÁMETROS DE INGENIERÍA

Tomando como base la normativa anteriormente mencionada como también algunas que se podrán ir mencionando a lo largo de la ejecución del proyecto, se establecen algunos ítems de relevancia como apoyo y guía para el desarrollo del diseño de la turbina objeto de estudio, donde se destaca el uso de materiales, sistemas y componentes.

- API 611, 6.1.9: Todos los equipos deberán estar diseñados para permitir un mantenimiento rápido y económico. Componentes mayores como partes de las carcasas y caja de sujeciones deberán ser diseñados y fabricados para asegurar el preciso alineamiento al reensamblarse.
- API 611, 6.1.14: El equipo y auxiliares deberá ser capaz de operar bajo las condiciones ambientales especificadas por el comprador. Estas condiciones deberán incluir si la instalación es en exteriores o interiores, con o sin techo, máxima y mínima temperatura, humedad, condiciones corrosivas o de polvo.
- API 612, 10.5.1: Los sellos laberínticos se usan tanto para el sello entre etapas como para el sello del eje.

³¹ NEMA. Steam turbines for mechanical drive service. Butterworth Heinemann. [en línea]. US. 2002., [Consultado Mar 03, 2020]. Disponible en: [https://ebookcentral.proquest.com/lib/\[SITE_ID\]/detail.action?docID=1823234](https://ebookcentral.proquest.com/lib/[SITE_ID]/detail.action?docID=1823234).

- API 612: La vida útil de la turbina no está definida en el estándar. Además, el período ininterrumpido de operación será según el requisito del comprador.
- NEMA SM 23, 2.2.1.1: La sección del extremo de entrada de vapor es la parte de la carcasa que contiene el vapor a mayor presión.

2.4 PARÁMETROS DE DISEÑO

En el diseño de la turbina a gas refrigerante sobrecalentado, es indispensable tener en cuenta ciertos parámetros de ingeniería, entre los más relevantes son:

2.4.1 Potencia. En el campo petrolero Caño Limón, la red eléctrica interconectada nacional no supe la demanda energética de todos los pozos del campo, debido a que la red interna del campo es distribuida por medio de contratos a diferentes compañías, las cuales dependiendo de las condiciones de este contrato cuentan o no con los diferentes beneficios que el campo posee. Todos los pozos petroleros de Caño Limón son de bombeo electrosumergible (BES) el cual debe tener una fuente de energía constante, de este modo, los pozos que no tienen suministro eléctrico deben proveer su energía a través de generadores accionados con motores diesel, que conlleva a intermitencias en el servicio eléctrico.

Los generadores eléctricos deben estar en operación continua todos los días de la semana porque de ello depende la extracción y producción de petróleo, para ello se debe contar con combustible diesel a disposición para el accionamiento de estos.

Actualmente el transporte y almacenamiento del combustible diesel presenta dificultades en vista de que se requieren estrictas medidas de seguridad para las personas y el ambiente, entre otras dificultades que contraen estas labores, de igual manera, realizar el proceso de combustión con diesel conlleva a un impacto ambiental negativo generando gases perjudiciales para la salud y el medio ambiente.

El sistema de BES consta de un equipo en superficie y otro en el fondo del pozo, el equipo de fondo lo constituye los siguientes componentes: motor de inducción, bomba centrífuga, sello o protector, intake, separador de gas, motor lead extensión y cable de potencia. El equipo superficial lo compone un variador de frecuencia, caja de venteo y transformadores³².

Se hace un análisis de la demanda energética de los equipos y componentes que hacen parte del sistema BES del pozo petrolero seleccionado del campo Caño

³² DÍAZ CESPEDES, Leonardo. Análisis Comparativo Del Consumo Energético Y Económico Con La Implementación De Motores De Inducción Vs Motores Pmm En Los Sistemas BES. [en línea]. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga: 2016. Disponible en: <http://noesis.uis.edu.co/bitstream/123456789/33851/1/161252.pdf>.

Limón, para obtener un valor estimado con el cual se basará el diseño de la turbina foco de estudio de este proyecto, donde se consideran los parámetros de operación de cada uno de los elementos, para concluir un consumo de energía en kilowatts del pozo. Se tendrá en cuenta un 20% agregado a dicho valor total, estimando una sobrecarga en el sistema.

Cuadro 6. Componentes del sistema de bombeo electrosumergible (BES)

COMPONENTES
Bomba Serie SN3600; 256HP
Intake/ Separador de gas
Protector Superior
Protector Inferior
Motor Serie 562; 263HP
Sensor Type 387/456; 150hp
Cable
Variador de Velocidad
Transformador

Fuente: elaboración propia, con base en DÍAZ CESPEDES Análisis comparativo del consumo energético y económico con la implementación de motores de inducción vs motores pmm en los sistemas BES. [en línea].Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga: 2016, Disponible en: <http://noesis.uis.edu.co/bitstream/123456789/33851/1/161252.pdf>.

En el análisis mencionado anteriormente se apreció que los componentes que consumen potencia son: Motor, bomba y sensor de presión. Por ello el consumo total de potencia es 669HP y agregando el 20% la potencia estimada será 802,8HP.

2.4.2 Flujo másico. En la propuesta del ORC, se ha establecido que el refrigerante debe tener un flujo másico de 65 lb/min, esto debido a las condiciones y las características que posee el agua residual de la extracción de petróleo.

$$\dot{m} = 65 \frac{lb}{min}$$

2.4.3 Temperaturas, presiones y entalpías. Teniendo en cuenta que se busca aprovechar el fluido para obtener la mayor potencia eléctrica posible, se ha establecido que el intercambiador de calor debe proveer gas refrigerante sobrecalentado a una presión de 3,6MPa a una temperatura de 230°C, por ende, este criterio presta relevancia en el diseño de la turbina, pues son los parámetros de diseño que se deben tener en cuenta en la entrada de la turbina.

A su vez, en el ORC propuesto se tiene un condensador como se observar en el diagrama 2, para facilitar la operación de este equipo el fluido debe estar a presión atmosférica, es decir, se requiere que el fluido a la salida de la turbina esté a esta presión; por otro lado, debido a que anteriormente se estableció que en el interior de la turbina no habrá condensación y sabiendo que la temperatura de saturación del refrigerante a dicha presión es de -26,3°C a esta presión, se establece a -20°C la temperatura de salida del fluido, garantizando así el estado gaseoso del refrigerante a la salida de la turbina.

Ya determinados la presión y la temperatura en la entrada y en la salida de la turbina, por medio de las tablas termodinámicas del refrigerante R-134a³³ se establecen las entalpías del fluido en esos dos puntos.

De este modo, se establecen los valores en la entrada y en la salida de la turbina mediante el siguiente cuadro.

Cuadro 7. Temperatura, presión y entalpía de trabajo

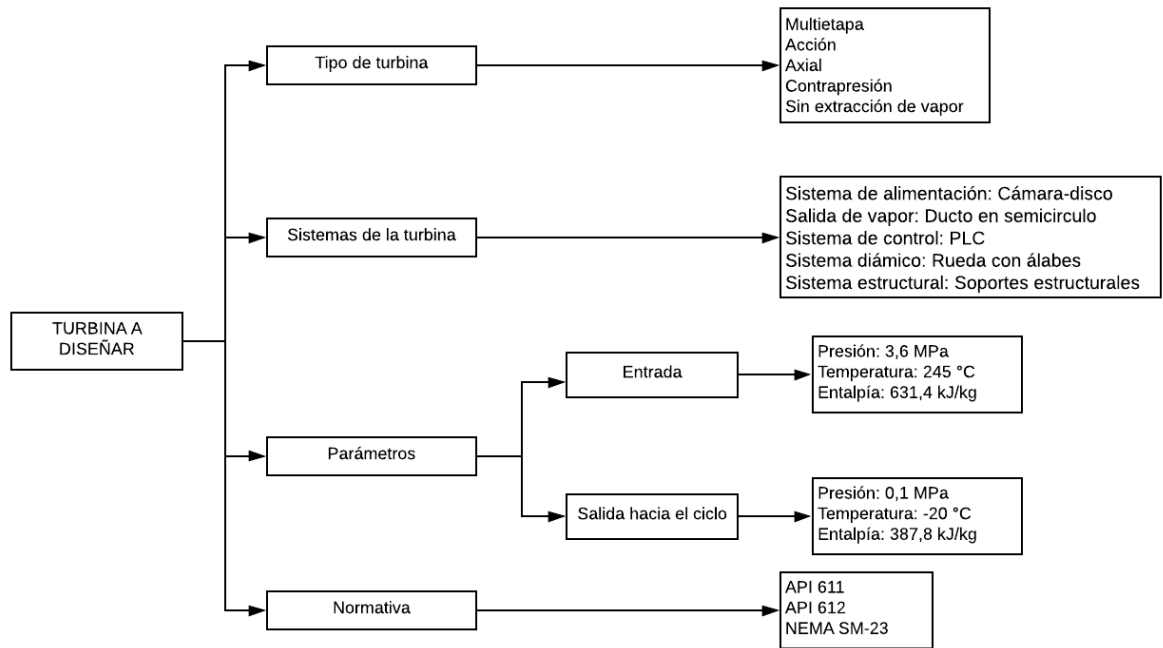
	PRESIÓN		TEMPERATURA		ENTALPÍA	
ENTRADA	P ₁ (MPa)	3,6	T ₁ (°C)	230	h ₁ (kJ/kg)	612,7
SALIDA	P ₂ (MPa)	0,1	T ₂ (°C)	-20	h ₂ (kJ/kg)	387,8

Fuente: elaboración propia, con base en FREON Tables of chemical thermodynamic properties refrigerant R134a. Chemours. [en línea]. Washington. 2018., pp. 52. Disponible en: shorturl.at/fkB79.

Teniendo en cuenta la ecuación de conservación de energía $\dot{W} = \dot{m}(\Delta h)$, y el cuadro 7 que las condiciones del fluido no son las más adecuadas para obtener la potencia deseada, sin embargo, se puede obtener la potencia suficiente para suplir el requerimiento de alguno de los componentes (motor, bomba o sensor).

³³ FREON. Tables of chemical thermodynamic properties refrigerant R134a. Chemours. [en línea]. Washington. 2018., pp. 52. Disponible en: shorturl.at/fkB79.

Diagrama 6. Síntesis de la turbina a diseñar



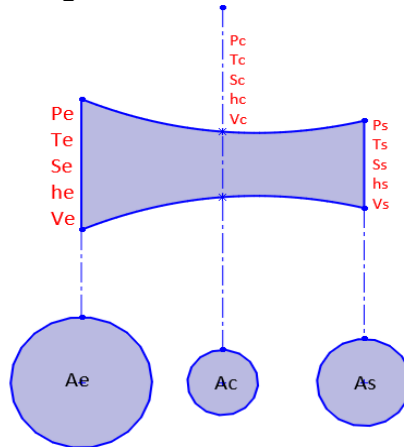
Fuente: elaboración propia.

3. DISEÑO DETALLADO DE UNA TURBINA A GAS REFRIGERANTE SOBREALENTADO

3.1 SISTEMA DE ALIMENTACIÓN

3.1.1 Tobera. Para el diseño de la tobera se toma como base los parámetros de presión, temperatura y entalpía anteriormente establecidos, teniendo en cuenta que estos serán las condiciones de entrada.

Diagrama 7. Tobera



Fuente: elaboración propia.

La tobera posee tres puntos importantes (entrada, garganta y salida) como se refleja en el diagrama 7, teniendo en cuenta los parámetros establecidos en el capítulo anterior, se determina las propiedades termodinámicas en cada uno de estos puntos siguiendo la literatura de Çengel et al³⁴.

De la literatura en mención se tienen en cuenta las siguientes ecuaciones para realizar las siguientes ecuaciones:

Ecuación 1. Termodinámica en la tobera

$$T = T_0 \left(\frac{P}{P_0} \right)^{(k-1)/k}$$

$$\rho = \frac{P}{RT}$$

$$V = \sqrt{2 c_p (T_0 - T)}$$

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

³⁴ ÇENGEL, Y. y BOLES, M. Thermodynamics an engineering approach. 8 ed. New York: McGraw Hill Education, 2015. 1115 p. ISBN 978-0-07-339817-4.

$$C = \sqrt{kRT}$$

$$k = \frac{c_p}{c_v}$$

$$Ma = \frac{V}{C}$$

$$R = 0,0815 \text{ kJ/kg K}$$

Fuente: McCONKEY, EASTOP Applied thermodynamics for engineering technologists. 5 ed. India: Pearson education 2009. 307-366 p. ISBN 978-81-7758-238-3 . Çengel, Boles Thermodynamics an engineering approach. 8 ed. New York: McGraw Hill Education 2015. 1115 p. ISBN 978-0-07-339817-4 . Çengel, Boles Thermodynamics an engineering approach. 8 ed. New York: McGraw Hill Education 2015. 1115 p. ISBN 978-0-07-339817-4 .

Donde:

Ma : Número de Mach, factor adimensional que determina el régimen de flujo

T : Temperatura en un punto (K)

T_0 : Temperatura de entrada (K)

T : Presión en un punto (kPa)

T_0 : Temperatura de entrada (kPa)

k : Relación c_p/c_v

c_p : Calor específico a presión constante

c_v : Calor específico a volumen constante

V : Velocidad del fluido

ρ : Densidad del fluido

R : Constante universal del gas

A : Área transversal en un punto

\dot{m} : Flujo másico

c : Velocidad del sonido

Entonces:

Aplicando las ecuaciones se realiza un análisis en diferentes puntos de la tobera, con el fin de determinar el comportamiento del fluido y consiguiente el perfil de la tobera con sus respectivas dimensiones.

En la entrada de la tobera la velocidad se asume como cero considerando un estado estacionario lo que conduce a que el área tienda a infinito y el Mach sea cero, de este modo, se determinan los datos a una presión de 3500 kPa para poder construir el perfil de la tobera.

$$k = \frac{1,2434}{1,1003} = 1,1299$$

$$T = (503,15) \left(\frac{3500}{3600} \right)^{(1,1299-1)/1,1299} = 501,52 \text{ K}$$

$$V = \sqrt{2 (1,2434)(503,15 - 501,52)} = 63,62 \text{ m/s}$$

$$\rho = \frac{3500 \text{ kPa}}{(0,0815)(501,52 \text{ K})} = 85,6 \text{ kg/m}^3$$

$$A = \frac{0,4914 \text{ kg/s}}{(85,6 \text{ kg/m}^3)(63,62 \text{ m/s})} = 9,02 \times 10^{-5} \text{ m}$$

$$c = \sqrt{(1,1299)(0,0815)(501,52 \text{ K})} = 214,91 \text{ m/s}$$

$$Ma = \frac{63,62}{214,91} = 0,3$$

Una vez calculadas las propiedades en la entrada, se replica este procedimiento en diferentes puntos de la tobera, de este modo, se obtiene el cuadro 8.

Cuadro 8. Propiedades del fluido en la tobera

SECTOR	P (kPa)	T (°K)	T (°C)	V (m/s)	ρ (kg/m ³)	A (m)	Φ (mm)	c (m/s)	Ma
Entrada	3600	503,15	230	0	87,8	∞		215,260	0
	3500	501,52	228,37	63,62	85,6	9,02E-05	10,72	214,91	0,30
	3200	496,38	223,23	129,76	79,1	4,8E-05	7,81	213,81	0,61
	2800	488,81	215,66	188,82	70,3	3,7E-05	6,87	212,17	0,89
Crítico	2625	485,20	212,05	211,29	66,4	3,5E-05	6,68	211,38	1,00
	2400	480,22	207,07	238,78	61,3	3,4E-05	6,54	210,30	1,14
	2000	470,26	197,11	286,01	52,2	3,3E-05	6,47	208,10	1,37
	1600	458,34	185,19	333,82	42,8	3,4E-05	6,61	205,45	1,62
	1200	443,42	170,27	385,40	33,2	3,8E-05	6,99	202,08	1,91
Salida	800	423,21	150,06	445,85	23,2	4,8E-05	7,78	197,42	2,26

Fuente: elaboración propia, con base en FREON Tables of chemical thermodynamic properties refrigerant R134a. Chemours. [en línea]. Washington. 2018., pp. 52. Disponible en: shorturl.at/fkB79., Çengel, Boles Thermodynamics an engineering approach. 8 ed. New York: McGraw Hill Education 2015. 1115 p. ISBN 978-0-07-339817-4 .

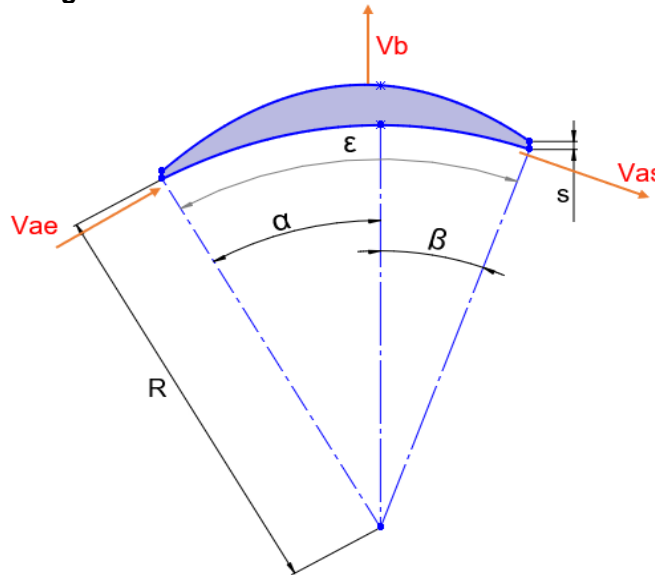
La garganta o punto crítico de la tobera se presenta donde el Mach es 1, es decir, el fluido fluye a la velocidad del sonido, como se puede observar este punto se da a una presión de 2625 kPa.

Finalmente, se llega a una presión de 800kPa donde con la cual se obtiene la potencia que se requiere.

3.1 SISTEMA DINÁMICO

3.2.1. Álabes. En el diseño del álabe se deben tener en cuenta ciertos criterios que se irán evaluando a lo largo de la ejecución de este, en primera instancia es relevante determinar los ángulos de entrada y salida a través de un proceso iterativo donde se obtenga el mayor torque, lo cual ha llevado a concluir que el óptimo ángulo de entrada es de 30° y el ángulo de salida de 20° , como se puede observar en el cuadro 14. El diseño del álabe y las ecuaciones que se han tenido en cuenta están basadas en la literatura de McConkey³⁵.

Imagen 10. Perfil del álabe



Fuente: elaboración propia.

Ecuación 2. Perfil del álabe

$$L = \frac{\dot{m} v_{etapa}}{V_{ae} n \sin \alpha e}$$

$$\varepsilon = \alpha e + \beta s$$

$$R = 2\phi$$

$$n = \frac{2\pi R \varepsilon}{360}$$

Donde:

L: Altura del álabe

n: Longitud de arco

αe : Ángulo de entrada del fluido

βs : Ángulo de salida del fluido

R: Radio del álabe

v_{etapa} : Volumen específico de la etapa

V_{ae} : Velocidad absoluta de entrada

ϕ : Diámetro salida tobera

Fuente: McCONKEY, EASTOP Applied thermodynamics for engineering technologists. 5 ed. India: Pearson education 2009. 307-366 p. ISBN 978-81-7758-238-3 .

³⁵ MCCONKEY, A. y EASTOP, T. Applied thermodynamics for engineering technologists. 5 ed. India: Pearson education, 2009. 307-366 p. ISBN 978-81-7758-238-3.

3.1.1.1 Primera etapa

$$\alpha_e = 30^\circ, \beta_s = 20^\circ$$

$$\varepsilon = 30^\circ + 20^\circ = 50^\circ$$

$$V_{ae} = 445,846 \text{ m/s}$$

$$R = 2 * 0,0078 \text{ m}$$

$$R = 0,0156 \text{ m}$$

$$n = \frac{2\pi * 0,0156 \text{ m} * 50^\circ}{360}$$

$$n = 0,0136 \text{ m}$$

$$L = \frac{0,16379 \text{ kg/s} * 0,0284 \text{ m}^3/\text{kg}}{445,846 \text{ m/s} * 0,0136 \text{ m} * \sin 30^\circ}$$

$$L = 0,004605 \text{ m}$$

Así mismo se calcula el perfil del álabe para las etapas siguientes, como se puede observar a continuación:

Cuadro 9. Resultados dimensiones de los álbes

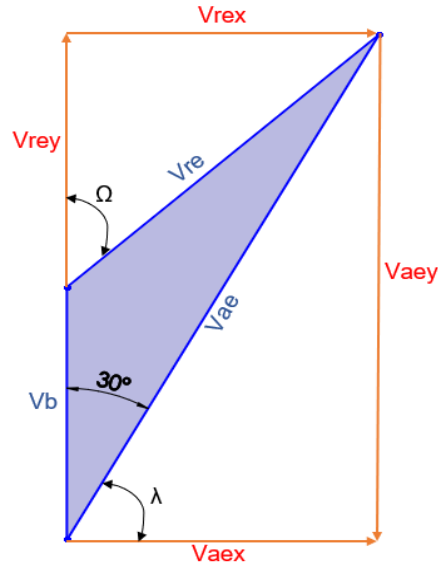
Etap	Tipo	Altura de diseño	Long. de arco	ε
1	M	0.04 m	0.0136 m	50°
	F	0.04 m	0.0134 m	49.5°
2	M	0.04 m	0.0133 m	48.8°
	F	0.04 m	0.0131 m	48.3°
3	M	0.04 m	0.0129 m	47.6°
	F	0.04 m	0.0128 m	47.1°
4	M	0.04 m	0.0126 m	46.4°
	F	0.04 m	0.0125 m	45.9°

Fuente: elaboración propia.

Debido a que la altura de los álbes por cálculos es baja, se establece que estos tengan una altura de 40mm.

❖ Triángulos de velocidades entrada

Imagen 11. Triángulo de velocidades de entrada



Fuente: elaboración propia, con base en McCONKEY, EASTOP Applied thermodynamics for engineering technologists. 5 ed. India: Pearson education 2009. 307-366 p. ISBN 978-81-7758-238-3 .

Ecuación 3. Triángulo de velocidades de entrada

$$\begin{aligned}
 V_b &= V_{ae} \left(\frac{\cos \alpha_e}{2} \right) & V_{aey} &= V_{ae} \operatorname{sen}(\lambda) \\
 V_{rex} &= V_{aex} = V_{ae} \cos(\lambda) & V_{re} &= \sqrt{V_{rex}^2 + V_{rey}^2} \\
 V_{rey} &= V_{aey} - V_b
 \end{aligned}$$

Fuente: elaboración propia, con base en McCONKEY, EASTOP Applied thermodynamics for engineering technologists. 5 ed. India: Pearson education 2009. 307-366 p. ISBN 978-81-7758-238-3 .

Entonces:

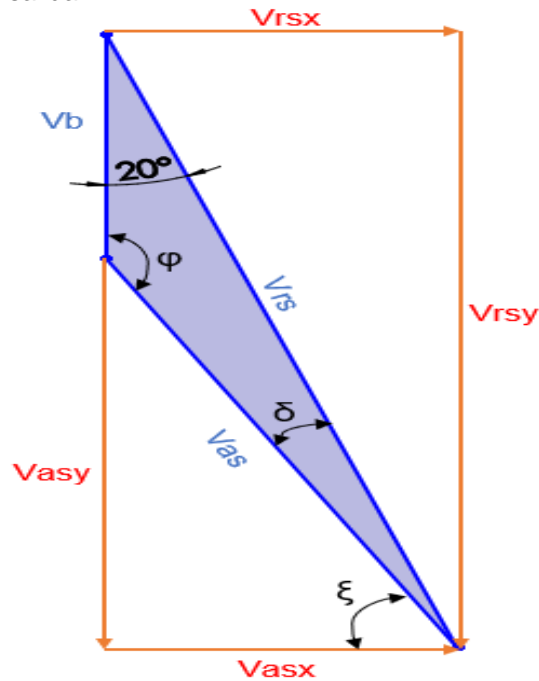
$$V_b = 193,057 \text{ m/s} \qquad V_{aey} = 386,114 \text{ m/s}$$

$$V_{rex} = V_{aex} = 222,923 \text{ m/s} \qquad V_{re} = 294,899 \text{ m/s}$$

$$V_{rey} = 193,057 \text{ m/s}$$

❖ Triangulo de velocidades salida

Imagen 12. Triangulo de velocidades de salida



Fuente: elaboración propia, con base en McCONKEY, EASTOP Applied thermodynamics for engineering technologists. 5 ed. India: Pearson education 2009. 307-366 p. ISBN 978-81-7758-238-3 .

Ecuación 4. Triángulos de velocidades en la salida

$$V_{as} = V_{ae} n_f$$

$$V_{asx} = V_{rsx} = V_{as} \cos(\xi)$$

$$V_{rs} = \frac{V_{as} \operatorname{sen}(\varphi)}{\operatorname{sen}(\beta)}$$

$$V_{asy} = V_{as} \cos(\xi)$$

$$V_{rsy} = V_{rs} \cos(\beta)$$

Fuente: elaboración propia, con base en McCONKEY, EASTOP Applied thermodynamics for engineering technologists. 5 ed. India: Pearson education 2009. 307-366 p. ISBN 978-81-7758-238-3 .

Entonces:

$$V_{as} = 386,114 \text{ m/s}$$

$$V_{asy} = 334,9 \text{ m/s}$$

$$V_{rs} = 561,84 \text{ m/s}$$

$$V_{rsy} = 527,957 \text{ m/s}$$

$$V_{asx} = V_{rsx} = 192,161 \text{ m/s}$$

Teniendo en cuenta las velocidades anteriormente calculadas, se determina las magnitudes de las fuerzas ejercidas en el álabe.

$$F_a = \dot{m}(V_{rex} - V_{rsx})$$

$$F_a = 15,116 \text{ N}$$

$$F_t = \dot{m}(V_{rs} \cos(\beta) + V_{re} \cos(\Omega))$$

$$F_t = 354,3 \text{ N}$$

El sistema de ecuaciones anteriormente planteado se replica en las siguientes etapas de la turbina, en las cuales se obtienen los siguientes resultados:

Cuadro 10. Resultados triángulos de entrada

Etapas	Tipo	α_e (°)	β_s (°)	λ (°)	Ω (°)	Vb (m/s)	Vaex (m/s)	Vaey (m/s)	Vrey (m/s)	Vrex (m/s)	Vre (m/s)	Vae (m/s)
1	M	30	20	60,00	49,11	193,057	222,923	386,114	193,057	222,923	294,899	445,846
	F	20	29,5	70,00	37,88	193,057	132,059	362,828	169,771	132,059	215,086	386,114
2	M	29,5	19,3	60,50	31,00	193,057	165,482	292,489	99,432	165,482	193,057	336,056
	F	19,3	29	70,70	49,35	193,057	96,672	276,051	82,994	96,672	127,410	292,489
3	M	29	18,6	61,00	13,90	193,057	124,022	223,742	30,685	124,022	127,762	255,816
	F	18,6	28,5	71,40	75,09	193,057	71,365	212,056	18,999	71,365	73,850	223,742
4	M	28,5	17,9	61,50	12,18	193,057	93,823	172,800	20,257	93,823	95,985	196,628
	F	17,9	28	72,10	61,68	193,057	53,111	164,436	28,621	53,111	60,332	172,800

Fuente: elaboración propia.

Cuadro 11. Resultados triángulos de salida

Etapas	Tipo	δ (°)	φ (°)	ξ (°)	nf	Vas (m/s)	Vrs (m/s)	Vasx (m/s)	Vasy (m/s)	Vrsx (m/s)	Vrsy (m/s)
1	M	9,85	150,15	60,15	0,866	386,114	561,840	192,161	334,900	192,161	527,957
	F	16,43	134,07	44,07	0,870	336,056	490,358	241,464	233,729	241,464	426,786
2	M	12,60	148,10	58,10	0,870	292,489	467,651	154,565	248,312	154,565	441,369
	F	21,46	129,54	39,54	0,875	255,816	406,931	197,284	162,853	197,284	355,910
3	M	15,97	145,43	55,43	0,875	223,742	398,075	126,970	184,226	126,970	377,283
	F	27,94	123,56	33,56	0,879	196,628	343,376	163,845	108,708	163,845	301,765
4	M	20,08	142,02	52,02	0,879	172,800	346,005	106,347	136,199	106,347	329,256
	F	36,44	115,56	25,56	0,883	152,574	293,195	137,647	65,819	137,647	258,876

Fuente: elaboración propia.

Cuadro 12. Resultados de fuerzas en los álaves móviles

Etapas	Fa (N)	Ft (N)
1	15,116	354,3
2	5,364	286,512
3	1,448	246,337
4	6,154	207,898

Fuente: elaboración propia.

Cuadro 13. Torque generado con diferentes ángulos

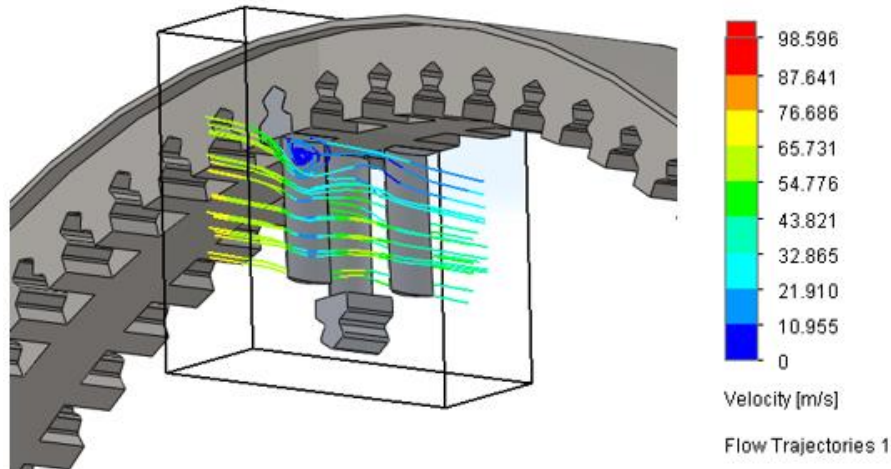
α_e	β_s	TORQUE
30°	20°	317,563 Nm
40°	20°	252,496 Nm
30°	30°	289,482 Nm
40°	10°	268,839 Nm
35°	20°	286,990 Nm
25°	30°	283,480 Nm
20°	30°	274,292 Nm

Fuente: elaboración propia.

3.1.1.2 Análisis del álabe por elementos finitos

Conocidas las condiciones del fluido en cada una de las etapas de la turbina, se realiza un estudio por análisis de elementos finitos con el fin de corroborar los resultados obtenidos.

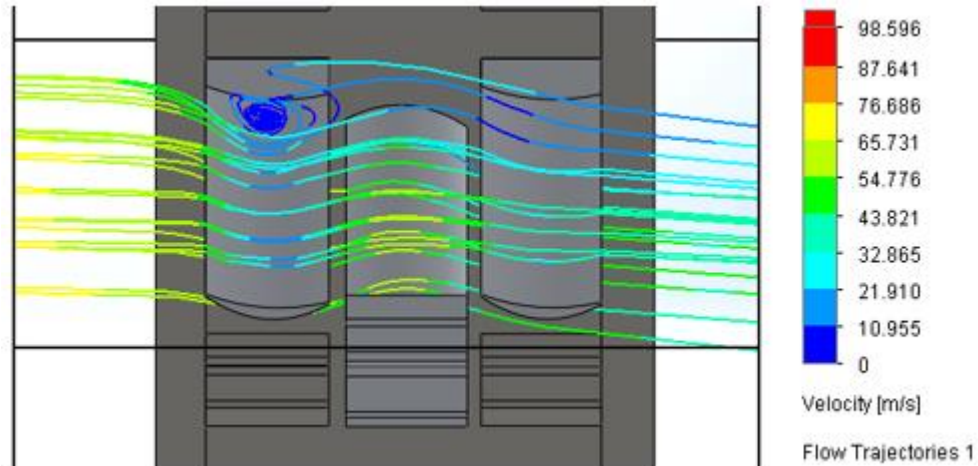
Imagen 13. Análisis por elementos finitos de los álaves



Fuente: elaboración propia por medio del software SolidWorks.

Este análisis se realiza mediante una estimación al comportamiento del fluido, sin embargo, es una aproximación al proceso real que se lleva a cabo entre los álaves debido a la forma en que el software toma los datos de entrada, de este modo, se debe tener en cuenta algunas consideraciones, por ejemplo, se puede observar que la entrada del fluido se genera a lo largo del álabe y teóricamente este debe entrar puntualmente en el medio y en forma cónica por la geometría de la tobera, esta consideración genera visualmente una turbulencia que en realidad no sucede.

Imagen 14. Comportamiento del fluido en los álabes



Fuente: elaboración propia por medio del software SolidWorks.

No obstante, analizando el comportamiento de la velocidad del fluido, y realizando una comparación con los datos teóricos se puede observar que los valores se aproximan, ya que teóricamente la velocidad de salida en el segundo álabes móvil es de $45,14 \text{ m/s}$, y por software se obtiene un valor aproximado de 39 m/s .

3.1.2 Rueda. Por medio de la rueda se pretende ganar mayor inercia y de este modo mayor torque. En el extremo superior tiene unas cavidades predispuestas por ambos lados de la rueda para el ensamble de los álabes, en el interior cuenta con unas protuberancias tipo cola de milano con el fin de ser acoplada con el rotor.

3.1.2.1 Selección del material para el sistema dinámico. Para determinar el material de la rueda hay que tener en cuenta el peso que esta ejerce, entre más liviana sea tendrá un momento de inercia menor, por ende, se puede obtener un mayor torque.

Donde:

$$m = V * \rho$$

m : Masa
 V : Volumen
 ρ : Densidad

En vista de que se han determinado que serán cuatro etapas, se pretende que estas sean implementadas en dos ruedas, con un volumen de $0,00444\text{m}^3$ para la primera y $0,00428\text{m}^3$ para la segunda

En algunos diseños de ruedas de alabes se implementa un acero AISI 403, el cual posee excelentes propiedades que dan cumplimiento con el objetivo de diseño, y cuya densidad es de 7800 kg/m^3 , entonces:

$$m_1 = (0,00444 \text{ m}^3)(7800 \text{ kg/m}^3)$$
$$m_1 = 34,632 \text{ kg}$$

$$m_2 = (0,00428 \text{ m}^3)(7800 \text{ kg/m}^3)$$
$$m_2 = 33,384 \text{ kg}$$

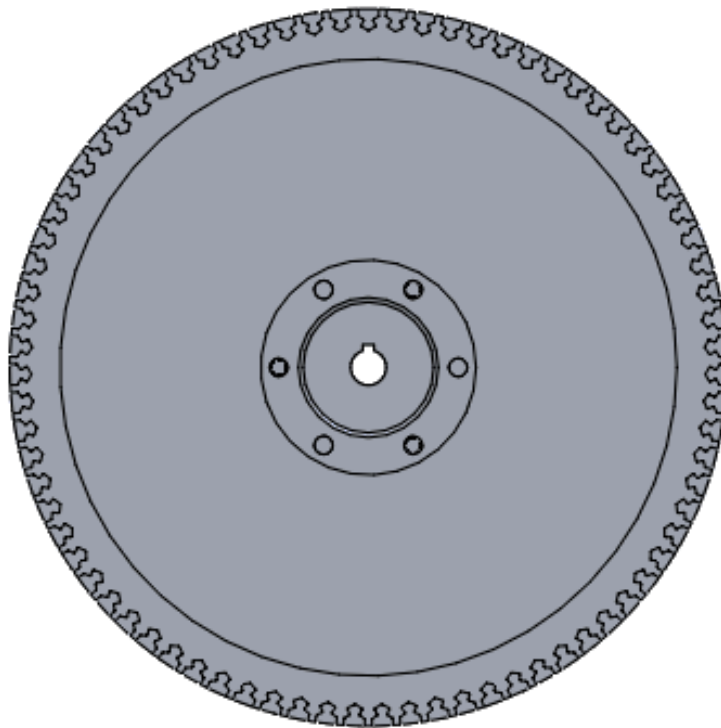
Como se puede observar es un material muy denso y por ende muy pesado, es adecuado en diseños donde el fluido de trabajo es vapor de agua en vista de que este genera mayores fuerzas sobre el sistema dinámico; ya que el para la turbina objeto de estudio de este proyecto el fluido es R-134a, se requiere un material menos denso, para lo cual la aleación de aluminio 6061-T6 es ideal en este requerimiento debido a que cuenta con una densidad de 2700 kg/m^3 , soporta altas temperaturas, es un material común en la industria y además se puede realizar procesos con facilidad.

$$m_1 = (0,00688 \text{ m}^3)(2700 \text{ kg/m}^3)$$
$$m_1 = 11,989 \text{ kg}$$

$$m_2 = (0,00645 \text{ m}^3)(2700 \text{ kg/m}^3)$$
$$m_2 = 11,559 \text{ kg}$$

Este mismo material será implementado en el diseño de los álabes debido a los mismos criterios evaluados en la rueda.

Imagen 15. Rueda de álabes

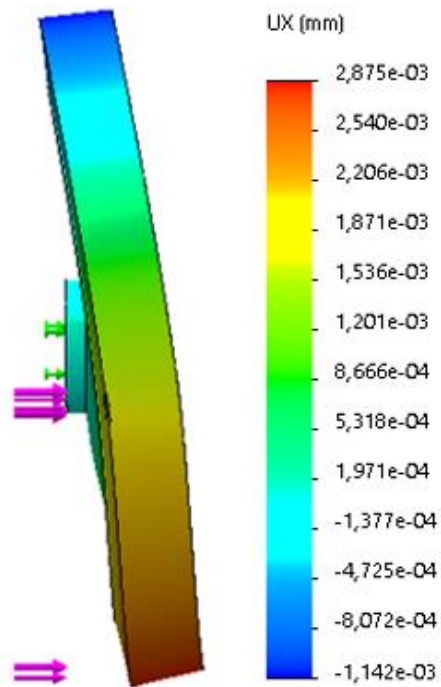


Fuente: elaboración propia por medio del software SolidWorks.

3.1.2.2 Análisis del rodete por elementos finitos

Anteriormente, en el análisis de los álabes se encuentra que el flujo posee una fuerza axial total de 210,033N, que genera una deflexión en el rodete, por ende, se realiza un estudio por elementos finitos con el fin de determinar la magnitud de esta deflexión.

Imagen 16. Análisis por elementos finitos



Fuente: elaboración propia por medio del software SolidWorks.

Lo que se puede observar en este estudio por elementos finitos es que la fuerza axial aplicada es pequeña para generar una deflexión considerable, ya que la magnitud mayor está en el orden de $2,875 \times 10^{-3}$ mm en la zona inferior del rodete, lugar donde se aplica la fuerza. De este análisis se puede concluir que no hay deflexión significativa, por ende, no se genera algún tipo de vibración representativa en la máquina que ocasione problema alguno.

3.1.3 Virador. El virador es un componente que hace parte del funcionamiento de la turbina, puede ser un motor eléctrico o hidráulico según sea conveniente, tiene como finalidad hacer girar el rotor a bajas revoluciones cuando la máquina no está en funcionamiento, con el fin de evitar una curvatura en el rotor ocasionada por el peso de este o por expansión térmica. Cuando la turbina ha estado detenida es necesario que empiece a girar por un tiempo conveniente antes de iniciar el arranque total³⁶.

En base a esto y teniendo en cuenta que la finalidad de la turbina es generar energía eléctrica, para el arranque de la turbina el motor debe tener una fuente de corriente externa al sistema, podría ser una batería o una conexión de otra fuente a la que se tenga acceso. Se selecciona un motorreductor eléctrico DC a 110 V con sugerencia de ser impulsado por una batería, velocidad de salida de 5-371 RPM, motor de referencia Helical Gearbox R SERIES del fabricante KingGear.

Imagen 17. Virador helical gearbox R SERIES



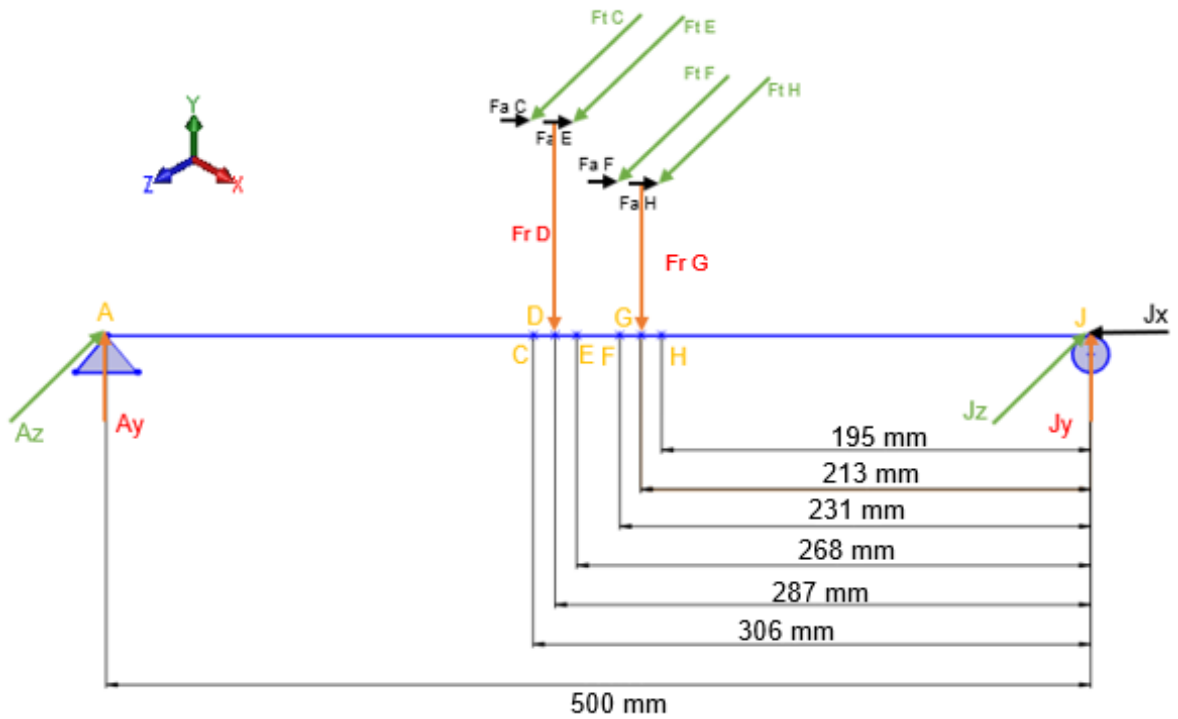
Fuente: KINGGEAR. Virador helical gearbox. [en línea]. [Consultado junio 5, 2020]. Disponible en: https://www.alibaba.com/product-detail/high-strength-housing-helical-gear-75rpm_62501429075.html?spm=a2700.7735675.normalList.9.401f30391iNTY7&s=p

3.2 SISTEMA DE POTENCIA

3.2.1 Rotor. Para realizar en el análisis general del rotor, se ha tomado como base las ecuaciones planteadas en la literatura de Budynas y Nisbett en Diseño en ingeniería mecánica de Shigley.

³⁶ ENERGIZA.ORG. Especial turbinas de vapor. Renovetec. [en línea]. España. 2011., [Consultado Feb 10, 2020]. Disponible en: <http://www.energiza.org/antiores/energizadiciembre2011.pdf>.

Diagrama 8. Diagrama de cuerpo libre del rotor



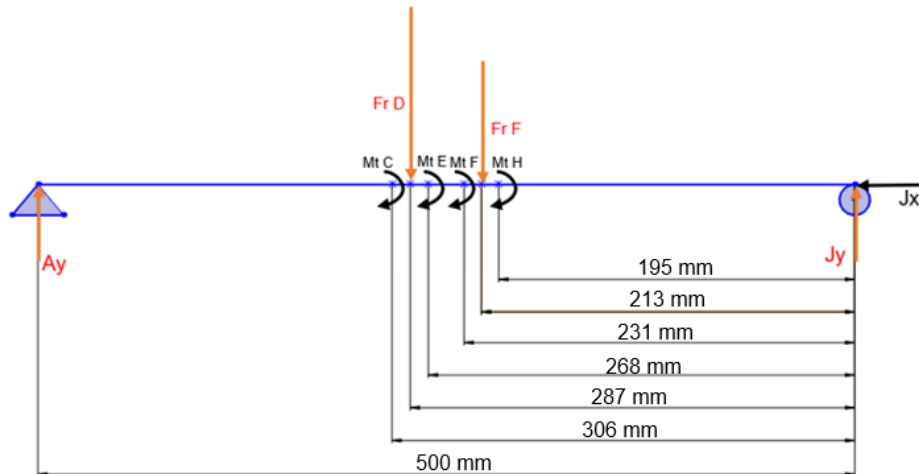
Fuente: elaboración propia.

3.2.1.1 Análisis estático

El rotor es un cuerpo en tres dimensiones, por ende, el análisis estático se debe realizar en los planos XY y XZ.

❖ Plano XY

Diagrama 9. Diagrama de cuerpo libre en el plano XY



Fuente: elaboración propia.

$$\sum F_x = F_{aC} + F_{aE} + F_{aF} + F_{aH} - J_x = 0 \quad (\text{Ec.1})$$

$$\sum F_y = A_y + J_y - F_{RD} - F_{RG} = 0 \quad (\text{Ec.2})$$

$$\sum M_J = (F_{RD} * DJ) + (F_{RG} * GJ) - (A_y * AJ) - (F_{aC} * r) - (F_{aE} * r) - (F_{aF} * r) - (F_{aH} * r) = 0 \quad (\text{Ec.3})$$

$$J_x = F_{aC} + F_{aE} + F_{aF} + F_{aH} \quad (\text{Ec.4})$$

$$J_x = 15,116 \text{ N} + 5,364 \text{ N} + 1,448 \text{ N} + 6,154 \text{ N}$$

$$J_x = 28,083 \text{ N}$$

$$A_y = \frac{(F_{RD} * DJ) + (F_{RG} * GJ) - (F_{aC} * r) - (F_{aE} * r) - (F_{aF} * r) - (F_{aH} * r)}{AJ} \quad (\text{Ec.5})$$

$$A_y = \frac{33,784 \text{ Nm} + 24,211 \text{ Nm} - 4,384 \text{ Nm} - 1,556 \text{ Nm} - 0,420 \text{ Nm} - 1,785 \text{ Nm}}{0,5 \text{ m}}$$

$$A_y = 99,702 \text{ N}$$

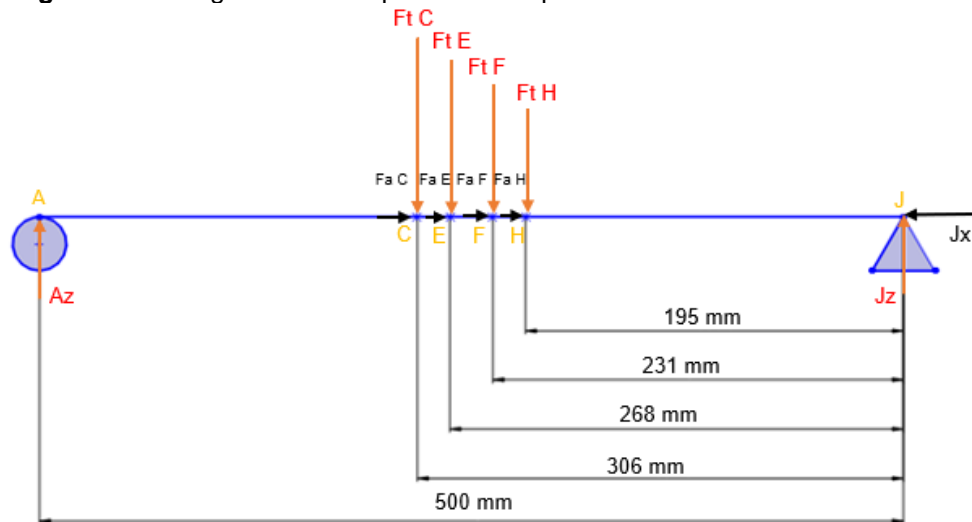
$$J_y = -A_y + F_{RD} + F_{RG} \quad (\text{Ec.6})$$

$$J_y = -99,702 \text{ N} + 117,611 \text{ N} + 113,389 \text{ N}$$

$$J_y = 131,299 \text{ N}$$

❖ Plano XZ

Diagrama 10. Diagrama de cuerpo libre en el plano XZ



Fuente: elaboración propia.

$$\sum F_x = F_{aC} + F_{aE} + F_{aF} + F_{aH} - J_x = 0 \quad (\text{Ec.1})$$

$$\sum F_y = A_z + J_z - F_{tC} - F_{tE} - F_{tF} - F_{tH} = 0 \quad (\text{Ec.2})$$

$$\sum M_J = (F_{tC} * CJ) + (F_{tE} * EJ) + (F_{tF} * CJ) + (F_{tH} * EJ) - (A_z * AJ) = 0 \quad (\text{Ec.3})$$

$$J_x = F_{aC} + F_{aE} + F_{aF} + F_{aH} \quad (\text{Ec.4})$$

$$J_x = 15,116 \text{ N} + 5,364 \text{ N} + 1,448 \text{ N} + 6,154 \text{ N}$$

$$J_x = 28,083 \text{ N}$$

$$A_z = \frac{(F_{tC} * CJ) + (F_{tE} * EJ) + (F_{tF} * FJ) + (F_{tH} * HJ)}{AJ} \quad (\text{Ec.5})$$

$$A_z = \frac{108,475 \text{ Nm} + 76,937 \text{ Nm} + 57,067 \text{ Nm} + 40,659 \text{ Nm}}{0,5 \text{ m}}$$

$$A_z = 566,277 \text{ N}$$

$$J_z = -A_z + F_{tC} + F_{tE} + F_{tF} + F_{tH} \quad (\text{Ec.6})$$

$$J_z = -566,277 \text{ N} + 354,3 \text{ N} + 286,512 \text{ N} + 246,337 \text{ N} + 207,898$$

$$J_z = 528,77 \text{ N}$$

3.2.1.2 Fuerza cortante y momento flector

❖ Plano XY

Sección AC

$$\sum F_y = A_y - V = 0$$

$$V = A_y$$

$$V = 99,702 \text{ N}$$

$$\sum M = M - A_y x = 0$$

$$M = A_y x$$

Sección CD

$$\sum F_y = A_y - V = 0$$

$$V = A_y$$

$$V = 99,702 \text{ N}$$

$$\sum M = M - M_{fc} - Vx = 0$$

$$M = M_{fc} + Vx$$

Sección DE

$$\sum F_y = A_y - F_{RD} - V = 0$$

$$V = A_y - F_{RD}$$

$$V = -7,382 \text{ N}$$

$$\sum M = M - (F_{RD} * AD) - M_{fc} - Vx = 0$$

$$M = (F_{RD} * AD) + M_{fc} + Vx$$

Sección EF

$$\sum F_y = A_y - F_{RD} - V = 0$$

$$V = A_y - F_{RD}$$

$$V = -7,382 \text{ N}$$

$$\sum M = M - (F_{RD} * AD) - M_{fc} - M_{fD} - Vx = 0$$

$$M = Vx + (F_{RD} * AD) + M_{fc} + M_{fD}$$

Sección FG

$$\sum F_y = A_y - F_{RD} - V = 0$$

$$V = A_y - F_{RD}$$

$$V = -17,909 \text{ N}$$

$$\sum M = M - (F_{RD} * AD) - M_{fc} - M_{fD} -$$

$$M_{fE} - Vx = 0$$

$$M = Vx + (F_{RD} * AD) + M_{fc} + M_{fD} + M_{fE}$$

Sección GH

$$\sum F_y = A_y - F_{RD} - F_{RG} - V = 0$$

$$V = A_y - F_{RD} - F_{RG}$$

$$V = -131,299 \text{ N}$$

$$\sum M = M - (F_{RD} * AD) - (F_{RG} * AG) - M_{fc} - M_{fD} - M_{fE} - Vx = 0$$

$$M = Vx + (F_{RD} * AD) + (F_{RG} * AG) + M_{fc} + M_{fD} + M_{fE}$$

Sección HJ

$$\sum F_y = A_y - F_{RD} - F_{RG} - V = 0$$

$$V = A_y - F_{RD} - F_{RG}$$

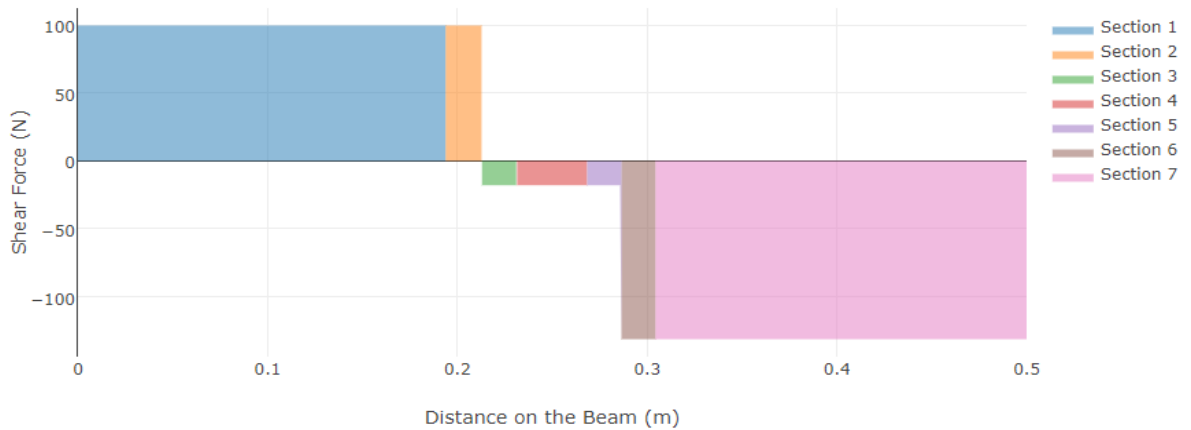
$$V = -131,299 \text{ N}$$

$$\sum M = M - (F_{RD} * AD) - (F_{RG} * AG) - M_{fC} - M_{fD} - M_{fE} - M_{fH} - Vx = 0$$

$$M = Vx + (F_{RD} * AD) + (F_{RG} * AG) + M_{fC} + M_{fD} + M_{fE} + M_{fH}$$

Punto crítico: $x = 0,381471 \text{ m}$

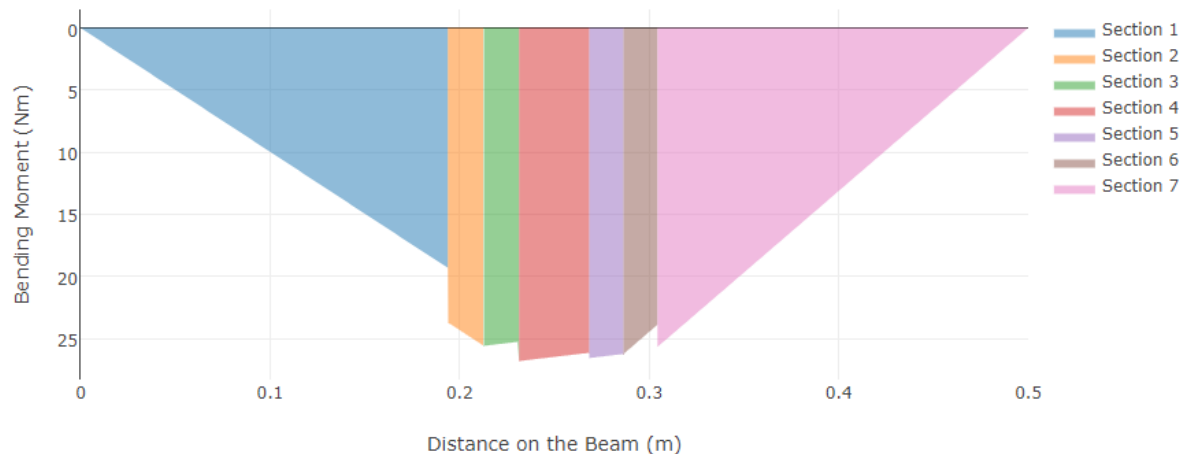
Diagrama 11. Fuerza cortante plano XY



Fuente: elaboración realizada en: VIGA Online. [en línea]. Disponible en: <http://www.viga.online/index.php>.

$$V_{m\acute{a}x} = 131.299 \text{ N}$$

Diagrama 12. Momento flector plano XY



Fuente: elaboración realizada en: VIGA Online. [en línea]. Disponible en: <http://www.viga.online/index.php>.

$$M_{m\acute{a}x} = 26,816 \text{ Nm}$$

❖ Plano XZ

Sección AC

$$\sum F_z = A_z - V = 0$$

$$V = A_z$$

$$V = 566,277 \text{ N}$$

$$\sum M = M - A_z x = 0$$

$$M = A_z x$$

Sección DE

$$\sum F_z = A_z - F_{tC} - F_{tE} - V = 0$$

$$V = A_z - F_{tC} - F_{tE}$$

$$V = -74,536 \text{ N}$$

$$\sum M = M - Vx - (F_{tC} * AC) - (F_{tE} * AE) = 0$$

$$M = Vx + (F_{tC} * AC) + (F_{tE} * AE)$$

Sección FG

$$\sum F_z = J_z + V = 0$$

$$V = -J_z$$

$$V = -320,872 \text{ N}$$

$$\sum M = -M + J_z x = 0$$

$$M = J_z x$$

Punto crítico: $x = 0,381471 \text{ m}$

Sección CD

$$\sum F_z = A_z - F_{tC} - V = 0$$

$$V = A_z - F_{tC}$$

$$V = 211,018 \text{ N}$$

$$\sum M = M - (F_{tC} * AC) - Vx = 0$$

$$M = (F_{tC} * AC) + Vx$$

Sección EF

$$\sum F_z = J_z - F_{tH} + V = 0$$

$$V = -J_z + F_{tH}$$

$$V = -528,770 \text{ N}$$

$$\sum M = -M + (F_{tH} * HJ) - J_z x = 0$$

$$M = (F_{tH} * HJ) - J_z x$$

Sección GJ

$$\sum F_z = J_z - F_{tE} - F_{tF} + V = 0$$

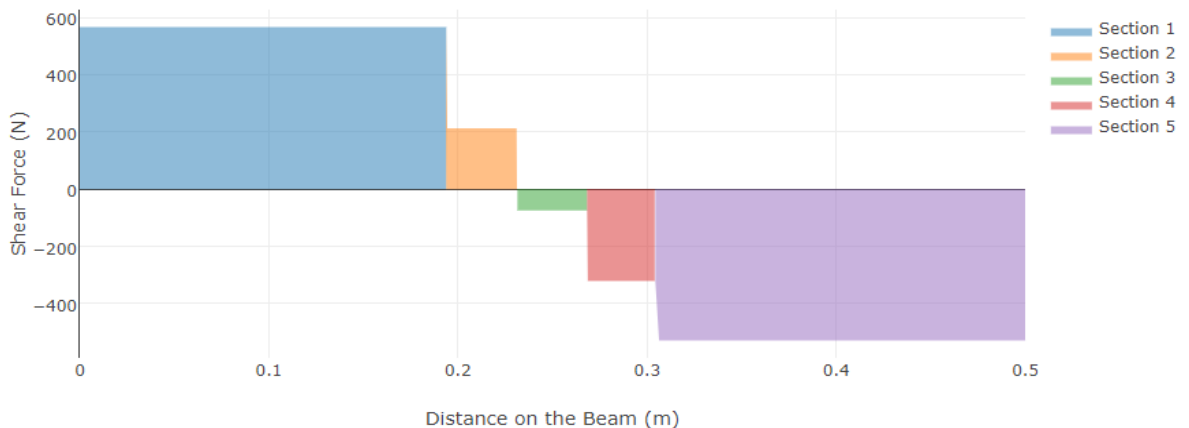
$$V = -J_z + F_{tE} + F_{tF}$$

$$V = -74,536 \text{ N}$$

$$\sum M = -M - Vx + (F_{tE} * FJ) + (F_{tH} * HJ) = 0$$

$$M = -Vx + (F_{tE} * FJ) + (F_{tH} * HJ)$$

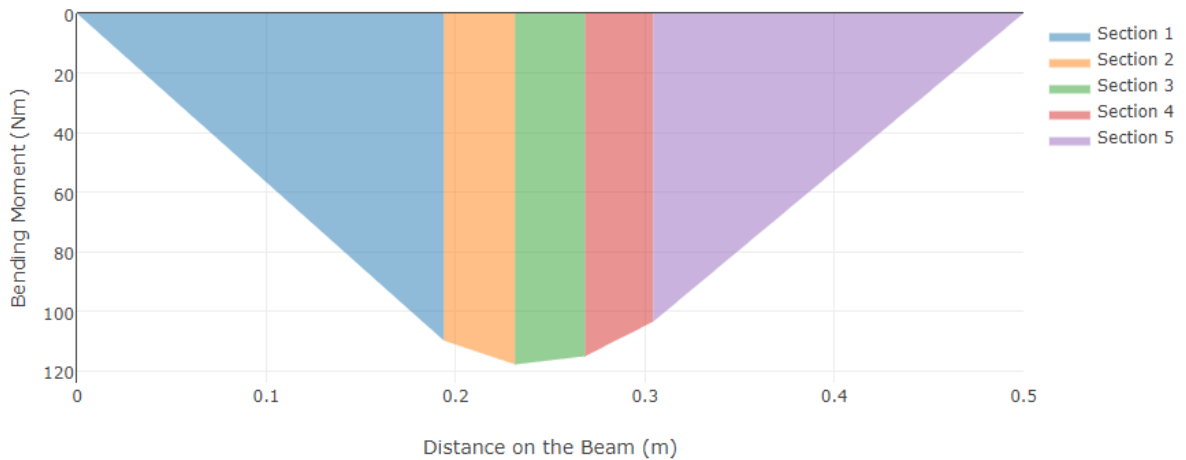
Diagrama 13. Fuerza cortante plano XZ



Fuente: elaboración realizada en: VIGA Online. [en línea]. Disponible en: <http://www.viga.online/index.php>.

$$V_{m\acute{a}x} = 566,277 \text{ N}$$

Diagrama 14. Momento cortante plano XZ



Fuente: elaboración realizada en: VIGA Online. [en línea]. Disponible en: <http://www.viga.online/index.php>.

$$M_{\text{máx}} = 117,742 \text{ Nm}$$

3.2.1.3 Selección del material para el rotor. El proceso que se genera en el interior de la turbina tiene una temperatura de trabajo alta como se ha determinado anteriormente, por tanto, es necesario que el rotor soporte dichas temperaturas sin sufrir algún daño y/o cambio en sus propiedades mecánicas, de igual manera, es indispensable que sea resistente al creep, lo cual es un fenómeno en el que un material se puede deformar debido a la influencia de presiones y temperaturas elevadas. La corrosión es otro criterio que se debe tener en cuenta ya que en turbinas de vapor se puede presentar debido a las condiciones que dicho fluido posee, sin embargo, como se describió en el capítulo 1, el R134a no es corrosivo, no obstante, las propiedades previamente mencionadas son prioridad en la selección del material.

En la construcción de turbinas es común utilizar acero AISI 4130³⁷ normalizado a 870°C, sus propiedades mecánicas cumplen con los criterios relevantes en mención debido a su composición química como se muestra a continuación:

³⁷ BLOCH, Heinz P. y SINGH, Murari P. Steam turbines : Design, applications, and rating. 2 ed. U.S.: McGraw Hill, 2009. ISBN 9780071508216.

Tabla 1. Composición química del acero AISI 4130

COMPONENTE	PORCENTAJE
Carbón	0,28 - 0,33 %
Manganeso	0,4 - 0,6 %
Cromo	0,80 - 1,10 %
Molibdeno	0,15 - 0,25 %
Silicio	0,15 - 0,35 %
Fósforo, máx.	0,035%
Azufre, máx.	0,04%

Fuente: elaboración propia, con base en ASTM International A322-13. standard specification for steel bars, alloy, standard grades. ASTM International. U.S. 2020., pp. 4 .[Consultado Abril 16, 2020]. [catálogo].

De igual manera, se debe tener en cuenta los esfuerzos del material para el cual son los siguientes:

Tabla 2. Propiedades del acero AISI 4130

PROPIEDAD	VALOR	UNIDAD
Esfuerzo último	669 // 97	MPa // KSI
Esfuerzo de fluencia	434	MPa
Modulo elástico	190	GPa
Densidad	7850	kg/m3

Fuente: elaboración propia, con base en NORTON Diseño de máquinas. 4 ed. México: Pearson Educación de México, SA de CV 2011. 888 p.ISBN 9786073205894 .

3.3.1.5 Diámetro del rotor. Para determinar el diámetro del rotor se aplica el criterio de ED-Goodman³⁸, donde en primera instancia se realizarán algunas estimaciones basados en los criterios que se explicarán en cada variable.

Ecuación 5. Diámetro del eje

$$d = \left\{ \frac{16n}{\pi} \left(\frac{2(K_f M_a)}{S_e} + \frac{[3(K_{fs} T_m)^2]^{\frac{1}{2}}}{S_{ut}} \right) \right\}^{\frac{1}{3}}$$

Fuente: BUDYNAS, Richard G. y NISBETT, J. Keith. Diseño en ingeniería mecánica de shigley. 9 ed. México, D.F: McGraw-Hill Interamericana, 2012. 1065 p.ISBN 978-607-15-0771-6.

³⁸ BUDYNAS, Richard G. y NISBETT, J. Keith. Diseño en ingeniería mecánica de shigley. 9 ed. México, D.F: McGraw-Hill Interamericana, 2012. 1065 p.ISBN 978-607-15-0771-6.

Donde:

n : Factor de seguridad

K_f : Factor de concentración del esfuerzo por fatiga

M_a : Momento flector medio

S_e : Límite de resistencia a la fatiga

K_{fS} : Factor de concentración del esfuerzo por fatiga cortante

T_m : Par de torsión medio

S_{ut} : Esfuerzo último del material

❖ Factor de seguridad. Para realizar un diseño óptimo del rotor, se ha predeterminado bajo un criterio ingenieril que el factor de seguridad sea de 1,5 de este modo garantizar que si se cumple con el propósito de diseño.

❖ Momento flector medio. Dado que en el plano XY el punto crítico es G, mientras que en el plano XZ el punto crítico es B, se debe realizar una combinación de los momentos flectores de estos puntos mediante la siguiente ecuación:

$$M_{TOT} = \sqrt{M_{\max(xy)}^2 + M_{\max(xz)}^2}$$

$$M_{TOT} = \sqrt{(64.196 Nm)^2 + (31.027 Nm)^2}$$

$$M_{TOT} = 120,757 Nm$$

❖ Par de torsión medio. El par de torsión es la sumatoria de los momentos torsores producidos por las fuerzas tangenciales.

$$T_m = 49.010 Nm$$

❖ Factores de concentración del esfuerzo por fatiga y cortante. Los factores de concentración de esfuerzo K_t y K_{tS} , se estiman mediante la siguiente tabla, y de igual manera se supone que $K_t = K_f$ y $K_{tS} = K_{fS}$.

Tabla 3. Factores de concentración de esfuerzos

	Flexión	Torsión	Axial
Filete de hombro: agudo ($r/d = 0.02$)	2.7	2.2	3.0
Filete de hombro: bien redondeado ($r/d = 0.1$)	1.7	1.5	1.9
Cuñero fresado ($r/d = 0.02$)	2.14	3.0	—
Cuñero de patín o trapezoidal	1.7	—	—
Ranura para anillo de retención	5.0	3.0	5.0

Los valores faltantes en la tabla no pueden obtenerse con facilidad.

Fuente: BUDYNAS, NISBETT Diseño en ingeniería mecánica de shigley. 9 ed. México, D.F: McGraw-Hill Interamericana 2012. 1065 p. ISBN 978-607-15-0771-6 .

$$K_t = 1.7$$

$$K_{ts} = 1.5$$

$$K_f = 1.7$$

$$K_{fs} = 1.5$$

❖ Límite de resistencia a la fatiga. El límite de resistencia a la fatiga se calcula mediante la ecuación de Marin³⁹:

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e k_f S_e'$$

Donde:

S_e : Límite de resistencia a la fatiga en la ubicación crítica de una parte de máquina en la geometría y condición de uso

k_a : Factor de modificación por la condición superficial

k_b : Factor de modificación por el tamaño

k_c : Factor de modificación por la carga

k_d : Factor de modificación por la temperatura

k_e : Factor de confiabilidad

k_f : Factor de modificación por efectos varios

S_e' : Límite de resistencia a la fatiga en viga rotatoria

Para determinar los factores se realiza una estimación según se mencionó anteriormente:

$$k_a = a S_{ut}^b$$

Tabla 4. Parámetros en el factor de la condición superficial de Marin

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

Fuente: BUDYNAS, NISBETT Diseño en ingeniería mecánica de shigley. 9 ed. México, D.F: McGraw-Hill Interamericana 2012. 1065 p.ISBN 978-607-15-0771-6 .

$$k_a = (4.51)(670)^{-0.265}$$

$$k_a = 0.804$$

$$k_c = 1$$

$$k_d = 1$$

$$k_b = 0.9$$

$$k_e = 1$$

³⁹ BUDYNAS, Richard G. y NISBETT, J. Keith. Diseño en ingeniería mecánica de shigley. 9 ed. México, D.F: McGraw-Hill Interamericana, 2012. 1065 p.ISBN 978-607-15-0771-6.

$$k_f = 1$$

$$S_e' = (0.5)(670 \text{ MPa})$$

$$S_e' = 335 \text{ MPa}$$

$$S_e = (0.793)(0.9)(335 \text{ MPa})$$

$$S_e = 242,146 \text{ MPa}$$

De este modo, aplicando la ecuación de ED-Goodman se determina el diámetro mínimo del rotor.

$$d = 0,02817 \text{ m}$$

$$d = 28,173 \text{ mm}$$

3.3.1.6 Esfuerzos

❖ Esfuerzo normal por Momento Flector

$$\sigma_{MF} = \frac{Mc}{I}$$

Donde:

M: Momento flector en los cambios de sección

c: Radio del rotor

I: Momento de inercia

$$\sigma_{(XY)} = 6,37 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{(XZ)} = 27,97 \text{ MPa}$$

❖ Esfuerzo normal por Fuerza Axial

$$\sigma_{Fa} = \frac{Fa}{A}$$

Donde:

Fa: Fuerza axial

A: Área transversal del rotor

$$\sigma_{FaC} = 4556,355 \text{ Pa}$$

$$\sigma_{FaE} = 1616,928 \text{ Pa}$$

$$\sigma_{FaF} = 436,568 \text{ Pa}$$

$$\sigma_{FaH} = 1854,994 \text{ Pa}$$

❖ Esfuerzos cortantes por Torque

$$\tau = \frac{Tc}{J}$$

Donde:

T: Torque

c: Radio del rotor

J: Momento polar de inercia

$$\tau = 37,722 \text{ MPa}$$

❖ Esfuerzos combinados

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

Donde:

V: Fuerza córtate máxima en el punto crítico

A: Área transversal del rotor

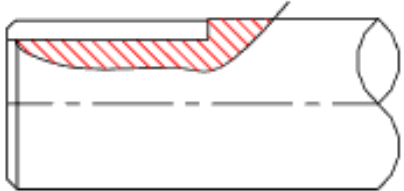
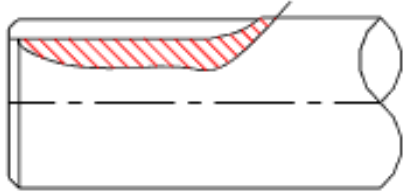
$$\tau_{(XY)} = 0,136 \text{ MPa}$$

$$\tau_{(XY)} = 0,589 \text{ MPa}$$

3.3.1.7 Concentradores de esfuerzo. Anteriormente se ha calculado el diámetro mínimo de trabajo, sin embargo, teniendo en cuenta un valor porcentual de seguridad, se ha establecido que el diámetro de diseño será de 25mm, por tanto, con este valor se realizarán los cálculos para el diseño del rotor, basado en el diseño de elementos mecánicos de Shigley⁴⁰.

Mediante la gráfica obtenida en Stress Concentration Factors, se obtienen los factores de Kf y Kfs, es decir, el factor en flexión y torsión.

Gráfica 1. Factor geométrico de concentración de esfuerzos Kt para un eje con filete de hombro en flexión.

	Stress Concentration Factor K_f	
	Bending	Torsion
	Annealed	1,6
	Quenched & Drawn	2,0
	Annealed	1,3
	Quenched & Drawn	1,6

Fuente: BI et al. Peterson's stress concentration factors. 3 ed. US: John Wiley & Sons, Incorporated 2007. 555 p.ISBN 1119532515 .

❖ Flexión

$$K_f = 1.319$$

❖ Torsión

$$K_{fs} = 1.238$$

⁴⁰ BUDYNAS, Richard G. y NISBETT, J. Keith. Diseño en ingeniería mecánica de shigley. 9 ed. México, D.F: McGraw-Hill Interamericana, 2012. 1065 p.ISBN 978-607-15-0771-6.

❖ Esfuerzos máximos

Esfuerzo normal máximo

$$\sigma_{m\acute{a}x(XY)} = \sigma_G K_f$$

$$\sigma_{m\acute{a}x(XY)} = 12,741 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{m\acute{a}x(XZ)} = \sigma_G K_f$$

$$\sigma_{m\acute{a}x(XZ)} = 55,944 \text{ MPa}$$

Esfuerzo cortante máximo

$$\tau_{m\acute{a}x} = \tau K_f$$

$$\tau_{m\acute{a}x} = 60,355 \text{ MPa}$$

❖ Límite de resistencia a la fatiga. Se aplica la ecuación de Marin para determinar el límite de resistencia a la fatiga como se realizó anteriormente, teniendo en cuenta que en esta ocasión los factores k , se calculan como lo indica la literatura de Shigley⁴¹.

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e k_f S'_e$$

Factor de modificación por la condición superficial

El factor k_a , se determina mediante: $k_a = a S_{ut}^b$, como se halló anteriormente, este resultado no cambio puesto que depende del material.

$$a = 4.51$$

$$b = -0.265$$

$$k_a = (4.51)(670)^{-0.265}$$

$$k_a = 0,804$$

Factor de modificación por el tamaño

Tabla 5. Factor de tamaño

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

Fuente: BUDYNAS, NISBETT Diseño en ingeniería mecánica de shigley. 9 ed. México, D.F: McGraw-Hill Interamericana 2012. 1065 p.ISBN 978-607-15-0771-6 .

⁴¹ BUDYNAS, Richard G. y NISBETT, J. Keith. Diseño en ingeniería mecánica de shigley. 9 ed. México, D.F: McGraw-Hill Interamericana, 2012. 1065 p.ISBN 978-607-15-0771-6.

$$K_b = \left(\frac{d}{7,62}\right)^{-0.107}$$

$$K_b = \left(\frac{35}{7,62}\right)^{-0.107}$$

$$K_b = 0,849$$

Factor de modificación por la carga

Tabla 6. Factor por tipo de carga

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

Fuente: BUDYNAS, NISBETT Diseño en ingeniería mecánica de shigley. 9 ed. México, D.F: McGraw-Hill Interamericana 2012. 1065 p.ISBN 978-607-15-0771-6 .

En el rotor se presentan los tres tipos de carga, entonces se toma el valor que afecte más la resistencia a la fatiga.

$$K_c = 0.59$$

Factor de modificación por la temperatura

$$K_d = 0.975 + 0.432(10^{-3})T_f - 0.115(10^{-5})T_f^2 + 0.104(10^{-8})T_f^3 - 0.595(10^{-12})T_f^4$$

$T_f = 234.5 \text{ }^\circ\text{F}$ Temperatura promedio dentro del sistema

$$K_d = 1,025$$

Factor de confiabilidad

Tabla 7. Factor de confiabilidad

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

Fuente: BUDYNAS, NISBETT Diseño en ingeniería mecánica de shigley. 9 ed. México, D.F: McGraw-Hill Interamericana 2012. 1065 p.ISBN 978-607-15-0771-6 .

$$K_e = 1 - 0.08Z_a$$

$$Z_a = 1.645$$

$$K_e = 0,868$$

Factor de modificación por efectos varios

Este factor varía entre 0.24 y 0.90⁴², dado que estos factores no influyen de gran manera en la resistencia del rotor, se toma 0.90

$$K_f = 0,90$$

Límite de resistencia a la fatiga en viga rotatoria

Tabla 8. Límite de resistencia a la fatiga en viga rotatoria

$$S'_e = \begin{cases} 0.5S_{ut} & S_{ut} \leq 200 \text{ kpsi (1 400 MPa)} \\ 100 \text{ kpsi} & S_{ut} > 200 \text{ kpsi} \\ 700 \text{ MPa} & S_{ut} > 1 400 \text{ MPa} \end{cases}$$

Fuente: BUDYNAS, NISBETT Diseño en ingeniería mecánica de shigley. 9 ed. México, D.F: McGraw-Hill Interamericana 2012. 1065 p.ISBN 978-607-15-0771-6 .

$$S'_e = (0.5)(670 \text{ MPa})$$

$$S'_e = 334,5 \text{ MPa}$$

Obteniendo estos valores se puede calcular el límite de resistencia a la fatiga en la ubicación crítica de una parte de máquina en la geometría y condición de uso.

$$S_e = (0,804)(0,804)(0,59)(1,025)(0,868)(0,9)(334,5 \text{ MPa})$$

$$S_e = 108 \text{ MPa}$$

❖ Número de ciclos

El número de ciclos se describe mediante la ecuación:

$$N = \left(\frac{\sigma_{max}}{a} \right)^{1/b}$$

Donde:

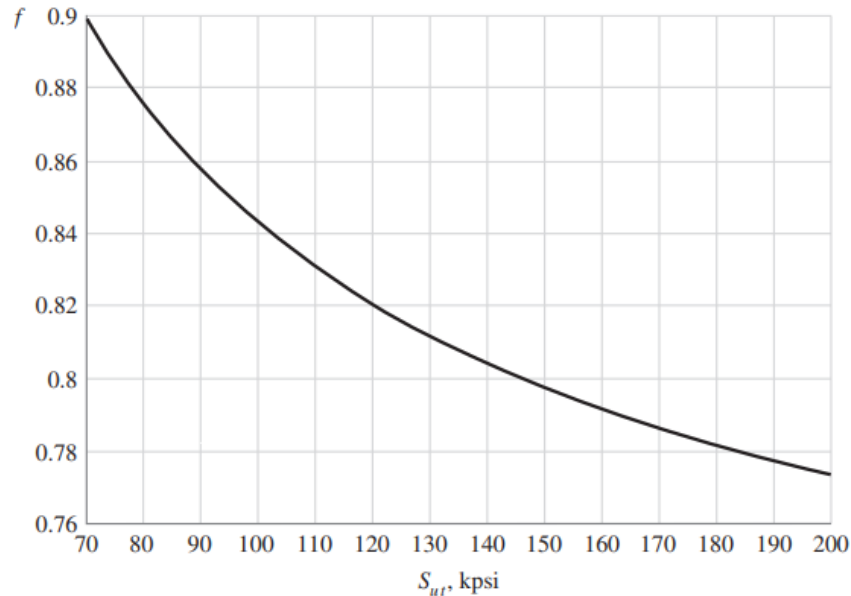
$$a = \frac{(f S_{ut})^2}{S_e}$$

$$b = -\frac{1}{3} \log \left(\frac{f S_{ut}}{S_e} \right)$$

⁴² BUDYNAS, Richard G. y NISBETT, J. Keith. Diseño en ingeniería mecánica de shigley. 9 ed. México, D.F: McGraw-Hill Interamericana, 2012. 1065 p.ISBN 978-607-15-0771-6.

El coeficiente f hace referencia a la fracción de resistencia a la fatiga, el cual se obtiene mediante la siguiente gráfica.

Gráfica 2. Fracción de resistencia a la fatiga



Fuente: BUDYNAS, NISBETT Diseño en ingeniería mecánica de shigley. 9 ed. México, D.F: McGraw-Hill Interamericana 2012. 1065 p.ISBN 978-607-15-0771-6 .

Teniendo en cuenta que el esfuerzo último debe ser en unidades de KSI, se obtiene que $f = 0,84$.

$$a = \frac{((0,84)(669 \text{ MPa}))^2}{108 \text{ MPa}}$$

$$b = -\frac{1}{3} \log \left(\frac{(0,84)(669 \text{ MPa})}{108 \text{ MPa}} \right)$$

$$a = 2924,293$$

$$b = -0.239$$

El número de ciclos se debe calcular en los dos planos donde se ha realizado el análisis.

$$N_{(XY)} = \left(\frac{12,74}{2924,293} \right)^{1/(-0,239)}$$

$$N_{(XY)} = \left(\frac{55,94}{2924,293} \right)^{1/(-0,239)}$$

$$N = 37,714 \times 10^9 \text{ ciclos}$$

$$N = 1,571 \times 10^7 \text{ ciclos}$$

❖ Teoría de falla. La ecuación de ED-Goodman, vista de otro modo se describe de la siguiente manera con el fin de garantizar el factor de seguridad que cumpla con el objetivo de diseño.

Ecuación 6. Factor de seguridad

$$\frac{1}{n} = \frac{16}{\pi d^3} \left\{ \frac{1}{S_e} \left[4(K_f M_a)^2 \right]^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{S_{ut}} \left[3(K_{fs} T_m)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}$$

Fuente: BUDYNAS, Richard G. y NISBETT, J. Keith. Diseño en ingeniería mecánica de shigley. 9 ed. México, D.F: McGraw-Hill Interamericana, 2012. 1065 p. ISBN 978-607-15-0771-6.

$$\frac{1}{n} = \frac{16}{\pi(0,35)^3} \left\{ \frac{1}{108 \times 10^6} \left[4((1,319)(120,76))^2 \right]^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{670 \times 10^6} \left[3((1,238)(317,563))^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}$$

$$\frac{1}{n} = 0,688$$

$$n = 1,454$$

❖ Análisis a la fluencia

Ecuación 7. Factor de seguridad por fluencia

$$n_y = \frac{S_y}{\sigma'_a + \sigma'_m}$$

Fuente: BUDYNAS, Richard G. y NISBETT, J. Keith. Diseño en ingeniería mecánica de shigley. 9 ed. México, D.F: McGraw-Hill Interamericana, 2012. 1065 p. ISBN 978-607-15-0771-6.

Donde:

$$\sigma'_a = \frac{32 K_f M_a}{\pi d^3}$$

$$\sigma'_m = \left[3 \left(\frac{16 K_{fs} T_m}{\pi d^3} \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$\sigma'_a = \frac{32 (2,0)(120,76)}{\pi (0,035)^3}$$

$$\sigma'_m = \left[3 \left(\frac{16 (1,6)(317,56)}{\pi (0,035)^3} \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$\sigma'_a = 57,38 \text{ MPa}$$

$$\sigma'_m = 104,54 \text{ MPa}$$

$$n_y = \frac{434 \text{ MPa}}{(57,38 + 104,54) \text{ MPa}}$$

$$n_y = 2,68$$

3.3.1.8 Análisis dinámico

Por medio del análisis dinámico se busca evaluar la velocidad y aceleración angular del rotor y el tiempo en el que duraría en llegar a una velocidad constante.

❖ Aceleración angular

$$\sum \tau = \sum F_T * r_m$$

$$\sum \tau = I \alpha$$

$$\sum \tau = I * \left(\frac{\alpha}{r_m} \right)$$

$$\alpha = \frac{2 * \sum F_T}{m}$$

$$\alpha = \frac{2 * 1095,047 \text{ N}}{23,548 \text{ kg}}$$

$$\alpha = 93,0076 \text{ m/s}^2$$

$$\sum F_T = \frac{1}{2} m r_m^2 * \left(\frac{\alpha}{r_m^2} \right)$$

$$\sum F_T = \frac{1}{2} m * \alpha$$

$$\alpha = \frac{\alpha}{r_m}$$

$$\alpha = \frac{93,008 \text{ m/s}^2}{0,29 \text{ m}}$$

$$\alpha = 320,716 \text{ rad/s}^2$$

❖ Velocidad angular

$$V_b = \omega r_m$$

$$\omega = \frac{V_b}{r_m}$$

$$\omega = \frac{193,06 \text{ m/s}^2}{0,29 \text{ m}}$$

$$\omega = 665,713 \text{ rad/s}^2$$

$$\omega = 6357,09 \text{ rpm}$$

❖ Tiempo de arranque

$$t = \frac{\omega_f - \omega_i}{\alpha}$$

$$t = \frac{665,713 \frac{\text{rad}}{\text{s}} - 0}{320,716 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2}}$$

$$t = 2,076 \text{ s}$$

3.3.1.9 Selección de rodamientos

❖ Condiciones y ambiente de operación. Los rodamientos soportan las cargas producidas por el peso de las ruedas junto con sus correspondientes álabes; para el rotor que se está diseñando se requiere un rodamiento ubicado en cada extremo de este, uno de estos debe soportar carga axial y radial simultáneamente y el otro únicamente carga radial, los dos están sometidos a la misma velocidad de rotación, trabajan a una baja temperatura y un bajo grado de contaminación.

❖ Selección de tipo de rodamiento y su configuración. Los rodamientos tienen una limitación dimensional, el diámetro interior de rodamiento es el diámetro del eje y se ha determinado de acuerdo con otros parámetros del diseño, la velocidad de rotación del eje es de 6357 RPM.

El rodamiento que previene el movimiento axial del eje con respecto al alojamiento se denomina el "rodamiento del lado fijo", y el rodamiento que permite el movimiento relativo axial, se denomina "rodamiento del lado flotante". El rodamiento del lado fijo es capaz de soportar cargas radiales y axiales, por lo tanto, su correspondiente selección debe ser capaz de contener el movimiento axial en ambas direcciones. Para el rodamiento del lado flotante, se debe seleccionar uno capaz de permitir movimiento axial, mientras soporta una carga radial⁴³. Por lo anteriormente mencionado se selecciona para el lado fijo un rodamiento rígido de bolas y para el lado flotante un rodamiento cilindro de doble pestaña.

Cargas rodamiento 1

$$\begin{aligned}F_{R(xy)} &= 99,7 \text{ N} \\F_{R(xz)} &= 566,27 \text{ N} \\F_R &= \sqrt{(99,7 \text{ N})^2 + (566,27 \text{ N})^2} \\F_R &= 574,97 \text{ N}\end{aligned}$$

Cargas rodamiento 2

$$\begin{aligned}F_{R(xy)} &= 131,29 \text{ N} \\F_{R(xz)} &= 528,77 \text{ N} \\F_R &= \sqrt{(131,29 \text{ N})^2 + (528,77 \text{ N})^2} \\F_R &= 581,29 \text{ N} \\F_a &= 28,08 \text{ N}\end{aligned}$$

❖ Selección especificaciones del rodamiento. A partir de un simulador del fabricante SKF se obtuvieron las siguientes sugerencias:

⁴³ SKF. Catálogo de rodamientos SKF. [en línea]. 2015., [Consultado mayo 01, 2020]. Disponible en: https://www.skf.com/binary/76-121486/0901d19680416953-10000_2-ES---Rolling-bearings.pdf.

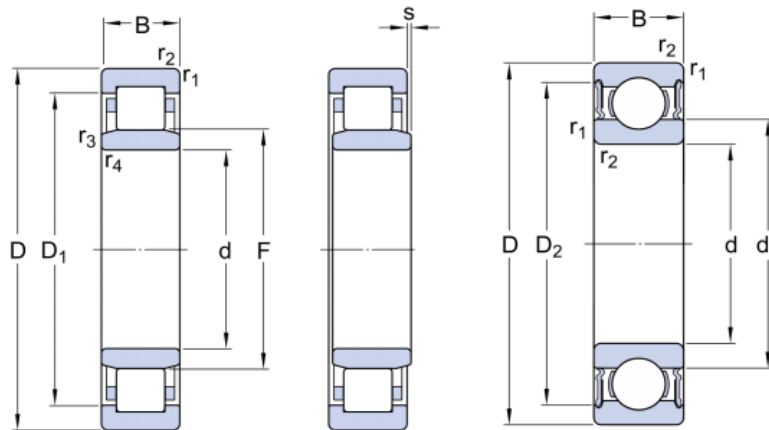
Imagen 18. Arreglo conjunto de rodamientos



Fuente: Simulador SKF. [en línea]. 2020. [Consultado junio 05, 2020]. Disponible en: <https://www.skf.com/ar/support/engineering-tools/bearing-select#cid-471444>

El rodamiento de la izquierda será un rodamiento cilindro de rodillos referencia NU207-ECJ con lubricación de grasa LGMT2 y para el lado derecho un rodamiento de bolas referencia 6207-2RS1 con lubricación por grasa MT33 del fabricante SKF.

Imagen 19. Dimensiones principales de los rodamientos seleccionados



Designation	Bearing type	Principal dimensions			Basic load ratings		Fatigue load limit
		d	D	B	Dynamic C	Static C ₀	
		mm			kN		
Left ► NU 207 ECJ	Cylindrical roller bearing	35	72	17	56	48	6.1
Right 6207-2RS1	Deep groove ball bearing	35	72	17	27	15.3	0.655

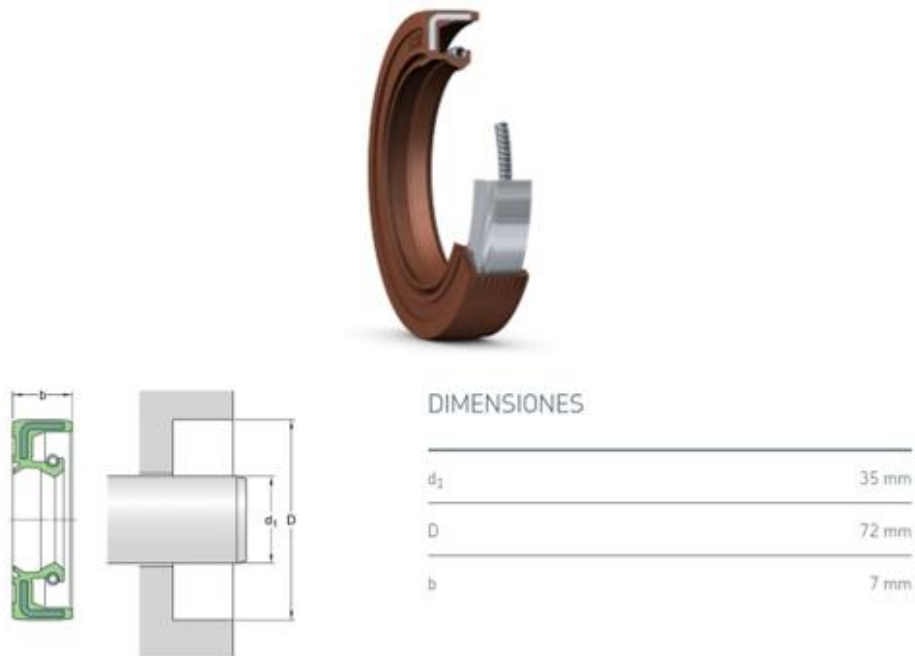
Fuente: SIMULADOR SKF. [en línea]. 2020. [Consultado junio 05, 2020]. Disponible en: <https://www.skf.com/ar/support/engineering-tools/bearing-select#cid-471444>

3.3.2 Sellos Retenedores

Siempre que un eje gira, necesita una disposición de rodamientos para operar de modo uniforme y efectivo. En todos los casos en que hay rodamientos, también existe la necesidad de proveer la solución de obturado apropiada para protegerlos, de modo que operen en forma confiable y alcancen la máxima vida de servicio. El desempeño y vida de servicio de una disposición de rodamientos está en relación directa con la capacidad de la solución de sellado para cumplir las cuatro tareas principales: Retener el medio lubricante, separa dos medios diferentes, obturar bajo presión y excluir suciedad y humedad⁴⁴.

Para el acompañamiento de los rodamientos en el rotor se seleccionan retenedores de diámetro pequeño, son los más comunes y en el rango de diámetros disponibles se encuentra el que requiere esta aplicación. Se selecciona un retenedor de grasa HMS5 en un material de caucho de Nitrilo RG, material de labio de sellado convencional, buena resistencia a la mayoría de los aceites y grasas con un rango de temperatura de trabajo entre -20°C hasta 200°C designación 35x72x7 HMSA10V del fabricante SKF.

Imagen 20. Dimensiones del retenedor seleccionado



Fuente: SKF Retenes y soluciones en sellado SKF. REOP - Revista Española de Orientación y Psicopedagogía. [en línea]. 2011., pp. 21. Disponible en: https://www.skf.com/binary/87-133001/31.6373%2001-21%20es%20_tcm_87-133001.pdf.

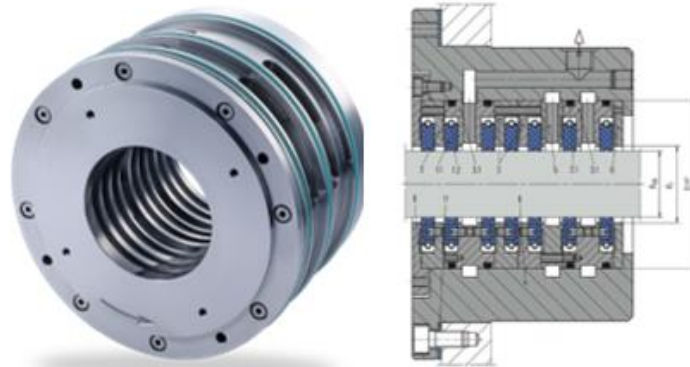
⁴⁴ SKF. Retenes y soluciones en sellado SKF. REOP - Revista Española de Orientación y Psicopedagogía. [en línea]. 2011., pp. 21. Disponible en: https://www.skf.com/binary/87-133001/31.6373%2001-21%20es%20_tcm_87-133001.pdf.

3.3.3 Sellos Laberínticos. Los sellos laberínticos son componentes que se usan para sellar la presión entre etapas o secciones de las turbinas de vapor; con este elemento se logra que las fugas sean bajas, se dispone una serie de dientes laberínticos para proporcionar un espacio libre entre el rotor y el estator de la máquina, esto producirá una caída de presión en cada espacio. El material de dichos sellos debe ser resistente al desgaste y tener compatibilidad con la temperatura y el flujo de operación⁴⁵.

Para realizar la selección del sello laberíntico se tuvo en cuenta parámetros de rango de operación y de diseño como, el diámetro del eje, presión y temperatura de funcionamiento, materiales, entre otros.

Se seleccionó un sello de cámara con designación *Espey WKA400HD* del fabricante Eagle Burgmann que cumple con todos los requerimientos anteriormente mencionados, con un funcionamiento en seco, los anillos de sellado soportan movimientos radiales del eje, compensa dichos movimientos.

Imagen 21. Sello laberíntico Espey WKA400HD



Fuente: EAGLE BURGMANN. Sello laberíntico Espey WKA400HD. [en línea]. Alemania-Colombia. [Consultado junio 6, 2020]. Disponible en: <https://www.eagleburgmann.com/en/products/carbon-floating-ring-seals/shaft-seals/espey-wka400hd>

3.3.4 Buje QD. El buje QD se utiliza para sujetar el rotor con el rodete, de este modo, se garantiza que no haya vibraciones y desgastes en las piezas, por otro lado, este buje permite montar y desmontar el rodete fácilmente y sin riesgo de golpearlo⁴⁶.

⁴⁵ FLITNEY, Robert. *Seals and sealing handbook*. 6 ed. GB: Butterworth Heinemann, 2014. ISBN 9780080994130.

⁴⁶ INTERMEC. *Catálogo de productos*. INTERMEC. [en línea]. Colombia. [Consultado Mayo 27, 2020]. Disponible en: https://www.intermec.com.co/pdf/Dimensiones_Bujes_QD.pdf.

Imagen 22. Buje QD

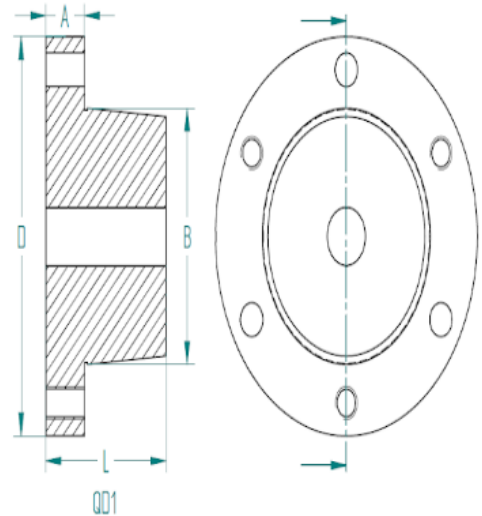


Fuente: INTERMEC Catálogo de productos. INTERMEC. [en línea]. Colombia. [Consultado Mayo 27, 2020]. Disponible en: https://www.intermec.com.co/pdf/Dimensiones_Bujes_QD.pdf.

Una vez determinado el diámetro del eje, se realiza la selección de este buje según el catálogo de Intermec⁴⁷.

Tabla 9. Características del Buje QD-SK

Referencia	QD-SK
A	14,3
B	71,6
D	98,55
L	49,2
Eje estándar	3/4"
Eje max cuñero estándar mm	55
Eje max cuñero estándar pulg	2-1/8"
Tornillos	5/16"
Diseño	QD1
Peso (kg)	-



Fuente: INTERMEC Catálogo de productos. INTERMEC. [en línea]. Colombia. [Consultado Mayo 27, 2020]. Disponible en: https://www.intermec.com.co/pdf/Dimensiones_Bujes_QD.pdf.

⁴⁷ INTERMEC. Catálogo de productos. INTERMEC. [en línea]. Colombia. [Consultado Mayo 27, 2020]. Disponible en: https://www.intermec.com.co/pdf/Dimensiones_Bujes_QD.pdf.

3.4 SISTEMA DE CONTROL

La turbina a gas refrigerante sobrecalentado necesita un sistema de control para dirigir su funcionamiento, en él se miden variables para una constante revisión y posterior intervención si se requiere, también consta de un tablero de control que permite tener visualización de la actividad y la cuantificación de las variables que se precisan. El control está dispuesto por medio de un Controlador Lógico Programable (PLC), donde se requieren cuatro entradas digitales, dos salidas digitales y una salida analógica.

Tabla 10. Conexiones PLC

ENTRADAS	TIPO	SALIDAS	TIPO
Voltímetro	D	Virador	D
Tacómetro	D	Válvula de alivio	D
Presostato	D	Válvula regulación	A
Proxímetro	D		
Interruptor Encendido	D		
Interruptor Virador	D		

Fuente: elaboración propia.

Se selecciona un Controlador Modular SIMATIC S7-1200 de SIEMENS para tareas de automatización simples pero muy precisas, lo más importante es que cumple con las entradas y salidas del tipo que requiere el sistema de control.

Imagen 23. PLC Seleccionado SIMATIC S7-1200, Siemens

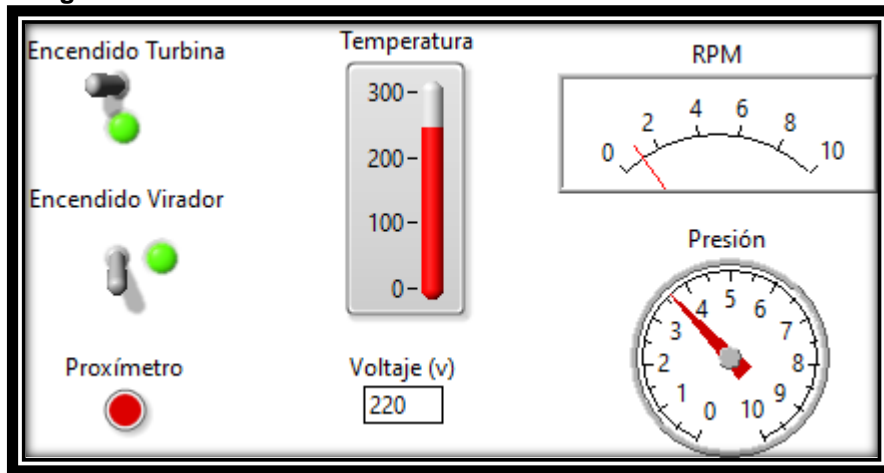


Fuente: SIEMENS. SIMATIC S7-1200. [en línea]. [Consultado junio 5, 2020]. Disponible en: <https://new.siemens.com/global/en/products/automation/systems/industrial/plc/s7-1200.html>

3.4.1 Tablero de control. Teniendo en cuenta las variables establecidas anteriormente que se pretenden controlar, se establece un tablero de control que permita la visualización de estas, en donde se tiene:

- Voltímetro
- Tacómetro
- Termómetro
- Manómetro
- Proxímetro
- Interruptor turbina
- Luz y ON-OFF turbina
- Luz y ON-OFF virador

Imagen 24. Tablero de control



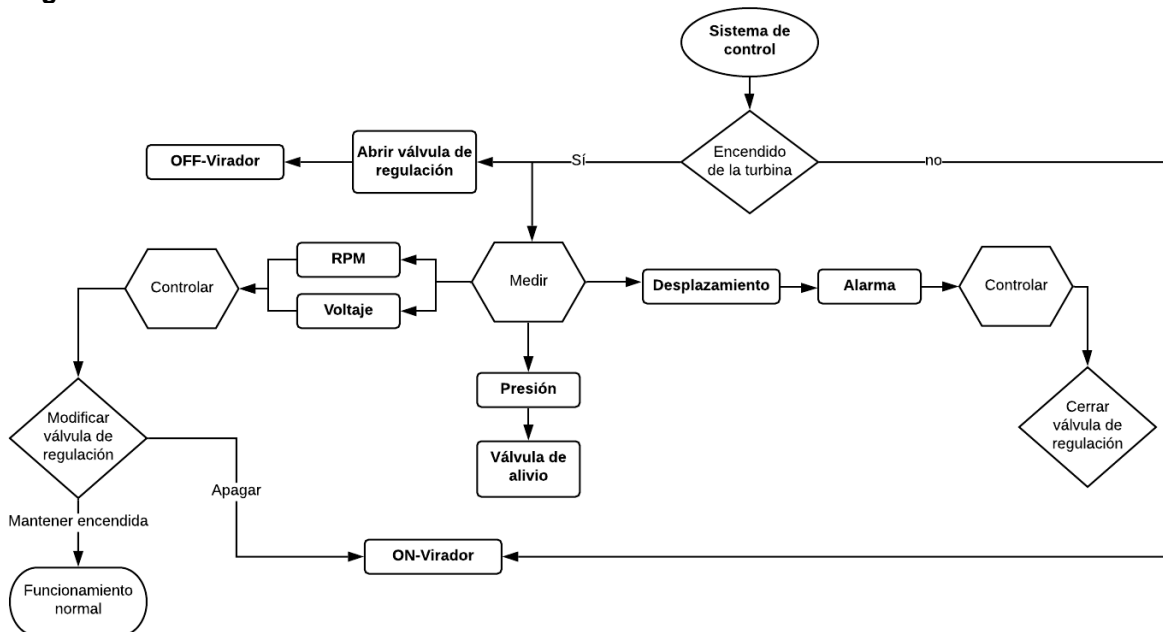
Fuente: elaboración propia

Variables para controlar

- **Voltaje:** Por medio de un voltímetro se busca garantizar el voltaje que se le entrega al generador, si el voltaje disminuye o aumenta significativamente se debe regular el paso de fluido por medio de la válvula de regulación.
- **RPM:** Las revoluciones del rotor se miden a través de un tacómetro y se busca saber si dicho valor es el requerido por el generador, de no ser así se debe regular el paso de fluido ya sea aumentarlo o disminuirlo según sea el caso.
- **Temperatura:** Por medio de una termocupla se mide constantemente la temperatura de trabajo en la entrada y en la salida de la turbina garantizando que esté trabajando en su rango normal, si la temperatura es inferior a la adecuada no se obtendrá el torque requerido y si por el contrario es superior los componentes que hacen parte de la turbina, lubricantes y materiales pueden verse afectados.

- Presión: La presión es una variable que va ligada a la temperatura, al no estar en un rango normal se verá afectada también dicha variable, si la presión es baja se deberá analizar la causa y si la presión es más alta de lo normal se activará una válvula de alivio normalizando dicha presión.
- Desplazamiento axial: Por medio de un proxímetro se busca medir el desplazamiento axial del rotor, es una variable muy importante ya que si se evidencia un desplazamiento significativo se debe parar el funcionamiento de la turbina, de no ser así se podrían chocar los álabes y verse afectador los componentes internos de la máquina.

Diagrama 15. Sistema de control

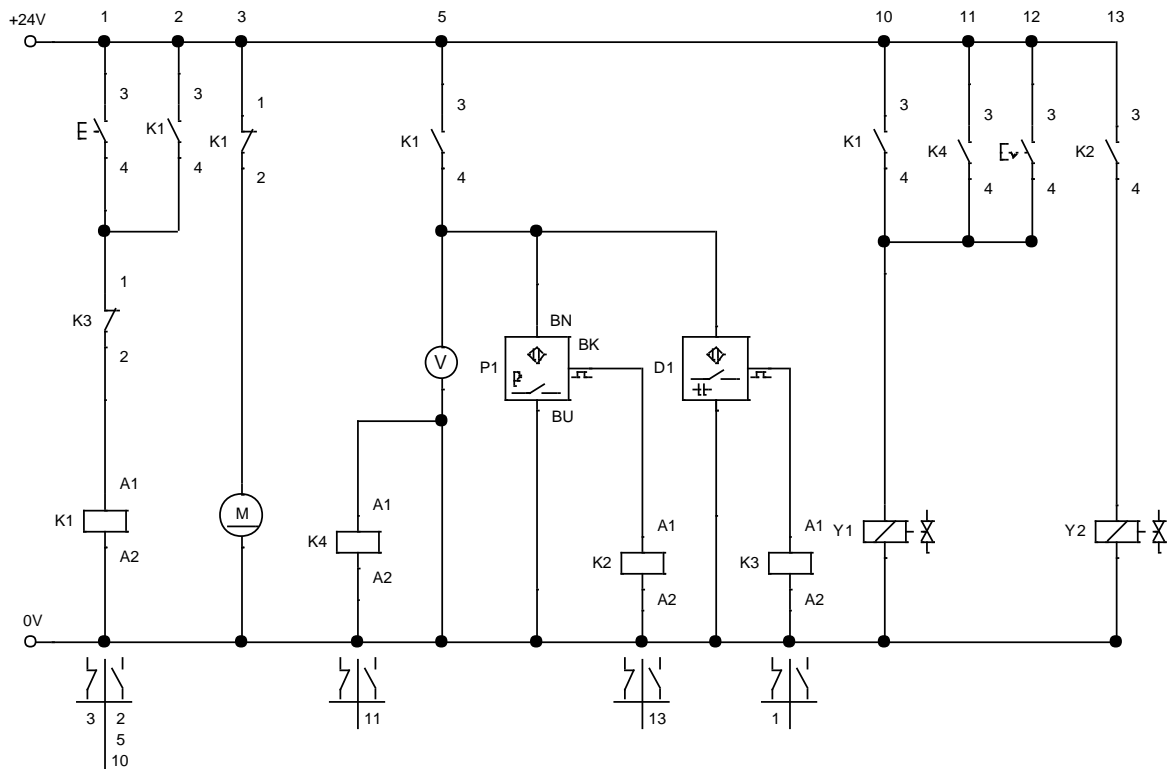


Fuente: elaboración propia

3.4.2 Plano eléctrico del sistema de control. En el diagrama 16, se muestra mediante un plano las conexiones eléctricas de los componentes del sistema de control de la siguiente manera: Los elementos nombrados por la letra “K” hacen referencia a los relés y a los contactos que estos manejan; el elemento con la letra “M” hace referencia al virador; los 3 elementos situados en la mitad del plano hacen referencia a los componentes de medición nombrados anteriormente, por restricciones del programa se tomará el elemento con la letra “V” como Voltímetro y Tacómetro, el elemento “P1” como presostato, el elemento “D1” como proxímetro y las válvulas están nombradas con la letra “Y”, para este caso Y1 será la válvula de regulación y Y2 válvula de alivio.

NOTA: Este plano es un acercamiento a las conexiones eléctricas sugeridas, sin embargo, podría tener alguna modificación teniendo en cuenta el papel que juega el virador en el funcionamiento del sistema.

Diagrama 16. Plano eléctrico del sistema de control



Fuente: elaboración propia.

3.4.3 Selección de elementos del sistema de control

- **Válvula de alivio:** Dispositivo de seguridad diseñado para proteger un sistema presurizado, en este caso en interior de la carcasa de la turbina, garantizando que no haya una sobrepresión que pueda causar alguna falla. Se seleccionó una válvula SERIE 2400 de Curtiss-Wright, trabaja para rangos de presión de 1.38 a 137.9 Bar y temperaturas de -268 a 288 °C.

Imagen 25. Válvula de alivio



Fuente: CURTIS-WRIGHT. Válvula de alivio 2400 series. [en línea]. [Consultado junio 5, 2020]. Disponible en :<https://www.cw-valvegroup.com/Products/Pressure-Relief-Valves/2400-Series-%E2%80%93-Pressure-Relief-Valve>

- Válvula de regulación: Dispositivo para regular el paso del gas refrigerante sobrecalentado proveniente del ciclo y lo dirige a las toberas de la turbina. Se seleccionó una válvula de control SERIE 4XXXCV de Curtiss-Wright, trabaja para rangos de presión de 10 a 172 Bar.

Imagen 26. Válvula de regulación



Fuente: CURTIS-WRIGHT. Válvula de regulación 4XXXCV. [en línea]. [Consultado junio 5, 2020]. Disponible en : <https://www.cw-valvegroup.com/Products/Check-Valves/Control-Valve-Steam-Conditioning-4XXXCV>

- Voltímetro: Voltímetro-amperímetro RIEL-DIN GF-100VA ideal para el monitoreo constante, de la empresa Evoltapc con las siguientes características.

Imagen 27. Voltímetro



ENTRADA / SALIDA

- Voltaje AC: 80 ~ 480 VAC
- Corriente AC: 0.1 ~ 99.9A
- Frecuencia: 47 ~ 63Hz

Fuente: EVOLTAPC. Voltímetro-amperímetro D52-2042. [en línea]. [Consultado junio 5, 2020]. Disponible en: <https://www.evoltapc.cl/otros-accesorios/2925-voltímetro-amperímetro-d52-2042-para-riel-din-80-300v.html>

- Tacómetro: Tacómetro tipo panel de 5" con referencia MP5W SERIES de la empresa Autonics con las siguientes especificaciones técnicas.

Imagen 28. Tacómetro



Model	MP5W
Power supply	100–240VAC 50/60Hz
Allowable voltage range	90 to 110% of rated voltage
Power consumption	Approx. Max. 6VA
Power for external sensor	12VDC ±10%, 80mA

Fuente: AUTONICS. Tacómetro MP5W SEIRES. [en línea]. [Consultado junio 5, 2020]. Disponible en: <https://www.industriasasociadas.com/producto/medidores-de-pulsos-tacometros-5-digitos/>

- Proxímetro: Sensor de desplazamiento, se utiliza para medir sin contacto la apertura de objetos metálicos dentro de un rango especificado.

Imagen 29. Sensor de desplazamiento



Fuente: MICRO-EPSILON, ISATECK. Sensor DT3001-U6-M-SA. [en línea]. Bogotá. [Consultado junio 9, 2020]. Disponible en: <http://www.isateck.com/>

Datos Técnicos:

Rango de trabajo sn: 3 hasta 15 mm

Principio de medición inductiva

Frecuencia máxima: 300 hz

- Manómetro: Manómetro con glicerina de 2.5 pulgadas Dial con conexión trasera en acero inoxidable Ref PPL de la marca GPL, rango de trabajo 0-600 PSI y temperatura de 0 a 60°C.

Imagen 30. Manómetro



Fuente: GPI. Manómetro PPL series. [en línea]. [Consultado junio 7, 2020]. Disponible en: <https://www.gpi-instruments.com/wp-content/uploads/2019/07/1.-Liquid-Filled-Pressure-Gauge-PPL-Series.pdf>

- Presostato: Controlador de presión presostato Ceraphant PTC31B de la marca Endress+Hauser.

Imagen 31. Presostato



Fuente: ENDRESS+HAUSER.
Presostato Ceraphant
PTC31B. [en línea].
[Consultado junio 05,
2020]. Disponible en:
<https://www.nexinstrument.com/assets/images/pdf/PTC31B.pdf>

- Termocupla: Controlador de temperatura PT-100 con las siguientes características

Imagen 32. Termocupla PT100



Fuente: SUCONEL. PT100. [en línea]. Medellín,
Colombia. [Consultado junio 9, 2020].
Disponible en:
<https://suconel.com/product/sensor-de-temperatura-rtd-pt100/>

Características:

Detector de temperatura de resistencia de platino (RTD), PT100

Con rango de temperatura desde 0°C hasta 350°C

Diámetro del bulbo: 4,8mm

Longitud útil del bulbo: 5cm

Acero inoxidable 316

Cable de extensión de 80cm, en teflón

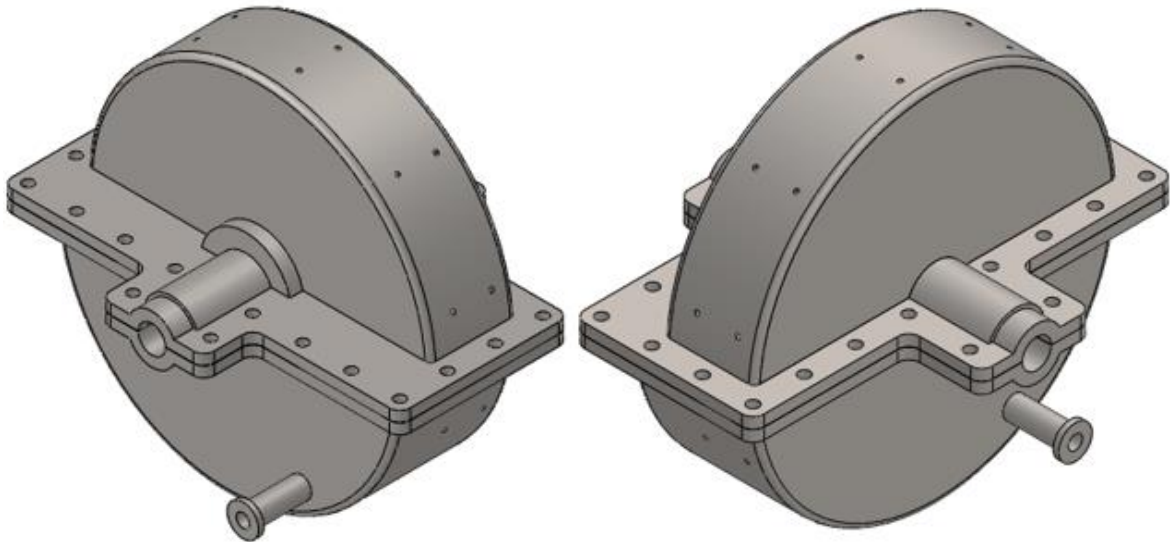
Con terminal en 3 hilos

3.5 SISTEMA ESTRUCTURAL

3.5.1 Selección del material de la carcasa. Las condiciones en el interior de la turbina son las mismas que se tuvieron en cuenta en la selección del material para el rotor, por ende, se considera mantener el tipo de material que se implementó en el diseño del anteriormente mencionado, el cual es un acero AISI 4130 normalizado a 850°C, cuyas propiedades mecánicas y composición química se mencionaron en dicha selección.

3.5.2 Carcasa. Se ha establecido un diseño de carcasa teniendo en cuenta las demás piezas y el diseño de estas, del siguiente modo:

Imagen 33. Diseño de la carcasa



Fuente: elaboración propia por medio del software SolidWorks.

Para este diseño es indispensable determinar el espesor mínimo en base a la presión interna, para lo cual se tiene en cuenta la norma ASME sección VIII división

I, Boiler and pressure vessel code⁴⁸, y el libro Diseño y cálculo de recipientes a presión⁴⁹.

El procedimiento para determinar dicho espesor se realiza en dos etapas, la primera la sección cilíndrica y posteriormente las caras planas.

❖ Sección cilíndrica. Se aplica la ecuación de espesor de carcasa bajo presión interna, la cual está dada por:

$$t = \frac{PR}{SE - 0,6P}$$

Donde:

P : Presión interna

R : Radio de la carcasa

S : Esfuerzo admisible del material: $S = \frac{S_{ut}}{3}$

E : Eficiencia de unión por soldadura: Dado que no hay soldadura $E = 1$

$$t = \frac{(3,6 \text{ MPa})(0,32 \text{ m})}{(223 \text{ MPa})(1) - 0,6(3,6 \text{ MPa})}$$

$$t = 5,2 \text{ mm}$$

Se obtiene un espesor mínimo de 5,2mm, y se establece como espesor de trabajo 6mm.

❖ Sección de paredes planas. Para determinar el espesor de las paredes planas se realiza mediante la siguiente ecuación:

$$t = d \sqrt{\frac{C'P}{SE}}$$

Donde:

d : Longitud mínima, ver imagen 33

⁴⁸ ASME Boiler and Pressure Vessel Committee. Subcommittee on Pressure Vessels. ASME boiler and pressure vessel code. section VIII, rules for construction of pressure vessels. division 1 / ASME boiler and pressure vessel committee, subcommittee on pressure vessels. The American Society of Mechanical Engineers. New York (State). 2019., pp. 796. [Consultado May 7, 2020], [catálogo].

⁴⁹ LEÓN, Juan. Diseño y cálculo de recipientes a presión. Ingeniería León. [en línea]. México. 2001., pp. 190. [Consultado Mayo 7, 2020]. Disponible en: https://www.academia.edu/7116276/Dise%C3%B1o_y_C%C3%A1lculo_de_Recipientes_a_Presi%C3%B3n.

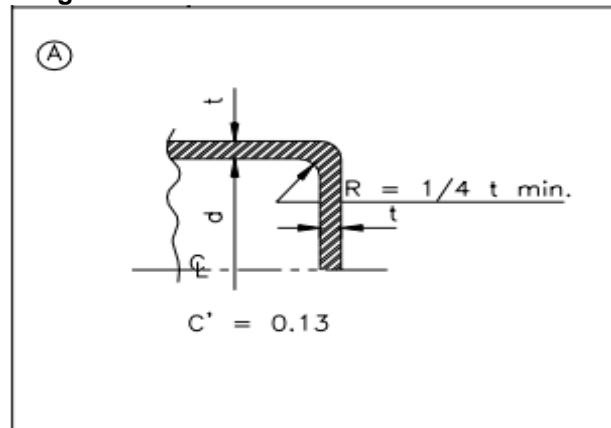
C' : Constante adimensional dependiente de la forma de unión entre la tapa y el cilindro

P : Presión interna

S : Esfuerzo admisible del material: $S = \frac{S_{ut}}{3}$

E : Eficiencia de unión por soldadura: Dado que no hay soldadura $E = 1$

Imagen 34. Valor de C'



Fuente: LEÓN Diseño y cálculo de recipientes a presión. Ingeniería León. [en línea]. México. 2001., pp. 190. [Consultado Mayo 7, 2020]. Disponible en: https://www.academia.edu/7116276/Dise%C3%B1o_y_C%C3%A1lculo_de_Recipientes_a_Presi%C3%B3n.

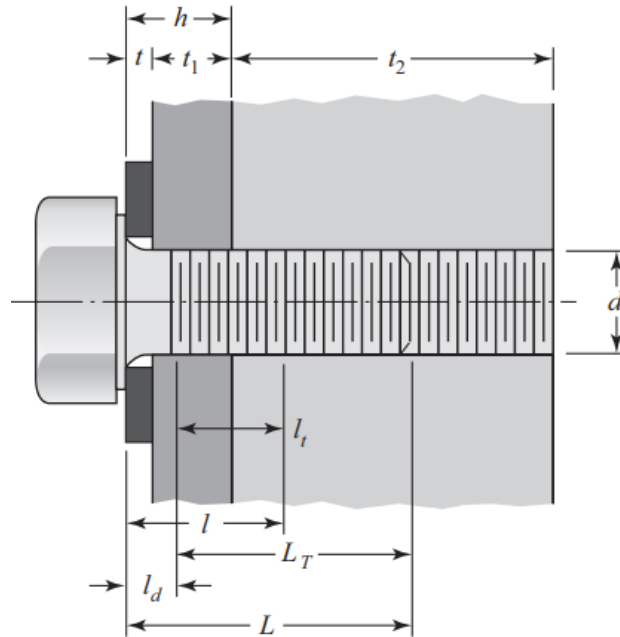
$$t = (0,046) \sqrt{\frac{(0,13)(3,6 \text{ MPa})}{(223 \text{ MPa})(1)}}$$
$$t = 1,84 \text{ mm}$$

Se obtiene un espesor mínimo de 1,84mm, y se establece como espesor de trabajo 3mm.

3.5.2.1 Pernos de sujeción. Las etapas de la carcasa se deben sujetar mediante pernos, por ende, a continuación, se realiza un análisis para determinar las dimensiones y la cantidad de este, basados en la literatura de Shigley⁵⁰ con la siguiente imagen.

⁵⁰ BUDYNAS, Richard G. y NISBETT, J. Keith. Diseño en ingeniería mecánica de shigley. 9 ed. México, D.F: McGraw-Hill Interamericana, 2012. 1065 p. ISBN 978-607-15-0771-6.

Imagen 35. Dimensiones del perno



Fuente: BUDYNAS, NISBETT Diseño en ingeniería mecánica de shigley. 9 ed. México, D.F: McGraw-Hill Interamericana 2012. 1065 p.ISBN 978-607-15-0771-6 .

Donde:

- | | |
|--|--------------------------------------|
| l : Longitud de agarre | F_i : Precarga |
| L : Longitud del sujetador | P : Fuerza de separación |
| L_T : Longitud rosca | A_d : Área de la parte sin rosca |
| k_b : Rigidez del sujetador | S_p : Resistencia de prueba mínima |
| k_m : Rigidez de los elementos | N : Número de pernos |
| C : Constante de rigidez | |
| n_L : Factor de seguridad para el perno | |
| A_d : Área de la parte rosca, tabla 8-2 de Shigley ⁵¹ | |
| l_d : Longitud de la parte sin rosca en el agarre | |
| l_t : Longitud de la parte rosca en el agarre | |

Para determinar el diámetro del perno se tiene en cuenta la siguiente ecuación en la que se puede establecer una igualdad con el fin de determinar el diámetro máximo ya que se conoce la longitud que debe tener el perno.

$$L > h + 1,5d$$

⁵¹ BUDYNAS, Richard G. y NISBETT, J. Keith. Diseño en ingeniería mecánica de shigley. 9 ed. México, D.F: McGraw-Hill Interamericana, 2012. 1065 p.ISBN 978-607-15-0771-6.

$$d = \frac{L - h}{1,5}$$

$$d = \frac{1,634 - 0,87}{1,5} = 0,522 \text{ in}$$

En vista de que 0,52 es el diámetro máximo, se establece como diámetro de trabajo 1/2", dimensión que es comprobada mediante la anterior ecuación, y en base a esto se continúa con el análisis dimensional.

$$1,634 > 1,62$$

$$L_T = 2d + 1/4 \text{ in}$$

$$L_T = 2(0,5 \text{ in}) + 1/4 \text{ in} = 1,25 \text{ in}$$

$$l = h + d/2$$

$$l = 0,87 \text{ in} + 0,5 \text{ in}/2 = 1,12 \text{ in}$$

$$A_d = \frac{\pi}{4} d^2 = \frac{\pi}{4} (0,5)^2 = 0,196 \text{ in}^2$$

$$l_d = L - L_T$$

$$l_d = 1,654 \text{ in} - 1,25 \text{ in} = 0,404 \text{ in}$$

$$l_t = l - l_d$$

$$l_t = 1,12 \text{ in} - 0,404 \text{ in} = 0,717 \text{ in}$$

$$A_t = 0,1419 \text{ para el perno de } 1/2''$$

$$k_b = \frac{A_d A_t E_{\text{material perno}}}{A_d l_t + A_t l_d}$$

$$k_b = \frac{(0,196)(0,1419)(30 \text{ MPsi})}{(0,196)(0,717) + (0,1419)(0,404)} = 4,233 \text{ Mlbf/in}$$

$$k_m = \frac{0,5774 \pi d E_{\text{material carcasa}}}{2 \ln \left(5 \frac{0,5774 l + 0,5 d}{0,5774 l + 2,5 d} \right)}$$

$$k_m = \frac{0,5774 \pi (0,5)(28 \text{ MSI})}{2 \ln \left(5 \frac{0,5774 (1,12) + 0,5 (0,5)}{0,5774 (1,12) + 2,5 (0,5)} \right)} = 14,760 \text{ Mlbf/in}$$

$$C = \frac{k_b}{k_b + k_m} = \frac{4,223}{4,223 + 14,760} = 0,222$$

$$F_i = 0,75 A_t S_p$$

$$F = (3600 Pa)(0.26 m^2) = 13846,154 N$$

$$F_i = 0,75 (0,1419)(85 KSI) = 8,443 KIP$$

$$F = 3,113 KIP$$

$$F = PA$$

$$N = \frac{C n_L F}{S_p A_t - F_i}$$

$$N = \frac{(0,222)(2)(3,113)}{(85)(0,1419) - (8,443)} = 0,383 \text{ pernos}$$

Como se puede observar el número de pernos obtenido es pequeño para el tipo de sujeción que se requiere, por ende, se replica este análisis con diámetros de pernos inferiores.

Cuadro 14. Números de pernos según diámetro

DIÁMETRO DEL PERNO	NÚMERO DE PERNOS
3/8"	0,7
1/4"	1,5
0,216 in	1,9

Fuente: elaboración propia.

Disminuyendo el diámetro del perno aumenta la cantidad de pernos, sin embargo, no es un incremento significativo para la sujeción requerida, de este modo se mantiene el diámetro inicial de 1/2" y se coloca un número de pernos acorde.

3.5.3 SOPORTES

Los soportes de la turbina están diseñados en láminas soldadas de acero 4130 con un espesor de 1/4", y están sujetas por medio de tornillos a la carcasa de la turbina y a la superficie donde está apoyada. Es importante prestar atención a la geometría de la soldadura y al tamaño, con el fin de que el diseño sea óptimo y soporte las cargas aplicadas.

Para el análisis de estos soportes, se refiere a la literatura de Norton⁵², donde se debe tener en cuenta que la fuerza aplicada en los soportes más representativa es el peso mismo de la turbina, esa fuerza equivale aproximadamente a 250 kg y está aplicada a compresión. Se utiliza un electrodo de material con resistencia semejante a la del material, el Acero 4140 tiene una resistencia a la tensión de 560 MPa y por esto se selecciona según la Tabla 12-1 de la literatura de Norton, el electrodo E110XX, como se observa a continuación:

⁵² NORTON, Robert. Diseño de máquinas. 4 ed. México: Pearson Educación de México, SA de CV, 2011. 888 p. ISBN 9786073205894.

Tabla 11. Tipo de electrodo

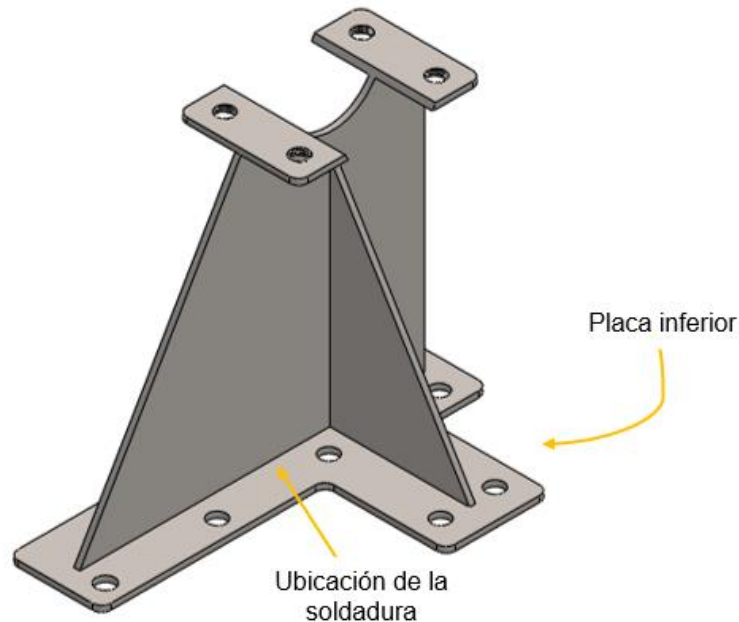
Tabla 12-1 Factores de seguridad contra falla estática cuando se utiliza la ecuación 12.1^[6]

Como los reportó la Testing Engineers, Inc., 1968

Metal base	Clase del electrodo	Factores de seguridad cuando se aplica un esfuerzo en el área de la garganta igual a 0.3 de la resistencia a la tensión del electrodo			
		Soldaduras longitudinales		Soldaduras transversales	
		Promedio	Mínimo	Promedio	Mínimo
A36	E60xx	2.88	2.67	—	—
A441	E70xx	2.95	2.67	4.62	4.06
A514	E110xx	2.41	2.21	3.48	3.30

Fuente: NORTON Diseño de máquinas. 4 ed. México: Pearson Educación de México, SA de CV 2011. 888 p.ISBN 9786073205894 .

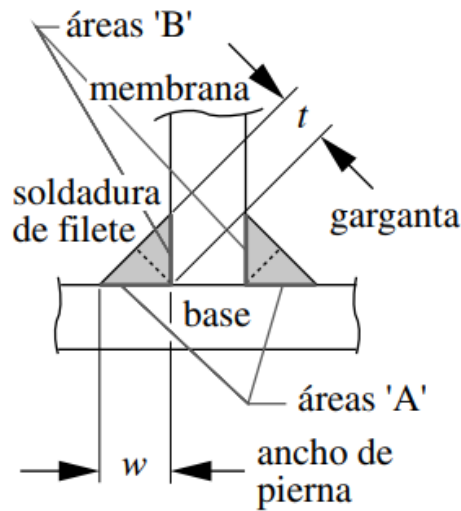
Imagen 36. Placa inferior del soporte



Fuente: elaboración propia por medio del software SolidWorks.

Para la parte inferior de la placa mostrada en la imagen anterior se calcula la resistencia permisible con base en el 30% del valor EXX del electrodo seleccionado, se calcula el área cortante necesaria en la garganta (t) para limitar el esfuerzo a ese valor y una vez se determine la dimensión de la garganta se calcula el ancho de pierna (w).

Imagen 37. Dimensiones de una soldadura en filete



Fuente: NORTON Diseño de máquinas. 4 ed. México: Pearson Educación de México, SA de CV 2011. 888 p. ISBN 9786073205894 .

$$\tau_{\text{permisible}} = 0,30EXX$$

$$\tau_{\text{permisible}} = 0,30 (110) = 33\text{KSI}$$

$$A_{\text{cortante}} = \frac{P}{\tau_{\text{permisible}}}$$

$$A_{\text{cortante}} = \frac{275,578 \text{ lb}}{33000 \text{ PSI}} = 8,35 \times 10^{-3} \text{ in}^2$$

$$t = \frac{A_{\text{cortante}}}{2L}$$

$$t = \frac{8,35 \times 10^{-3} \text{ in}^2}{2 (14,1657 \text{ in})} = 2,95 \times 10^{-4} \text{ in}$$

$$w = \frac{t}{\cos 45^\circ}$$

$$w = \frac{2,95 \times 10^{-4} \text{ in}}{0,707} = 4,17 \times 10^{-4} \text{ in}$$

En caso de que el ancho de pierna (w) sea menor al mínimo recomendado para ese espesor se tomará el indicado según la Tabla 12-2 de la literatura de Norton⁵³, donde indica que si el espesor del metal base T está entre $T \leq \frac{1}{4}$ el tamaño mínimo de soldadura es $w = \frac{1}{8} \text{ in}$.

$$\tau_{xy} = \frac{P}{A_{\text{fusión}}} = \frac{P}{2LW}$$

⁵³ NORTON, Robert. Diseño de máquinas. 4 ed. México: Pearson Educación de México, SA de CV, 2011. 888 p. ISBN 9786073205894.

$$\tau_{xy} = \frac{275,578 \text{ lb}}{2 (14,1657 \text{ in}) (0,125 \text{ in})}$$

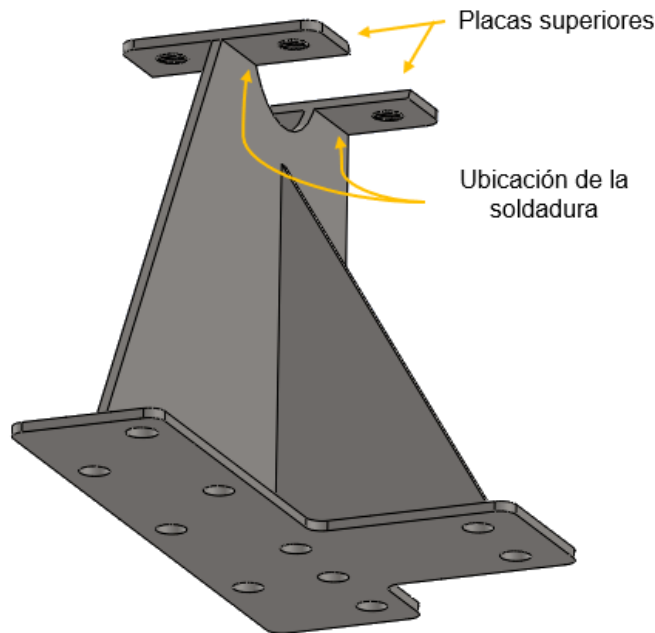
$$\tau_{xy} = 77,8 \text{ PSI}$$

$$N_{fluencia} = \frac{S_{sy}}{\tau_{xy}}$$

$$N_{fluencia} = \frac{62000 (0,577)}{77,8 \text{ PSI}} = 644$$

Esta soldadura es óptima teniendo en cuenta el factor de seguridad alto que se obtiene, debido a que las cargas a las que se somete son bajas.

Imagen 38. Placas superiores del soporte



Fuente: elaboración propia por medio del software SolidWorks.

En los cordones de las placas pequeñas mostradas en la imagen anterior se calcula la resistencia permisible con base en el 30% del valor EXX del electrodo seleccionado, se calcula el área cortante necesaria en la garganta (t) para limitar el esfuerzo a ese valor y una vez se determine la dimensión de la garganta se calcula el ancho de pierna (w). El procedimiento es el mismo que desarrolla con la placa anterior.

$$\tau_{permisible} = 0,30EXX$$

$$\tau_{permisible} = 0,30 (110) = 33 \text{ KSI}$$

$$A_{cortante} = \frac{P}{\tau_{permisible}}$$

$$A_{cortante} = \frac{137,79 \text{ lb}}{33000 \text{ PSI}} = 4.17 \times 10^{-3} \text{ in}^2$$

$$t = \frac{A_{cortante}}{2L}$$

$$t = \frac{4.17 \times 10^{-3} \text{ in}^2}{2 (14,166 \text{ in})} = 1.47 \times 10^{-4} \text{ in}$$

$$w = \frac{t}{\cos 45^\circ}$$

$$w = \frac{1,47 \times 10^{-4} \text{ in}}{0,707} = 2,47 \times 10^{-4} \text{ in}$$

$$\tau_{xy} = \frac{P}{A_{\text{fusión}}} = \frac{P}{2Lw}$$

$$\tau_{xy} = \frac{137,79 \text{ lb}}{2 (14,166 \text{ in})(0,125 \text{ in})} = 461,4 \text{ PSI}$$

$$N_{\text{fluencia}} = \frac{S_{sy}}{\tau_{xy}}$$

$$N_{\text{fluencia}} = \frac{62000(0,577)}{461,4 \text{ PSI}} = 78$$

Esta soldadura es óptima teniendo en cuenta el factor de seguridad alto que se obtiene, debido a que las cargas a las que se somete son bajas.

3.5.3.1 Pandeo local a compresión. El pandeo local es una inestabilidad lateral que se presenta en un elemento estructural, en este caso la lámina de Acero 4130 cuando se aplica una carga a compresión.

$$L = 14,1657 \text{ in}$$

$$K = 1$$

$$F_y = 62 \text{ ksi}$$

$$\text{Relación de esbeltez} = \frac{KL}{r}$$

$$A = bh = 7,75 \text{ in} * 0,25 \text{ in} = 1,9389 \text{ in}^2$$

$$I_x = \frac{bh^3}{12} = \frac{7,75 * 0,25^3}{12} = 0,01009 \text{ in}^4$$

$$r_x = \sqrt{\frac{0,01009 \text{ in}^4}{1,9389 \text{ in}^2}} = 0,07217 \text{ in}$$

$$\text{Relación de esbeltez} = \frac{1 * 14,1657 \text{ in}}{0,07217 \text{ in}} = 153,83$$

153,83 < 200 Se cumple

La relación de esbeltez está relacionada con el radio de giro del perfil de la placa, en este caso se toma el radio de giro en x debido a que es el más pequeño. Se verifica que la relación de esbeltez del perfil seleccionado sea menor a 200, este es un factor recomendado por las normas de construcción de acero que garantiza la baja probabilidad de pandeo y colapso plástico.

$$4,71 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 4,71 \sqrt{\frac{29732 \text{ PSI}}{62 \text{ KSI}}} = 103,1435$$

153 > 103 *Se cumple*

Se realiza otra verificación con el término anterior donde se quiere garantizar que dicho valor sea menor a la relación de esbeltez, para seleccionar la ecuación con la que se obtendrá la fuerza crítica F_{cr} que garantizará que no habrá pandeo.

$$F_{cr} = 0,877F_e$$

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{KL}{r}\right)^2}$$

$$F_e = \frac{\pi^2 * 29732 \text{ PSI}}{\left(\frac{1 * 14,1657 \text{ in}}{0,07217 \text{ in}}\right)^2} = 12,53 \text{ KSI}$$

$$F_{cr} = (0,877)(12,53 \text{ KSI})$$

$$F_{cr} = 10,99 \text{ KSI}$$

Para calcular el espesor mínimo de la placa se lleva al límite la relación de esbeltez, así que siendo la relación igual a 200 el espesor mínimo sería de 4.88mm. Sin embargo, por motivos de medidas comerciales el espesor será de ¼ in.

3.6 SISTEMA DE GENERACIÓN

3.6.3 Generador eléctrico. El generador es el componente que se encarga de la transformación de la energía mecánica recibida por el rotor en energía eléctrica útil, y va acoplado al eje de la turbina. Para realizar la selección se debe tener en cuenta las revoluciones y la potencia generada en la turbina teniendo en cuenta los resultados obtenidos.

$$P = T\omega$$

$$P = (317,563 \text{ Nm})(665,71 \text{ rad/s})$$

$$P = 211,41 \text{ kW}$$

En base a lo anterior y los parámetros dados en los cálculos realizados, se selecciona un generador modelo SZN314 del fabricante SUNZONE, cuyas características son: Salida de corriente alterna trifásica, voltaje 220/440 V, energía tasada 200-230kW.

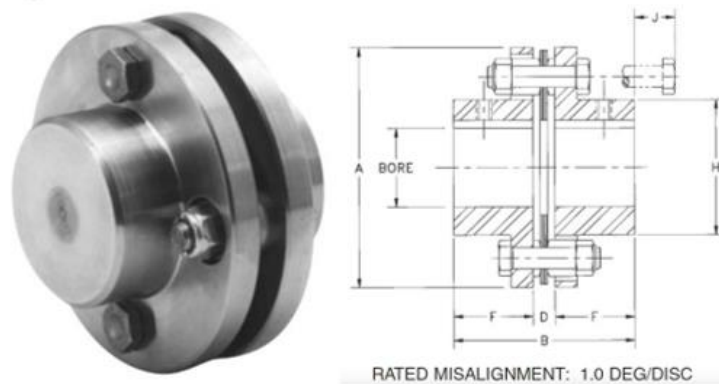
Imagen 39. Generador Tianyi



Fuente: SUNZONE. Generador SZN314. [en línea]. [Consultado junio 7, 2020]. Disponible en: <https://spanish.alibaba.com/product-detail/generator-220v-for-stamford-200kw-250kva-ac-alternator-with-ce-iso-62177532032.html?spm=a2700.galleryofferlist.0.0.1a7e3df10NyzUh>

Acople del generador. El acople que se utilizará entre los ejes turbina-generador y turbina- virador, es un acoplamiento flexible, conexión eje-eje, acoplamiento HUB TYPE AJ-STANDARD SIZE-15.

Imagen 40. Acople Hub Type



Fuente: TB WOOD´S. Acople Hub Type AJ-STANDARD Size 05. [en línea]. Bogotá, Colombia. [Consultado junio 9, 2010]. Disponible en: https://issuu.com/ideaspixel/docs/catalogo_tbwoods_de1db0db5fcbf6

Tabla 12. Selección del acople, catálogo TB WOOD'S

SIZE	DIMENSIONS IN INCHES*								FREE END FLOAT +/- INCH
	MAX BORE		A	B	D DBSE	F	H	J	
	AJ	AZ							
05	0.87	1.13	2.65	2.24	0.24	1.00	1.30	0.54	0.015
10	1.25	1.63	3.19	2.27	0.27	1.00	1.80	0.59	0.020
15	1.37	1.88	3.65	2.58	0.32	1.13	2.00	0.88	0.021
20	1.62	2.13	4.08	2.98	0.34	1.32	2.40	0.79	0.027
25	2.00	2.38	4.95	3.69	0.45	1.62	2.80	1.00	0.030
30	2.38	2.88	5.63	4.23	0.47	1.88	3.30	1.14	0.032
35	2.88	3.75	6.63	5.05	0.55	2.25	4.15	0.97	0.042
40	3.25	4.00	7.64	5.60	0.60	2.50	4.65	1.30	0.050

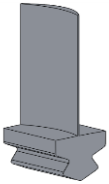

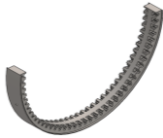



Fuente: TB WOOD'S. Acople Hub Type AJ-STANDARD Size 15. [en línea]. Bogotá, Colombia. [Consultado junio 9, 2010]. Disponible en: https://issuu.com/ideapixel/docs/catalogo_tbwoods_de1db0db5fcbf6

4. MANUALES PARA UNA TURBINA A GAS REFRIGERANTE



4.1 MANUAL DE ENSAMBLE

4.1.1 Identificación de las piezas

Cuadro 15. Identificación de los componentes de la turbina

NOMBRE	ELEMENTO	NOTA
Sistema Dinámico		
Álabe		Verificar la identificación de cada álabe (son 8 diferentes)
Diafragma superior		Verificar la identificación del diafragma (son 2 diferentes)
Diafragma inferior		Verificar la identificación del diafragma (son 2 diferentes)
Rodete		Verificar la identificación del rodete (son 2 diferentes)
Buje QD		
Sistema de Potencia		
Rotor		


Cuadro 15. (Continuación)

Rodamientos		Rodamiento de bolas y rodamiento de rodillos
Retenedores		
Sellos laberinticos		
Pin seeger		
Cuña		Verificar la identificación del diafragma (son 2 tipos diferentes)
Sistema de Control		
PLC		
Sensores		Sensores de presión, temperatura, desplazamiento
Virador		

Cuadro 15. (Continuación)

Válvula de regulación		
Panel de control		En el panel de control vendrán implementados los instrumentos para el control de la turbina
Sistema Estructural		
Carcasa superior		
Carcasa inferior // Anillo		Debido a su proceso de fabricación, es una sola pieza
Soporte		Verificar la identificación de los soportes (son 2 diferentes)
Loctite 518		
Pernos		
Perno de diafragma		Perno M8 x 30
Perno de carcasa		Perno 1/2" x 1 5/8"

Cuadro 15. (Continuación)

Perno de soporte		Perno 1/2" x 2"
Perno de anclaje		Perno V7 3/4" x 4 1/2"

Fuente: elaboración propia

4.1.2 Preparación del terreno. Para la instalación de la turbina a gas refrigerante sobrecalentado es indispensable unas óptimas condiciones del terreno, se propone que se realice una base en concreto como se observa en la imagen 40 y 41, el cual debe tener un acabado liso para no generar desbalanceo o vibraciones excesivas en la turbina puesto que esto puede causar daños en la misma.

Imagen 41. Base en concreto

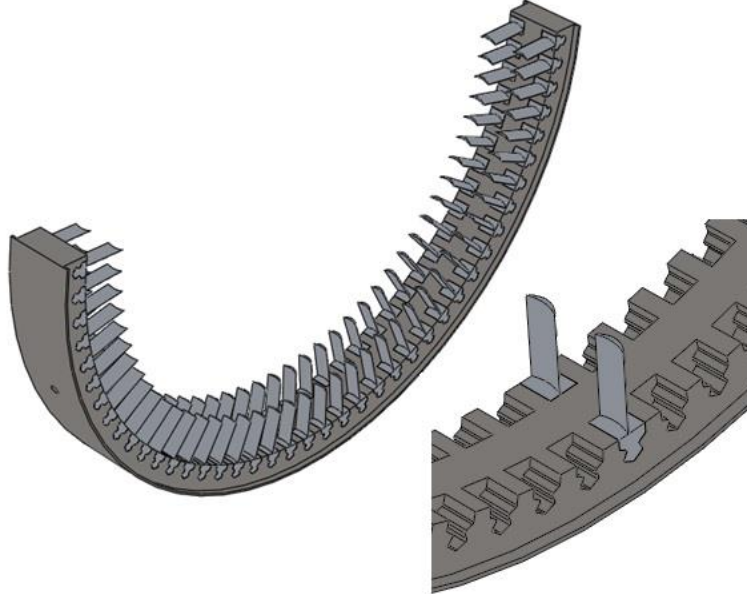


Fuente: SPARKLES MARKER. Base de concreto, plana. [en línea]. [Consultado junio 9, 202]. Disponible en: <http://sparklesmaker.com/concretebase.html>. GIPCO INGENIERÍA. Base en concreto. [en línea]. [Consultado junio 9, 2020]. <http://gipcoingenieria.com/hotel-mision-grand-ex-hacienda-de-chautla>

4.1.3 Ensamble de la turbina

4.1.3.1 Acoplar los álabes en los correspondientes diafragmas según su identificación.

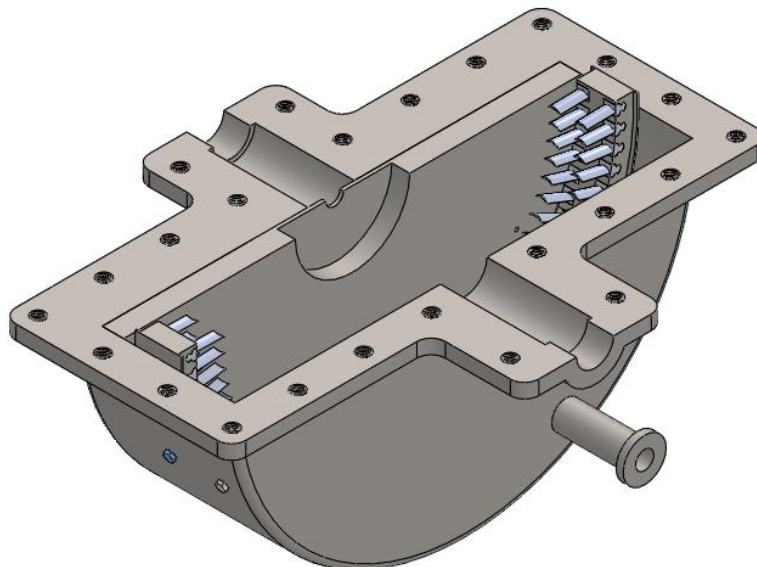
Imagen 42. Acople de álabes en los diafragmas inferiores



Fuente: elaboración propia por medio del software SolidWorks.

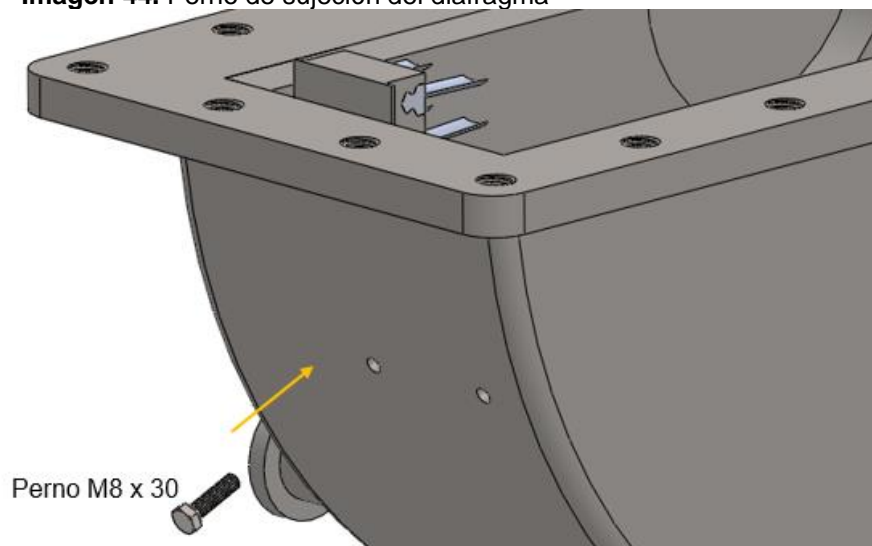
4.1.3.2 Instalar los diafragmas debidamente identificados en la carcasa inferior, mediante los pernos de diafragma (perno M8 x 30).

Imagen 43. Instalación de diafragmas en la carcasa



Fuente: elaboración propia por medio del software SolidWorks.

Imagen 44. Perno de sujeción del diafragma

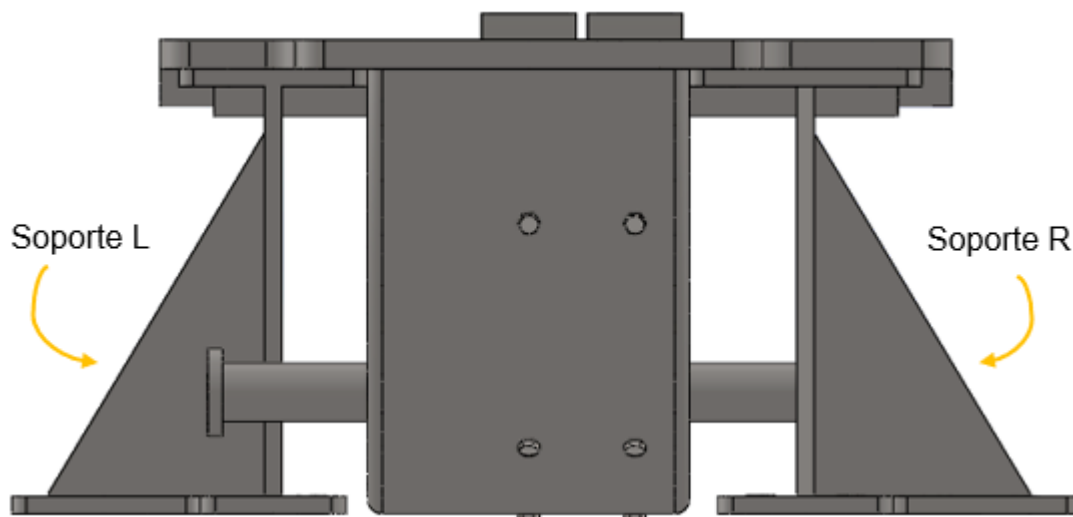


Fuente: elaboración propia por medio del software SolidWorks.

Aplicar el producto Loctite 518, con el fin de realizar un sellado que prevenga la fuga de fluido por los agujeros.

4.1.3.3 Instalar los soportes en el ensamble anteriormente realizado.

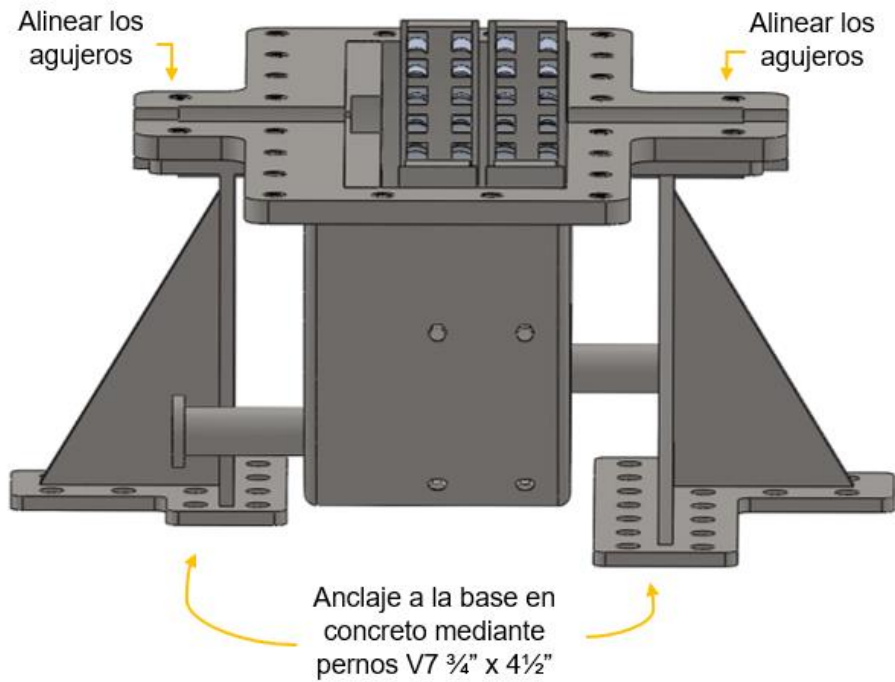
Imagen 45. Instalación de soportes



Fuente: elaboración propia por medio del software SolidWorks.

4.1.3.4 Realizar el anclaje de este subensamble en la base de concreto anteriormente propuesta mediante los pernos B7 M20x100 con anclajes químicos (epóxico).

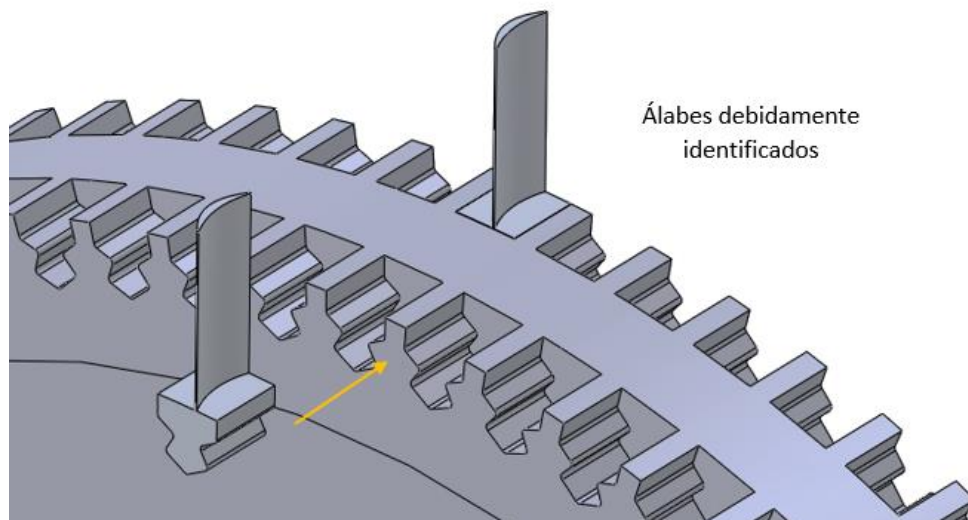
Imagen 46. Anclaje en la base en concreto



Fuente: elaboración propia por medio del software SolidWorks.

4.1.3.5 Instalar los álabes en las correspondientes ruedas, este acople se realiza a presión, están debidamente marcadas para la instalación en su debido lugar.

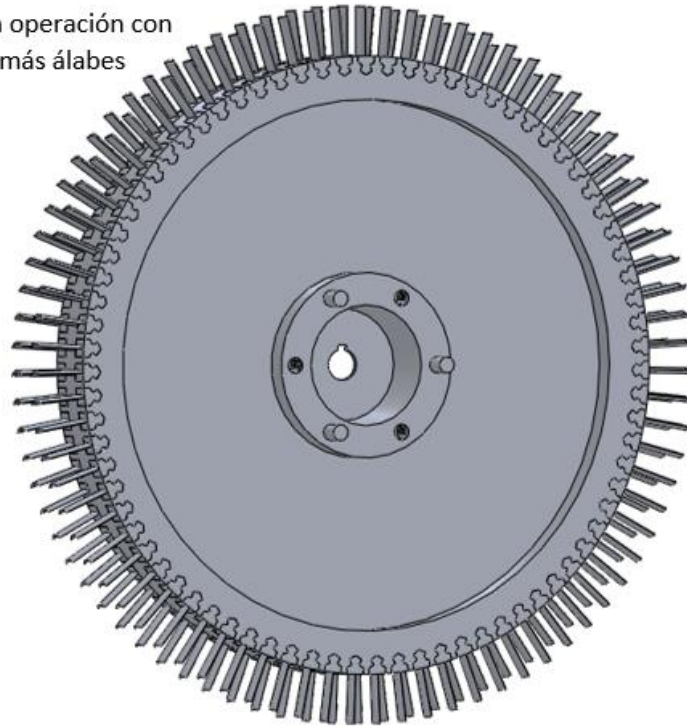
Imagen 47. Instalación de álabes en los rodetes



Fuente: elaboración propia por medio del software SolidWorks.

Imagen 48. Instalación de álabes en el rodete

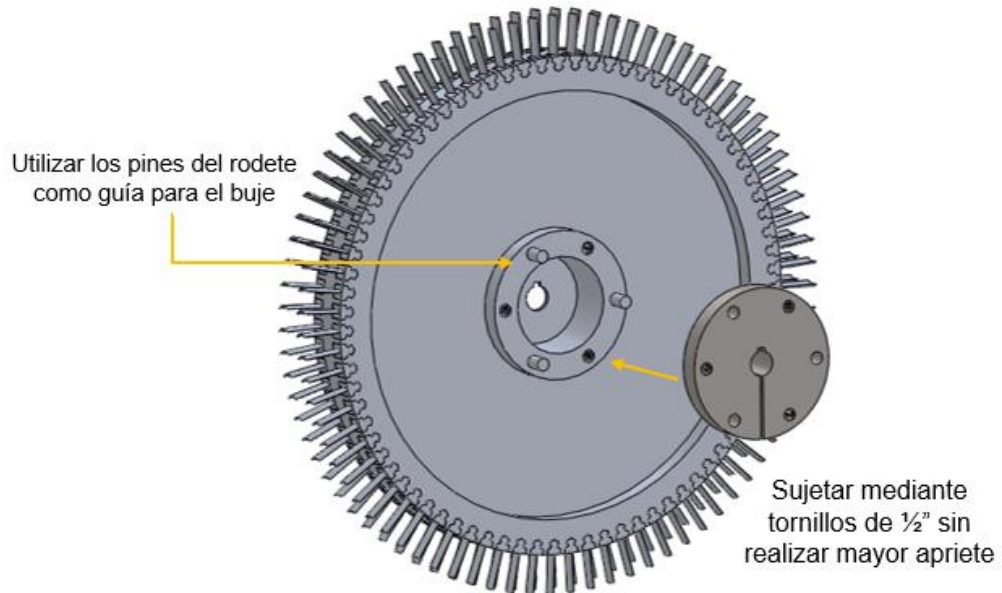
Replicar la operación con los demás álabes



Fuente: elaboración propia por medio del software SolidWorks.

4.1.3.6 Instalar los bujes QD en las ruedas con sus respectivos tornillos.

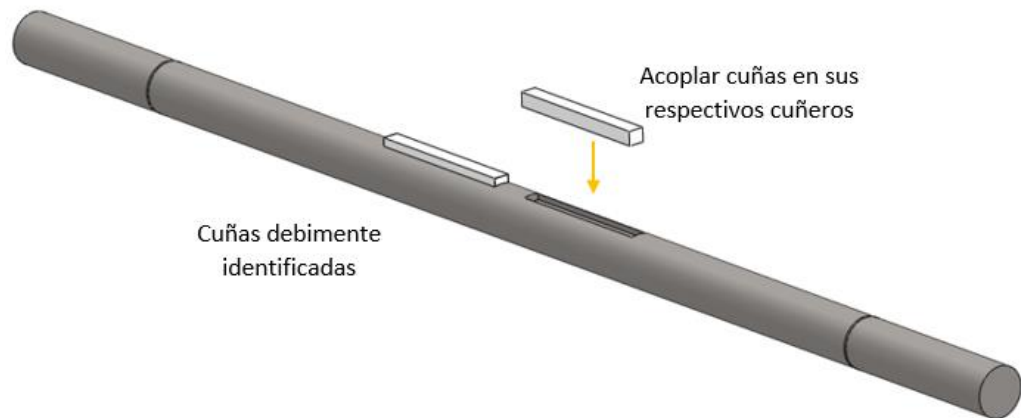
Imagen 49. Instalación de bujes QD



Fuente: elaboración propia por medio del software SolidWorks.

4.1.3.7 Acoplar las cuñas al eje

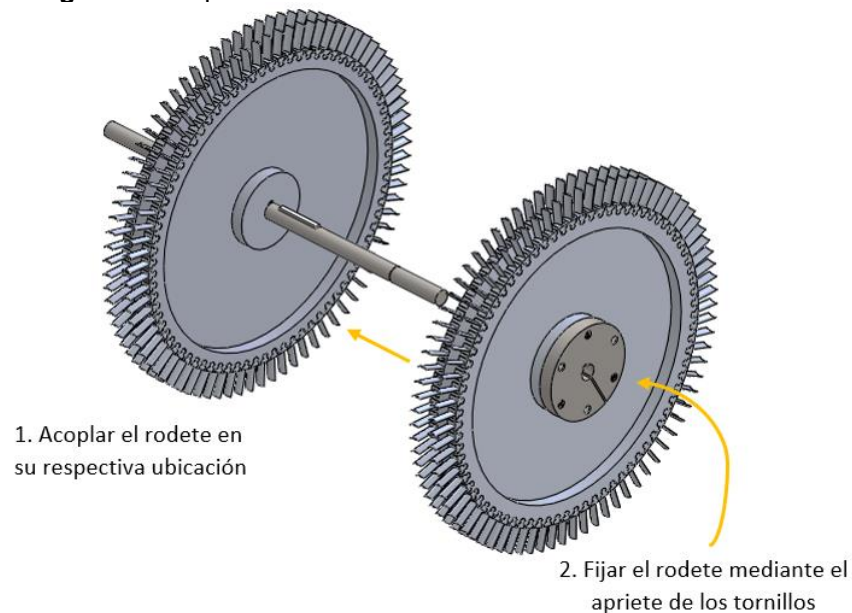
Imagen 50. Acople de cuñas



Fuente: elaboración propia por medio del software SolidWorks.

4.1.3.8 Acoplar el subensamble de los rodets en el eje.

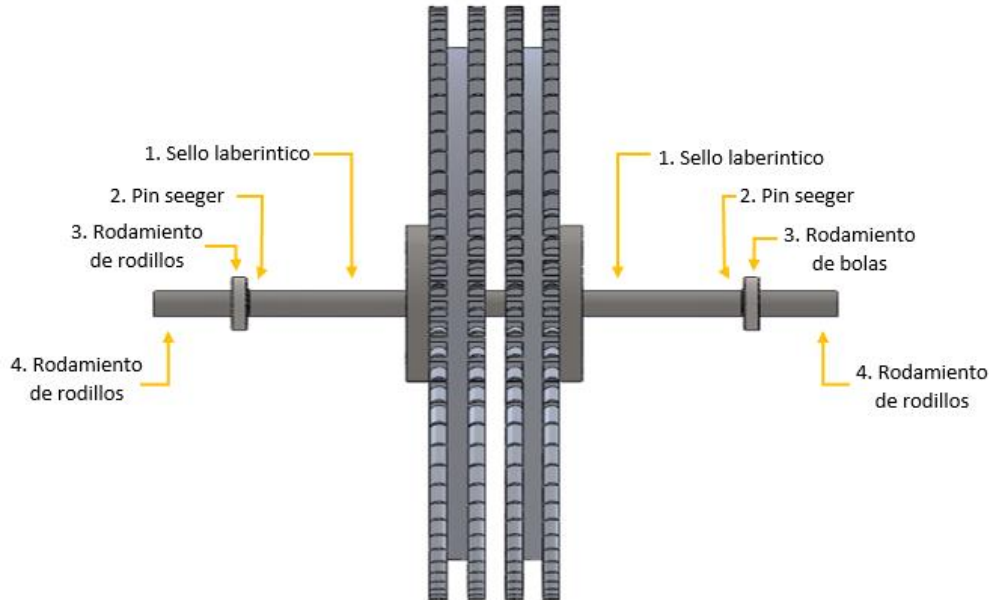
Imagen 51. Acople de rodets en el rotor



Fuente: elaboración propia por medio del software SolidWorks.

4.1.3.9 Colocar en el eje los sellos laberínticos, el pin seeger y los rodamientos, el rodamiento de bolas debe ir en el lado derecho y el rodamiento de rodillos en el lado izquierdo de la turbina.

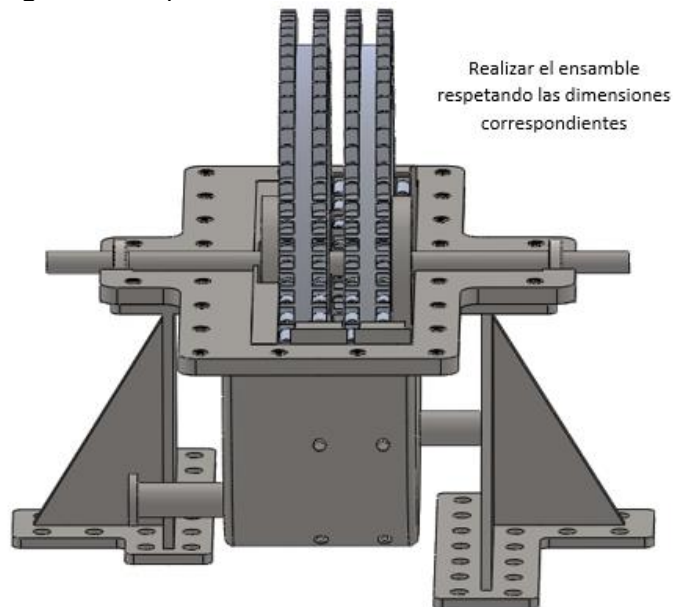
Imagen 52. Instalación de accesorios en el rotor



Fuente: elaboración propia por medio del software SolidWorks.

4.1.3.10 Acoplar este subensamble en la carcasa inferior de la turbina

Imagen 53. Acople del subensamble en la carcasa inferior

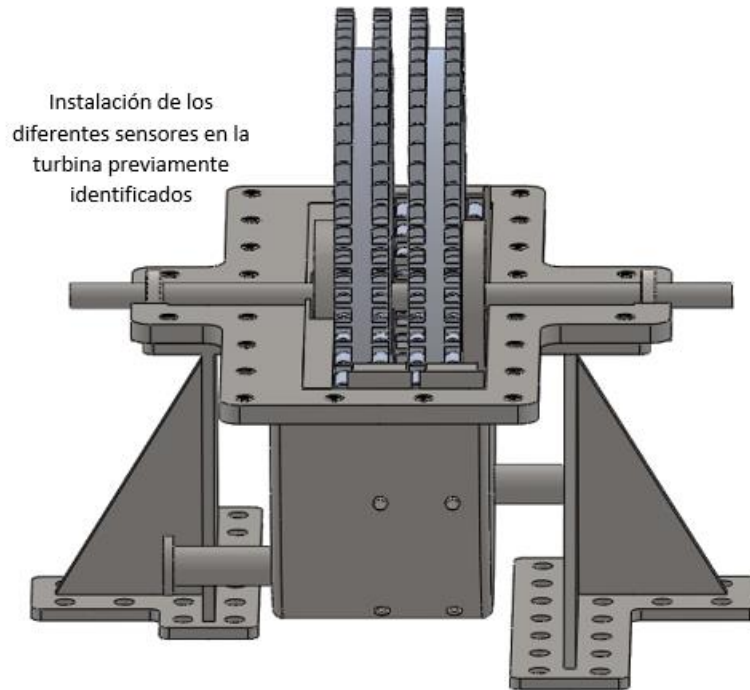


Precaución: Realizar este ensamble con cautela, para no golpear los álabes entre sí.

Fuente: elaboración propia por medio del software SolidWorks.

4.1.3.11 Colocar los diferentes sensores en su lugar correspondiente para las debidas mediciones

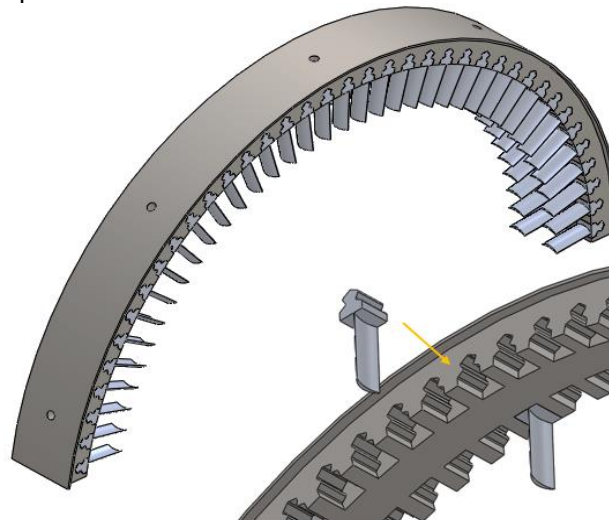
Imagen 54. Disposición de sensores



Fuente: elaboración propia por medio del software SolidWorks.

4.1.3.12 Acoplar los álabes en los diafragmas superiores mediante presión

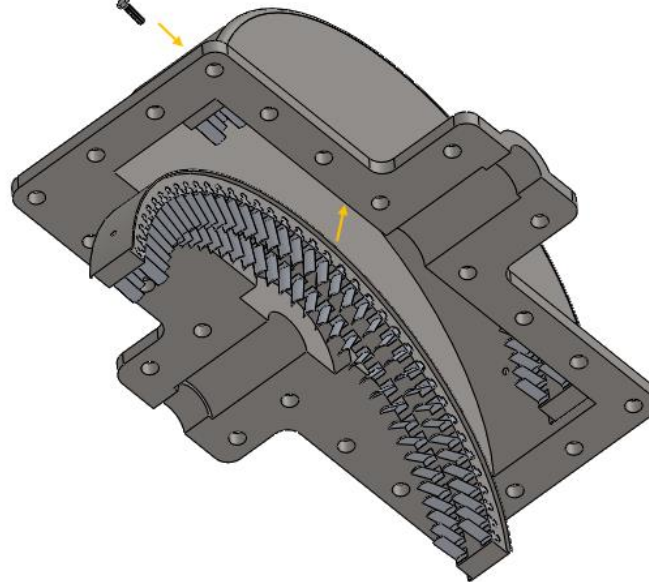
Imagen 55. Acople de álabes en los diafragmas superiores



Fuente: elaboración propia por medio del software SolidWorks.

4.1.3.13 Instalar los diafragmas debidamente identificados en la carcasa superior, mediante los pernos de diafragma (perno M8 x 30).

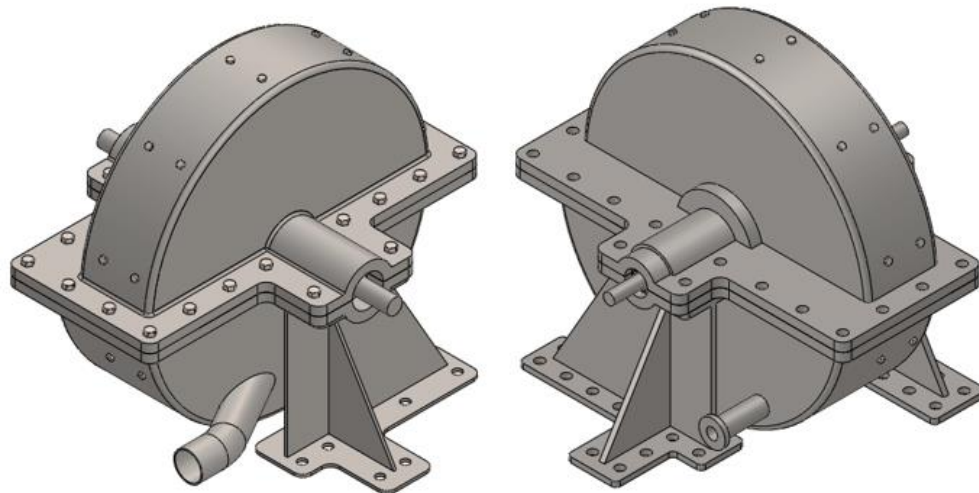
Imagen 56. Instalación de diafragmas en la carcasa superior
Perno M8 x 30



Fuente: elaboración propia por medio del software SolidWorks.

4.1.3.14 Acoplar el subensamblaje superior, al subensamblaje inferior.

Imagen 57. Acople del subensamblaje superior al inferior

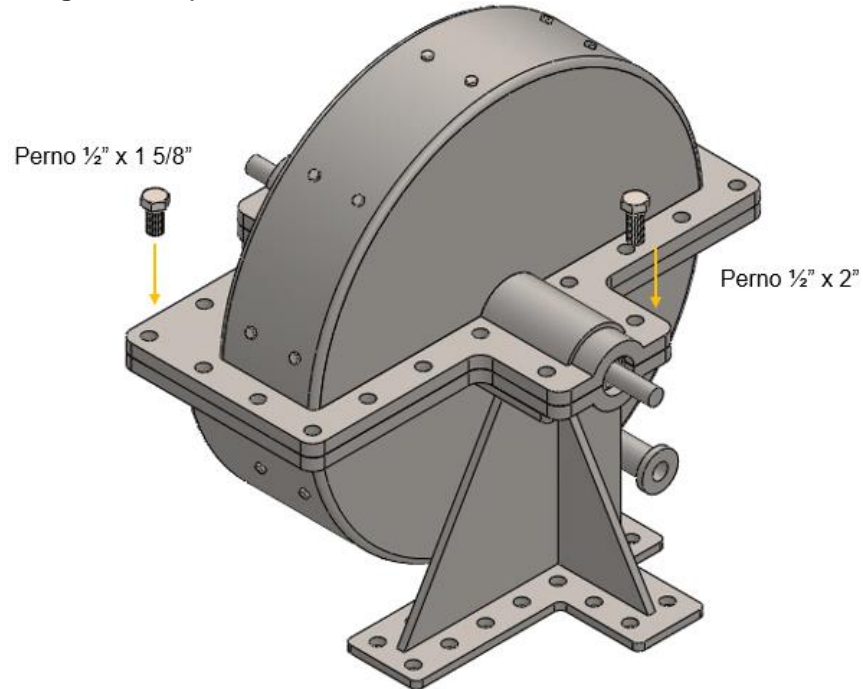


Precaución: Realizar este ensamble con cautela, para no golpear los álabes entre sí.

Fuente: elaboración propia por medio del software SolidWorks.

4.1.3.15 Realizar la sujeción de carcasa mediante los pernos de carcasa (perno 9/16" x 1 5/8") y los pernos de soportes (perno 3/4" x 2")

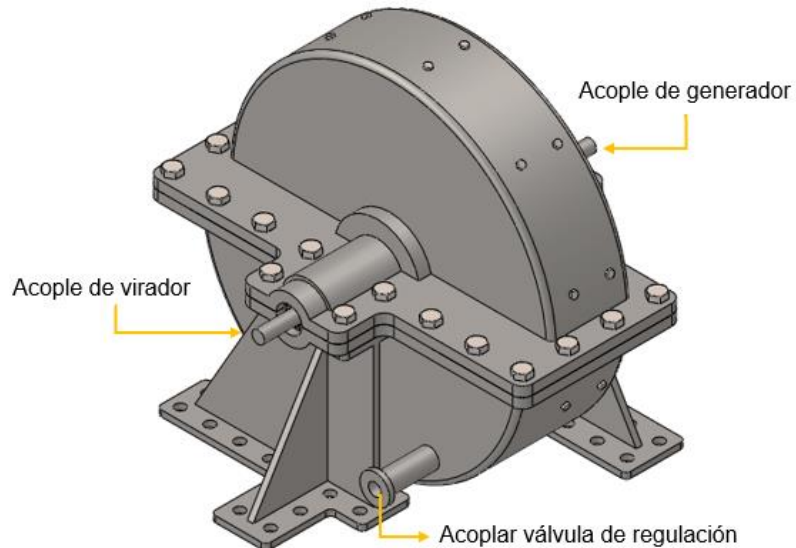
Imagen 58. Sujeción de la carcasa



Fuente: elaboración propia por medio del software SolidWorks.

4.1.3.16 Instalar la válvula de regulación del sistema, el virador y el acople del generador

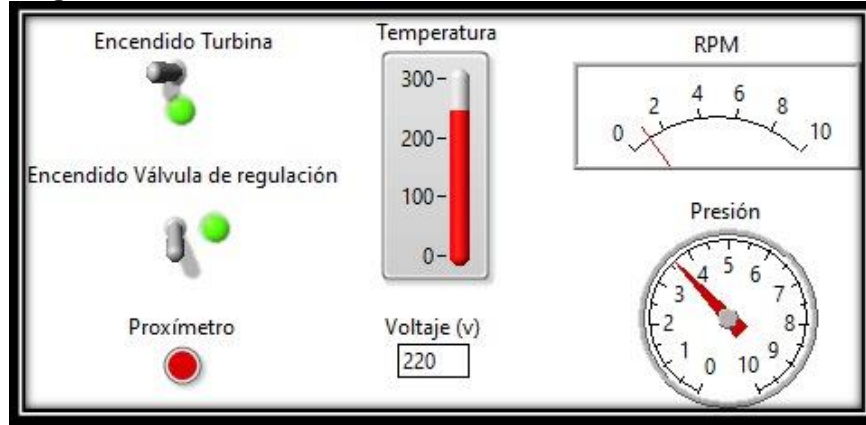
Imagen 59. Instalación de válvula de regulación



Fuente: elaboración propia por medio del software SolidWorks.

4.1.3.17 Realizar la debida instalación electrónica del PLC y el tablero de control.

Imagen 60. Tablero de control



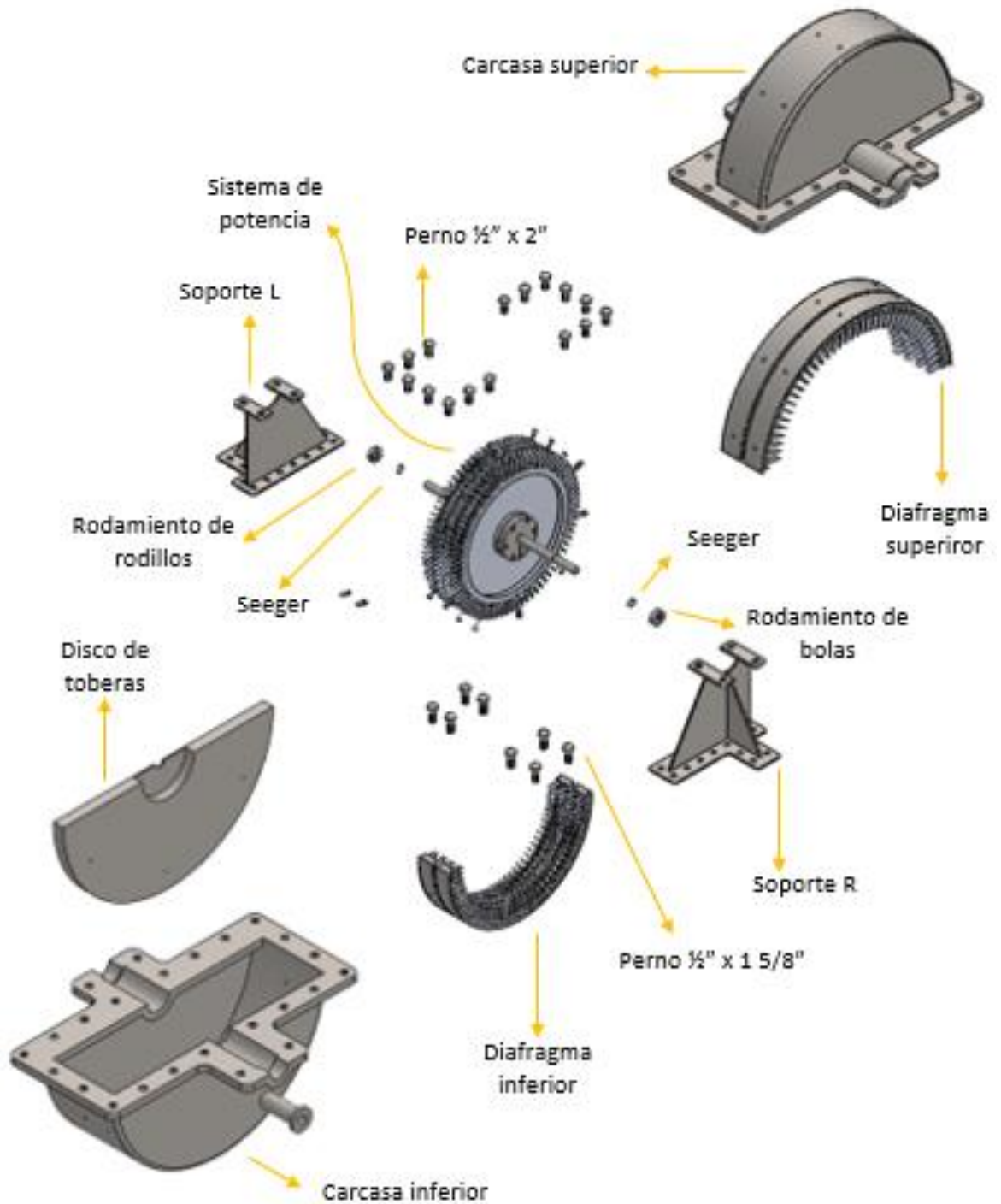
Fuente: elaboración propia.

4.2. MANUAL DE OPERACIÓN

En la imagen 60, se señalan las partes más importantes de la turbina a gas refrigerante, esta es una máquina que transforma la energía mecánica en energía eléctrica a través del movimiento del rotor a causa del gas refrigerante sobrecalentado que hace contacto con los álabes de la turbina, para finalmente ser acoplado a un generador eléctrico y poder suministrar la energía que se demanda.

Con el fin de garantizar el funcionamiento de la máquina se recomienda que el usuario encargado del accionamiento y control de la máquina realice una inspección visual para prevenir fallas:

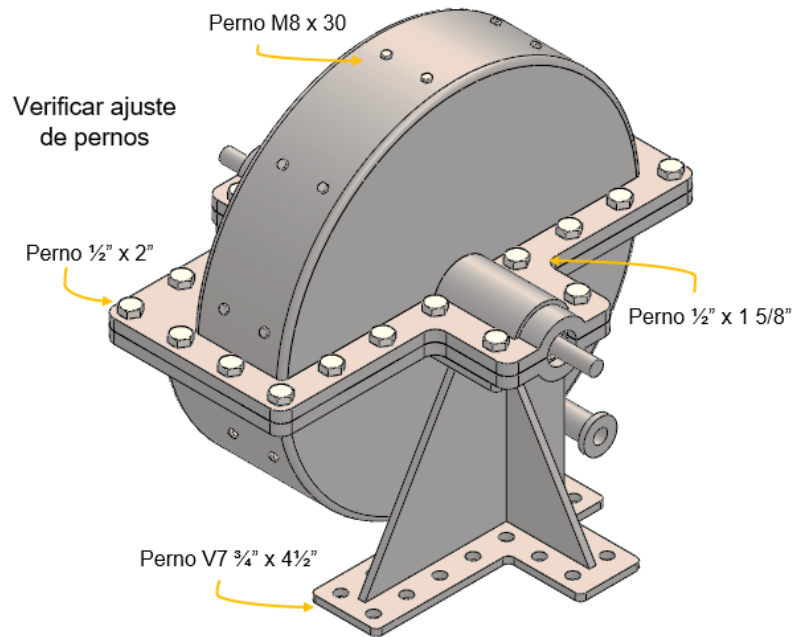
Imagen 61. Componentes turbina a gas refrigerante sobrecalentado



Fuente: elaboración propia por medio del software SolidWorks.

4.2.1 Verificar que todos los tornillos estén correctamente ajustados.

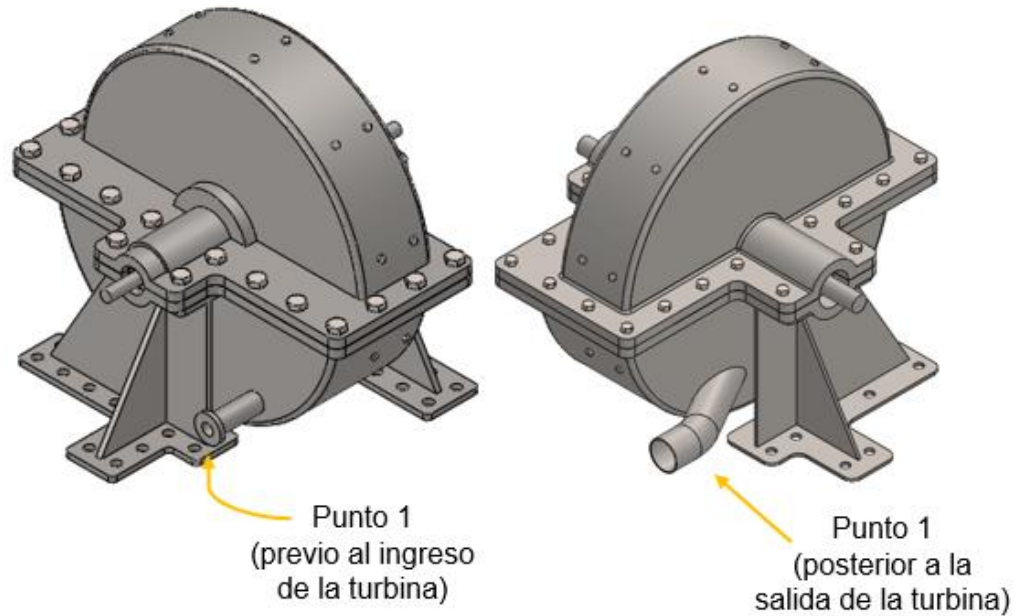
Imagen 62. Verificación ajustes de pernos



Fuente: elaboración propia por medio del software SolidWorks.

4.2.2 Averías visibles en las tuberías que conectan a la turbina.

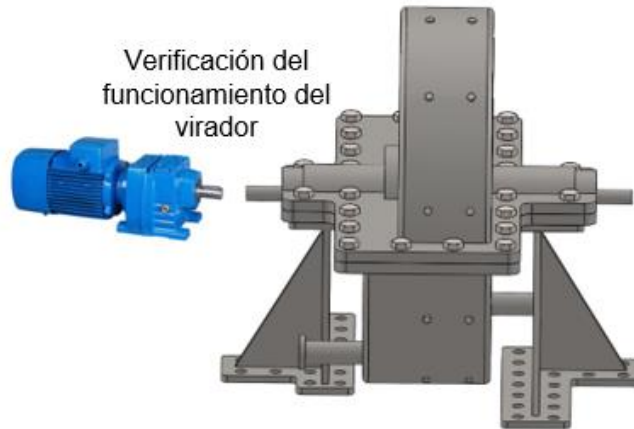
Imagen 63. Revisión de tuberías



Fuente: elaboración propia por medio del software SolidWorks.

4.2.3 Corroborar que el virador esté en funcionamiento por el tiempo adecuado antes de poner en marcha la turbina.

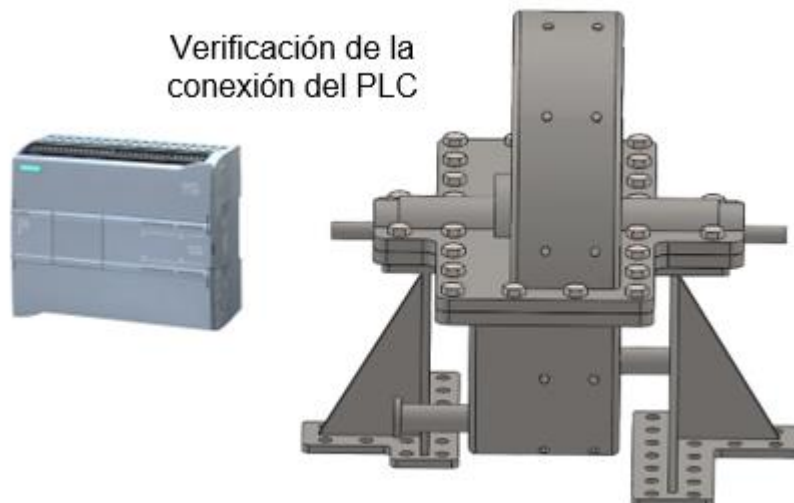
Imagen 64. Verificación del funcionamiento del virador



Fuente: elaboración propia por medio del software SolidWorks.

4.2.4 Verificar visualmente que las entradas y salidas estén cargadas al PLC.

Imagen 65. Verificación del PLC



Fuente: elaboración propia por medio del software SolidWorks.

4.2.5 Puesta en marcha de la turbina

Verificar el flujo másico proveniente del intercambiador de calor que hace parte del ciclo orgánico Rankine por medio de la inspección visual del flujómetro ubicado en la tubería que conduce a la turbina, en este caso $65 \text{ lb}/\text{min}$.

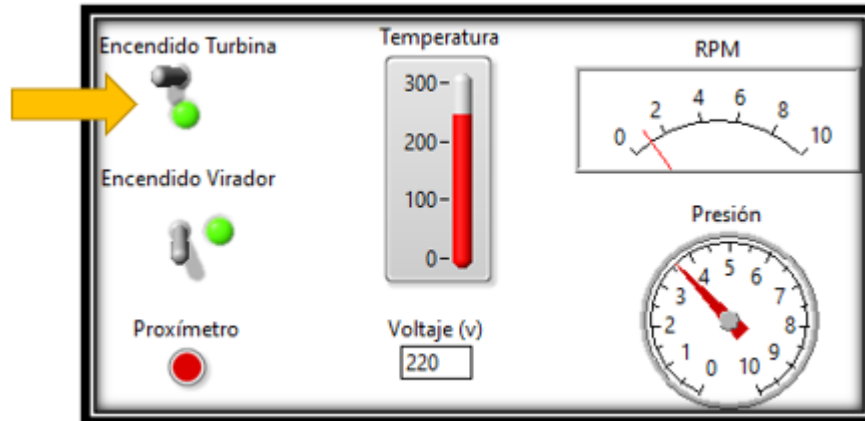
Imagen 66. Flujómetro



Fuente: YOKOGAWA. Sensores e instrumentos, flujómetro. [en línea]. [Consultado junio 12, 2020]. Disponible en: <https://www.yokogawa.cl/productos-y-servicios/sensores-e-instrumentos/medidores-de-flujo-admag-axr.html>

4.2.6 Accionar el encendido de la turbina ubicado en el tablero de control.

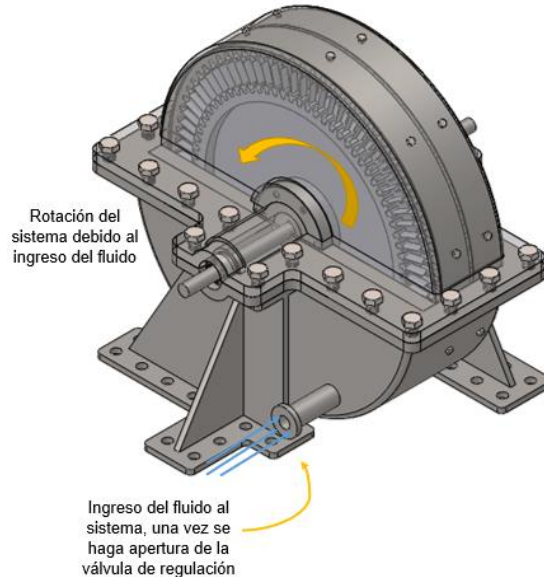
Imagen 67. Encendido en el panel de control



Fuente: elaboración propia

4.2.7 Por medio del PLC la válvula de regulación se abrirá y el rotor empezará a girar.

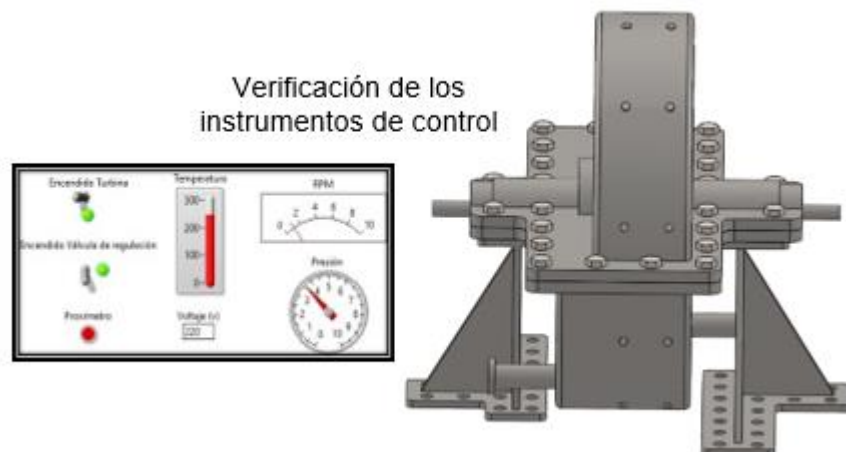
Imagen 68. Regulación del fluido



Fuente: elaboración propia por medio del software SolidWorks.

4.2.8 Inspeccionar visualmente las mediciones del tablero de control hasta que las variables midan lo esperado, la temperatura no debe exceder de 245°C, el voltaje debe mantenerse alrededor de los 220 V, la velocidad de rotor no debe superar los 980 rpm y la presión máxima debe ser de 36 Bar.

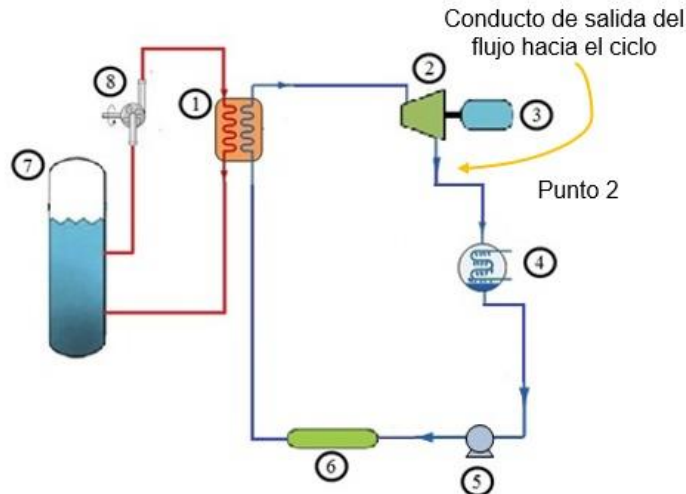
Imagen 69. Verificación de instrumentos de control



Fuente: elaboración propia por medio del software SolidWorks.

4.2.9 El fluido pasa por todas las etapas de la turbina y es llevado al conducto de salida para ser retornado al ciclo orgánico Rankine.

Imagen 70. Salida de turbina



Fuente: elaboración propia por medio del software SolidWorks.

4.2.10 Precauciones

- En caso de emergencia se pueden manipular los interruptores de encendido y apagado de la turbina y del virador situados en el tablero de control.
- Si la presión supera el valor máximo permitido la válvula de alivio se accionará automáticamente.

4.3 MANUAL DE MANTENIMIENTO

Para garantizar el funcionamiento adecuado se deben tener presentes algunas recomendaciones y llevar a cabo rigurosamente las actividades de mantenimiento, con el fin de prolongar la vida útil de la máquina y evitar fallas inesperadas.

A continuación, se nombrarán algunas recomendaciones sugeridas por Renovetec⁵⁴, empresa de ingeniería y formación técnica en áreas de generación de energía, entre otras.

⁵⁴ ENERGIZA.ORG. Especial turbinas de vapor. Renovetec. [en línea]. España. 2011., [Consultado Feb 10, 2020]. Disponible en: <http://www.energiza.org/antiores/energizadiciembre2011.pdf>.

4.3.1 Recomendaciones

- Utilizar un fluido con características fisicoquímicas adecuadas.
- Respetar las instrucciones de operación en arranques, durante la marcha y durante las paradas del equipo.
- Vigilar el sistema de lubricación, comprobar las propiedades y la presencia de contaminantes.
- Respetar las consignas de protección del equipo (valores de alarma y disparo para cada uno de los parámetros controlados por el sistema de control). Si la turbina da algún síntoma de mal funcionamiento (vibraciones, temperaturas elevadas, falta de potencia, etc.) parar y revisar el equipo: nunca sobrepasar los límites de determinados parámetros para poder seguir con ella en producción o incluso para poder arrancarla.
- Realizar las actividades de mantenimiento con la periodicidad sugerida
- No poner en marcha después de una parada por mantenimiento correctivo sin estar al tanto de la causa raíz del fallo.

Las actividades de mantenimiento se proponen mediante un cuadro explícito en el anexo C, donde se analiza cada subsistema de la turbina a gas refrigerante sobrecalentado y sus respectivos componentes para los cuales se propone una inspección o análisis bajo cierta periodicidad y finalmente se expone una posible falla en dicho componente. Posteriormente en el cuadro 35, la falla anteriormente mencionada es analizada mediante la definición de esta, las características que la describen, la metodología propuesta a implementar y por último los recursos que se deben implementar.

4.4 MANUAL DE SEGURIDAD

El siguiente manual se realiza como herramienta para garantizar que las personas que estarán en la instalación, operación y mantenimiento de la turbina a gas refrigerante sobrecalentado cumplan con todos los requisitos necesarios como el uso de elementos de protección personal, la señalización de los sitios de trabajo, entre otros, para la prevención de accidentes de trabajo o enfermedades laborales.

Es de vital importancia, que el manual sea aplicado a todo el personal, y de obligatorio cumplimiento por los mismos.

4.4.1 Normatividad

Cuadro 16. Normatividad en la seguridad de operación

NORMATIVIDAD	OBJETO
Ley 1562 2012	Por la cual se modifica el sistema de riesgos laborales y se dictan otras disposiciones en materia de salud ocupacional
Resolución 1401 de 2007	Por la cual se reglamenta la investigación de incidentes y accidentes de trabajo.
Resolución 256 de 2014	Se reglamenta la conformación, capacitación y entrenamiento para las brigadas contraincendios de los sectores energético, industrial, petrolero, minero, portuario, comercial y similar en Colombia
Resolución 3246 de 2018	Por la cual se reglamenta la instalación y uso obligatorio de cintas retrorreflectivas.
Resolución 5018 de 2019 Min Trabajo - Lineamientos SST Trabajos con Peligro Eléctrico	Se expiden los lineamientos de seguridad y salud en el trabajo para las actividades ejecutadas en los procesos de generación de energía a través de fuentes convencionales y no convencionales de generación, transmisión, distribución y comercialización de energía eléctrica.

Fuente: elaboración propia. Basado en: ARL Sura. Centro de legislación. [en línea]. [Consultado junio 12, 2020]. Disponible en: <https://www.arlsura.com/index.php/component/legislacion/?view=contenido&cat=2>

4.4.2 Ámbitos de aplicación. Su contenido será de cumplimiento obligatorio para todo el personal que desarrolle cualquier tipo de actividad y/o manipulación durante la instalación, operatividad y mantenimiento de una turbina a gas refrigerante sobrecalentado.

4.4.3 Responsabilidades

Del proveedor

- Brindar el manual de seguridad de la turbina a gas refrigerante sobrecalentado.

Del cliente

- Garantizar la implementación de presente documento de acuerdo con los lineamientos normativos propios de la compañía.
- Identificar, valorar y controlar los riesgos de la instalación, operatividad y mantenimiento de turbina a gas refrigerante sobrecalentado con los respectivos planes de acción.
- Brindar a los operarios los elementos de protección personal.

Del personal

- Utilizar de manera adecuada y responsable los elementos de protección personal.

4.4.4 Definiciones y reglamentación

Lugar de trabajo

Se entiende por lugares de trabajo, las áreas establecidas para llevar a cabo una labor en específico, edificadas o no, en las que el personal debe permanecer o deben acceder debido a la labor asignada⁵⁵.

Para la instalación, operación y mantenimiento de la turbina a gas refrigerante sobrecalentado las dimensiones del sitio de trabajo deberán garantizar que el personal realice su trabajo sin riesgos para su seguridad y salud y en condiciones ergonómicas aceptables.

Condiciones ambientales

Las condiciones ambientales son aquellas variables físicas relacionadas con el entorno del personal, tales como temperatura, humedad, ruido, iluminación, entre otras. Estas variables no deberán poner en riesgo la seguridad del personal, y podrán ser modificadas según la necesidad procurando siempre que se convierta en una fuente de molestia para los empleados. Por tanto, es importante evitar exposición del personal a temperaturas extremas, o cambios bruscos de temperatura, malos olores, entre otros. De este modo, el personal que está a disposición de la instalación, operación y mantenimiento de la turbina debe tener en cuenta:

⁵⁵ HC ENERGÍA. Manual de prevención de riesgos laborales. HC ENERGÍA. [en línea]. Madrid. 2007., pp. 149. [Consultado Jun 12, 2020]. Disponible en: https://www.hcenergia.com/recursos/doc/Colaboradores/Proveedores/Documentacion_general/1342400294_712009131049.pdf.

- Temperatura: Es necesario que el sitio donde está ubicada la turbina a gas refrigerante sobrecalentado debe estar a temperatura ambiente.
- Iluminación: La iluminación del sitio donde estará ubicada la turbina a gas refrigerante sobrecalentado se debe adaptar a las características de la actividad que se efectúe en ella.
- Ruido: Si bien la turbina a gas refrigerante sobrecalentado está diseñada para producir ruidos a bajos decibeles, se debe garantizar que no sea fuente de molestia para el personal.
- Orden y limpieza: Es importante que los sitios de trabajo establecidos para la instalación, operación y mantenimiento de la turbina a gas refrigerante sobrecalentado cumplan con requerimientos básicos de orden y limpieza con el fin de garantizar que no ocurran accidentes laborales.

Las zonas de paso, salidas, vías de circulación, en especial, las salidas y vías de circulación previstas para la evacuación en casos de emergencia deberán encontrarse libres de obstáculos, de forma que sea posible utilizarlas en todo momento, sin riesgos ni dificultades⁵⁶.

4.4.5 Señalización. Se entiende por señalización de seguridad y salud una técnica complementaria de prevención que, referida a un objeto, actividad o situación determinada, proporciona una indicación relativa a la seguridad y salud en el trabajo. Dichas indicaciones pueden referirse a una prohibición, a la existencia de un peligro, a la obligación de llevar a cabo un comportamiento determinado, a la localización de un dispositivo o elemento de seguridad, salvamento o socorro o a cualquier otra información de interés para la seguridad o salud de las personas⁵⁷.

Por lo anteriormente mencionado, para la instalación, operación y mantenimiento de la turbina a gas refrigerante sobrecalentado, se deberá:

- Delimitar los sitios de trabajo establecidos.
- Señalizar las zonas de paso y vías de circulación.
- Señalizar salidas de emergencia.
- Establecer e identificar los elementos de emergencia. (Botiquín de primeros auxilios, extintor, tabla rígida, etc.)
- Publicar en un sitio visible para el personal, las normas de seguridad que se deben llevar a cabo.

⁵⁶ HC ENERGÍA. Manual de prevención de riesgos laborales. HC ENERGÍA. [en línea]. Madrid. 2007., pp. 149. [Consultado Jun 12, 2020]. Disponible en: https://www.hcenergia.com/recursos/doc/Colaboradores/Proveedores/Documentacion_general/1342400294_712009131049.pdf.

⁵⁷ *Ibíd.*, p. 55.

- Prohibición de uso de celular en las áreas establecidas de trabajo para la turbina.

4.4.6 Equipos de protección personal. El Elemento de Protección Personal (EPP), es cualquier equipo o dispositivo destinado para ser utilizado o sujetado por el trabajador, para protegerlo de uno o varios riesgos y aumentar su seguridad o su salud en el trabajo. Las ventajas que se obtienen a partir del uso de los elementos de protección personal (EPP) son las siguientes⁵⁸:

- Proporcionar una barrera entre un determinado riesgo y la persona
- Mejorar el resguardo de la integridad física del trabajador
- Disminuir la gravedad de las consecuencias de un posible accidente sufrido por el trabajador.

Por lo anteriormente mencionado, el personal que estará en la instalación, operación y mantenimiento de la turbina a gas refrigerante sobrecalentado, deberá cumplir con⁵⁹:

- Uso de casco
- Uso de monogafas
- Uso de tapa oídos
- Uso overol
- Uso de guantes de seguridad
- Botas punta de acero.

4.4.7 Identificación de riesgos y medidas preventivas. Es indispensable realizar una identificación de los posibles riesgos presentes en el área de operación de la turbina a gas refrigerante sobrecalentado, y de igual manera plantear unas medidas preventivas con el fin de mitigar dichos riesgos, para este fin, se hace referencia a la ARL Sura quienes mediante un documento han dispuesto algunos riesgos y en base a ellos se han establecidos los apropiados para este proyecto⁶⁰.

⁵⁸ MINISTERIO DE SALUD Y PROTECCIÓN SOCIAL. Programa de elementos de protección personal, uso y mantenimiento. [en línea]. Bogotá, Colombia. 2017., pp. 47. [Consultado Jun 12, 2020]. Disponible en: <https://www.minsalud.gov.co/Ministerio/Institucional/Procesos%20y%20procedimientos/GTHS02.pdf>.

⁵⁹ *Ibíd.*, p. 11.

⁶⁰ ARL SURA. Identificación y control de los agentes de riesgo en el lugar de trabajo. ARL SURA. [en línea]. Colombia. 2015., pp. 15. [Consultado Jun 12, 2020]. Disponible en: https://www.arlsura.com/files/identificacion_control_riesgo.pdf.

Cuadro 17. Identificación de riesgos y medidas preventivas

ETAPA	TIPO DE RIESGO	RIESGOS	MEDIDAS PREVENTIVAS
Instalación de la turbina	Biomecánicos	Golpes	Uso de guantes de seguridad.
			Uso de overol.
			Uso de botas punta de acero.
		Cortes o pinchazos	Uso de guantes de seguridad.
			Uso de overol.
			Uso de botas punta de acero.
	Musculoesquelético	Movimientos repetidos	Realizar tareas variadas.
		Sobrecarga física	Posturas correctas.
	Físico	Iluminación insuficiente	Uso de numero de luminarias necesarias para las actividades.
		Ruido	Uso de tapa oídos.
Fenómenos naturales	Tales como Terremotos Inundaciones Precipitaciones	Adecuada señalización.	
		Orden y limpieza.	
		Elementos de emergencia.	
Operación de la turbina	Seguridad	Explosión por exceso de presión.	Revisión de válvula de alivio
			Revisión de Elementos de control (manómetros de presión)
		Riesgo eléctrico	Revisión periódica y sistemática de las instalaciones.
			Establecer fechas para la revisión de las instalaciones.
			Manipulación de las instalaciones por personal acreditado.

Cuadro 17. (Continuación)

			Manipulación con previo aviso.
		Incendios por falla de instalación eléctrica.	Revisión periódica y sistemática de las instalaciones.
	Físico	Ruido	Uso de tapa oídos.
	Desastres naturales	Terremotos, precipitaciones, inundaciones, entre otros.	Adecuada señalización.
			Orden y limpieza.
		Elementos de emergencia.	
Mantenimiento de la turbina	Musculoesquelético	Sobrecarga física dinámica	Posturas correctas.
			Pausas activas.
	Sobrecarga física estática	Diseños ergonómicos.	
	Psicosociales	Altos ritmos de trabajo.	Pausas activas.
			Sistemas de tiempos compensatorios.
		Supervisión estricta	Trabajo en equipo.
	Desastres naturales	Terremotos, precipitaciones, inundaciones, entre otros.	Adecuada señalización.
Orden y limpieza.			
Elementos de emergencia.			

Fuente: elaboración propia, con base en ARL SURA Identificación y control de los agentes de riesgo en el lugar de trabajo. ARL SURA. [en línea]. Colombia. 2015., pp. 15. [Consultado Jun 12, 2020]. Disponible en: https://www.arlsura.com/files/identificacion_control_riesgo.pdf.

5 ANÁLISIS DE COSTOS Y DE IMPACTO AMBIENTAL

5.1 IMPACTO AMBIENTAL

Es objetivo de este índice identificar, evaluar y jerarquizar los aspectos e impactos ambientales relacionados al proceso de cogeneración de energía a partir del modelo de turbina en el ciclo Rankine orgánico con la inclusión de refrigerante R134a.

Para la evaluación ambiental se establece la metodología propuesta por la Secretaría Distrital de Ambiente y el Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático⁶¹ en su programa gestión ambiental empresarial, la cual consiste en una matriz de identificación y evaluación de aspectos relevantes de este proyecto.

5.1.1 Metodología de evaluación. Como se mencionó anteriormente, para la metodología se han determinado y establecido tres criterios a evaluar en la matriz tal como lo propone las entidades gubernamentales.

Cuadro 18. Criterios para la evaluación ambiental

CRITERIOS	DESCRIPCIÓN
Legal	Dentro del cual se encuentra la existencia y el cumplimiento.
Impacto ambiental	Dentro del cual se encuentra frecuencia, severidad, alcance e incidencia.
Exigencias de partes interesadas	Dentro del cual se encuentra Exigencia/Acuerdo

Fuente: elaboración propia, con base en INSTITUTO DISTRITAL DE GESTIÓN DE RIESGOS Y CAMBIO CLIMATICO Guía técnica para la identificación de aspectos e impactos. INSTITUTO DISTRITAL DE GESTIÓN DE RIESGOS Y CAMBIO CLIMATICO. [en línea]. Colombia. 2015., pp. 15. [Consultado junio 10,2020]. Disponible en: <https://www.idiger.gov.co/documents/20182/297947/PLE-GU-01+Guia+Para+la+Identificacion+de+Aspectos+e+Impactos+Amb+V3.pdf/db462a5d-9133-4248-aa1d-422b2d9a105c>.

Estos criterios se amplían en el cuadro 20 donde se establece un valor cuantitativo para ser evaluados en la matriz de evaluación.

⁶¹ INSTITUTO DISTRITAL DE GESTIÓN DE RIESGOS Y CAMBIO CLIMATICO. Guía técnica para la identificación de aspectos e impactos. INSTITUTO DISTRITAL DE GESTIÓN DE RIESGOS Y CAMBIO CLIMATICO. [en línea]. Colombia. 2015., pp. 15. [Consultado junio 10,2020]. Disponible en: <https://www.idiger.gov.co/documents/20182/297947/PLE-GU-01+Guia+Para+la+Identificacion+de+Aspectos+e+Impactos+Amb+V3.pdf/db462a5d-9133-4248-aa1d-422b2d9a105c>.

Cuadro 19. Criterios apoderados para la evaluación ambiental

CRITERIO	EVALUACIÓN	DESCRIPCIÓN	VALOR
Legal	Existencia	Existencia de normatividad o legislación ambiental aplicable a los aspectos e impactos ambientales identificados	10
	No Existe	No existe legislación aplicable a los aspectos e impactos ambientales identificados	1
	Cumplimiento	Se cumple con la normatividad o legislación aplicable a los aspectos e impactos ambientales identificados	5
	No Cumplimiento	No se cumple con la normatividad o legislación aplicable a los aspectos e impactos ambientales identificados	10
	No aplica	No aplica a los aspectos e impactos ambientales identificados	1
Impacto Ambiental	Incidencia Directa	En caso de que el impacto tenga incidencia inmediata sobre el componente o recurso	(D)
	Incidencia Indirecta	En caso de que el impacto este fuera del alcance de la compañía	(I)
	Frecuencia anual/semestral	Ocasiones y periodos de tiempo de interacción del impacto con el medio ambiente	1
	Frecuencia mensual/ Bimestral/ trimestral	Ocasiones y periodos de tiempo de interacción del impacto con el medio ambiente	5
	Frecuencia Diario/ Semanal	Ocasiones y periodos de tiempo de interacción del impacto con el medio ambiente	10
	Severidad (Cambio Leve)	Los cambios en el medio ambiente tienden a desaparecer a medida que transcurre el tiempo	1
	Severidad (Cambio Moderado)	El cambio en el medio ambiente se mantiene constante	5
	Severidad (Cambio Considerable)	El cambio incrementa la afectación sobre el medio ambiente, ya sea en extensión, intensidad o cualquiera de sus manifestaciones.	10
	Alcance Puntual	El área de influencia del impacto está dentro de los límites de la compañía	1
	Alcance local	El impacto se encuentra dentro de la planta y no traspasa los límites	5

Cuadro 19. (Continuación)

	Alcance Extenso	El impacto tiene efecto fuera de los límites de la planta	10
Exigencia de partes interesadas	No Existe	No existe acuerdo o Reclamo	1
	Sin implicaciones	No se cuenta con implicaciones legales	5
	Existe reclamo o acuerdo formalizado con partes interesadas	El impacto ambiental identificado cuenta con un reclamo por parte de alguna parte interesada	10

Fuente: elaboración propia, con base en INSTITUTO DISTRITAL DE GESTIÓN DE RIESGOS Y CAMBIO CLIMATICO Guía técnica para la identificación de aspectos e impactos. INSTITUTO DISTRITAL DE GESTIÓN DE RIESGOS Y CAMBIO CLIMATICO. [en línea]. Colombia. 2015., pp. 15. [Consultado junio 10,2020]. Disponible en: <https://www.idiger.gov.co/documents/20182/297947/PLE-GU-01+Guia+Para+la+Identificacion+de+Aspectos+e+Impactos+Amb+V3.pdf/db462a5d-9133-4248-aa1d-422b2d9a105c>.

Posteriormente se realiza una valoración de los impactos ambientales, basado en las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} \text{Total criterior legal (CL)} &= \text{Existencia} \times \text{Cumplimiento} \\ \text{Total criterior impacto ambiental} &= 3,5\text{Frecuencia} + 3,5\text{Severidad} + 3\text{Alcance} \end{aligned}$$

Una vez determinados la valorización de esta evaluación se realiza una jerarquización de impactos ambientales mediante un código de colores según el resultado obtenido.

Cuadro 20. Escala de colores según el valor de impacto ambiental

ESCALA DE VALORACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL	MENOR A 29	ENTRE 30 Y 55	ENTRE 56 Y 70	MAYOR A 71
Intervención	No significativo	Bajo	Medio	Alto
Medida de intervención	No requiere acciones inmediatas	Establecer medidas de intervención operativas adicionales, si es pertinente.	Establecer acciones de control	Tomar acciones inmediatas para prevenir, mitigar y/o controlar el impacto.
Código de color				

Fuente: elaboración propia, con base en INSTITUTO DISTRITAL DE GESTIÓN DE RIESGOS Y CAMBIO CLIMÁTICO Guía técnica para la identificación de aspectos e impactos. INSTITUTO DISTRITAL DE GESTIÓN DE RIESGOS Y CAMBIO CLIMÁTICO. [en línea]. Colombia. 2015., pp. 15. [Consultado junio 10,2020]. Disponible en: <https://www.idiger.gov.co/documents/20182/297947/PLE-GU-01+Guia+Para+la+Identificacion+de+Aspectos+e+Impactos+Amb+V3.pdf/db462a5d-9133-4248-aa1d-422b2d9a105c>.

5.1.2 Matriz de identificación de aspectos a evaluar

Cuadro 21. Matriz de identificación de aspectos

ACTIVIDAD	RUTINARIA / NO RUTINARIA	DESCRIPCIÓN DEL ASPECTO	IMPACTO AMBIENTAL
Construcción de obras civiles	No rutinaria	Generación de residuos	Contaminación de los recursos naturales alteración en la calidad del aire
		Generación de emisiones atmosféricas (MP y gases)	
		Remoción de capa suelo	
		Generación y emisión de ruido	Cambio en las propiedades del suelo- erosión de suelo
		Generación y arrastre de sedimentos	Alteración de niveles de ruido-contaminación auditiva
Montaje de equipos y ensamble de unidades	No rutinaria	Generación de residuos convencionales y residuos peligrosos	Alteración en la calidad del recurso hídrico

Cuadro 21. (Continuación)

		Generación y emisión de ruido	Contaminación de los recursos naturales
Instalación de sistemas eléctricos y de control	No rutinaria	Generación de residuos convencionales y residuos peligrosos	Alteración de niveles de ruido-contaminación auditiva
		Generación y emisión de ruido	Contaminación de los recursos naturales
Funcionamiento hidráulico y de bombeo	Rutinaria	Consumo de energía	Alteración de niveles de ruido-contaminación auditiva
		Consumo de agua almacenada	Agotamiento de recurso-alto consumo energético
		Vertimiento agua residual	Agotamiento de recurso hídrico
		Derrames y fugas de agua residual	Contaminación recurso hídrico
Generación de energía mecánica y eléctrica en la turbina a gas refrigerante sobrecalentado	Rutinaria	Liberación de fluido por perdidas en accesorios	Contaminación atmosférica
		Acumulación de partículas de fluido en suelo	Contaminación atmosférica
		Generación y emisión de ruido	Cambio en las propiedades del suelo-erosión de suelo
Proceso de condensación	Rutinaria	Fugas de fluido residual	Alteración de niveles de ruido-contaminación auditiva

Fuente: elaboración propia.

5.1.3 Matriz de impacto ambiental. En base a estos criterios y aspectos establecidos se realiza la matriz de impacto ambiental que se sitúa en el anexo D.

Teniendo en cuenta la cuantificación de los aspectos e impactos ambientales determinados en dicha matriz, se pudo analizar la magnitud y significancia del impacto que generan las actividades directas e indirectas que influyen en el proceso específico del ciclo Rankine orgánico con la fase operativa de la turbina y la inclusión del fluido refrigerante R-134a. A continuación, se presenta la evaluación ambiental con relación a las actividades del proceso y los aspectos ambientales generados.

- Construcción de obras civiles. Según la cuantificación de la matriz de aspectos e impactos ambientales se puede observar que la puntuación más alta se dio en los aspectos de generación de residuos y generación de emisiones atmosféricas (material particulado y gases); debido a que en esta actividad se generan

procesos de acondicionamiento de terreno, obras civiles que involucra la generación de residuos convencionales, residuos de construcción y residuos peligrosos por toneladas que deberán ser tratados de manera óptima para su disposición cumpliendo con la legislación ambiental aplicable, según la evaluación cuantitativa de este aspecto se pudo determinar una significancia baja pero teniendo en cuenta medidas de intervención para controlar el impacto que genera en cuanto al agotamiento y alteración en los recursos naturales si se le otorga un inadecuado manejo y disposición de los mismos y un efecto de presión en los rellenos sanitarios.

En cuanto al aspecto ambiental generación de emisiones atmosféricas (material particulado y gases), se pudo analizar desde el punto de vista de la remoción de suelo para el acondicionamiento del terreno y la acumulación de material en la atmósfera que se genera por el destino y transporte de las partículas, además del constante tránsito de maquinaria pesada que emite contaminantes criterio por el proceso de combustión entre los cuales se pueden generar emisiones de (material particulado, NOx, CO, SOx, entre otros); teniendo en cuenta la evaluación en la matriz se presenta como un indicativo de impacto ambiental bajo pero que requiere intervención y control dentro de la fase del proyecto.

- Montaje de equipos, ensamble de unidades e instalación de sistemas eléctricos y control. Teniendo en cuenta la evaluación de la matriz de aspectos e impactos ambientales se observó una intervención no significativa ambientalmente ya que no requiere la implementación de medidas inmediatas.
- Funcionamiento hidráulico y de bombeo. Se pudo observar según la evaluación de la matriz de aspectos e impactos ambientales que estos presentan una significancia baja pero con la necesidad de tomar medidas de intervención de manejo ambiental en cuanto a minimizar los impactos ambientales que posiblemente se pueden generar en el recurso suelo y recurso hídrico, debido a la probabilidad de vertimientos de agua residual de proceso y a fugas o derrames que se puedan presentar por fallas mecánicas o pérdidas en accesorios que alteren la calidad de los recursos, sin embargo debido a las características fisicoquímicas de los insumos del proceso como lo es el refrigerante R-134 a, el cual presenta baja solubilidad en agua, sin embargo, según la resolución 01101 de 2017 emitida por la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA)⁶², no es fácilmente biodegradable tanto en suelo como en agua con una tasa del 3% después de 28 días, es prácticamente no bioacumulable y presenta baja toxicidad.

⁶² COLOMBIA; Grupo de Diarios América. AUTORIDAD NACIONAL DE LICENCIAS AMBIENTALES ANLA. .No. 01101. (Sep 11,). Por la cual se otorga licencia ambiental para la actividad de importación de las sustancias refrigerante R.22 (HCFC-22) y R-134^a (HCF-134a) y se toman otras determinaciones.Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible. Bogotá D.C., 2017. 31 p.

- Generación de energía mecánica y eléctrica en la turbina a gas refrigerante sobrecalentado. Se pudo determinar una significancia baja, pero con la necesidad de implementar medidas de intervención operacionales y de control en el aspecto de generación de emisiones atmosféricas, que puedan generar un efecto en la calidad del recurso aire. La propuesta de la inclusión del refrigerante R-134 a, resulta ambientalmente sostenible teniendo en cuenta que su capacidad de deterioro a la capa de ozono estratosférico es nula, sin embargo, puede llegar a tener incidencia en el calentamiento global a una tasa alta de exposición en el ambiente, debido a que cuenta con un potencial de calentamiento global (GWP) de 0.26, así mismo presenta una degradación en altas cantidades del 3% después de 28 días según la resolución 01101 de 2017 emitida por la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA)⁶³.

Se puede analizar que tanto el proceso ORC como generador de energía eléctrica y la inclusión del refrigerante R-134a como fluido de trabajo, resulta una alternativa ecosostenible teniendo en cuenta que según Amat⁶⁴, algunas de las ventajas de los ORC son: bajo mantenimiento, sistemas compactos y poco ruidosos, no genera emisiones (salvo en caso de fuga del fluido de trabajo), en comparación con otros fluidos que por sus características fisicoquímicas son difícilmente biodegradables, con alto potencial de efecto invernadero, afectación a la capa de ozono y generan alteración importante en los recursos naturales.

5.2 ANÁLISIS DE COSTOS

El análisis de costos de este proyecto se divide en tres factores que permiten evaluar el valor total de la turbina, primero se analizan los materiales requeridos para la fabricación de la turbina, posteriormente, la fabricación de la misma y por último costos de diseño e ingeniería.

⁶³ COLOMBIA; Grupo de Diarios América. AUTORIDAD NACIONAL DE LICENCIAS AMBIENTALES ANLA. .No. 01101. (Sep 11,). Por la cual se otorga licencia ambiental para la actividad de importación de las sustancias refrigerante R.22 (HCFC-22) y R-134^a (HCF-134a) y se toman otras determinaciones.Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible. Bogotá D.C., 2017. 31 p.

⁶⁴ AMAT-ALBUIXECH,Marta. Desarrollo De Un Modelo De Ciclo Orgánico Rankine. Ejemplo De Aplicación Para Análisis De Fluidos De Trabajo De Bajo Potencial De Efecto Invernadero. [en línea]. Universitat Jaume I, España: 2017. [Consultado Junio 11, 2020]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10234/170068>.

Cuadro 22. Costos de materiales

MATERIALES					
ITEM	DESCRIPCIÓN	CANT	UND	PRECIO UNIT	PRECIO TOTAL
1	Sistema dinámico				
1.1	Alabe C	0,00983	kg	\$ 15.000	\$ 147
1.2	Alabe C'	0,00964	kg	\$ 15.000	\$ 145
1.3	Alabe E	0,00961	kg	\$ 15.000	\$ 144
1.4	Alabe E'	0,00942	kg	\$ 15.000	\$ 141
1.5	Alabe F	0,00938	kg	\$ 15.000	\$ 141
1.6	Alabe F'	0,00919	kg	\$ 15.000	\$ 138
1.7	Alabe H	0,00915	kg	\$ 15.000	\$ 137
1.8	Alabe H'	0,00897	kg	\$ 15.000	\$ 135
1.9	Rodete 1	12	kg	\$ 15.000	\$ 180.000
1.10	Rodete 2	11,56	kg	\$ 15.000	\$ 173.400
1.11	Diafragma 1	10,67	kg	\$ 9.550	\$ 101.899
1.12	Diafragma 1.1	10,87	kg	\$ 9.550	\$ 103.809
1.13	Diafragma 2	10,24	kg	\$ 9.550	\$ 97.792
1.14	Diafragma 2.1	10,46	kg	\$ 9.550	\$ 99.893
1.15	Buje QD-SK	2	UND	\$ 154.200	\$ 308.400
		SUBTOTAL			\$ 1.066.320
2	Sistema de alimentación				
2.1	Anillo	37,45	kg	\$ 9.550	\$ 357.648
		SUBTOTAL			\$ 357.648
3	Sistema estructural				
3.1	Carcasa superior	49,1	kg	\$ 9.550	\$ 468.905
3.2	Carcasa inferior	64	kg	\$ 9.550	\$ 611.200
3.3	Perno V7 ¾" x 4½"	20	UND	\$ 3.800	\$ 76.000
3.4	Perno ½" x 2"	4	UND	\$ 3.200	\$ 12.800
3.5	Perno ½" x 1 5/8"	16	UND	\$ 1.800	\$ 28.800
3.6	Perno M8 X 30	20	UND	\$ 500	\$ 10.000
3.7	Loctite 5/18 (300 ml)	1	UND	\$ 300.000	\$ 300.000
3.8	Soporte L	14,82	kg	\$ 9.550	\$ 141.531
3.9	Soporte R	16,01	kg	\$ 9.550	\$ 152.896
		SUBTOTAL			\$ 1.802.132
4	Sistema de potencia				
4.1	Rotor	3,05	kg	\$ 9.550	\$ 29.128
4.2	Rodamientos de Bola (6205-2Z)	1	UND	\$ 24.000	\$ 24.000

Cuadro 22. (Continuación)

4.3	Rodamientos de Rodillos (NU-205-ECP)	1	UND	\$ 140.000	\$ 140.000
4.4	Retenedores	2	UND	\$ 40.000	\$ 80.000
4.5	Sellos laberinticos	2	UND	\$ 3.000.000	\$ 6.000.000
4.6	Pines seeger	2	UND	\$ 1.500	\$ 3.000
		SUBTOTAL			\$ 6.276.128
5	Sistema de control				
5.1	PLC S7-1200	1	UND	\$ 2.300.000	\$ 2.300.000
5.2	Virador	1	UND	\$ 1.250.000	\$ 1.250.000
5.3	Botón ON/OFF	2	UND	\$ 59.500	\$ 119.000
5.4	Botón de emergencia	1	UND	\$ 41.650	\$ 41.650
5.5	Alarma de emergencia	1	UND	\$ 202.300	\$ 202.300
5.6	Válvula de regulación	1	UND	\$ 4.000.000	\$ 4.000.000
5.7	Válvula de alivio	1	UND	\$ 4.000.000	\$ 4.000.000
5.8	Voltímetro	1	UND	\$ 19.000	\$ 19.000
5.9	Manómetro	1	UND	\$ 226.000	\$ 226.000
5.10	Tacómetro	1	UND	\$ 730.000	\$ 730.000
5.11	Caja Botonera	1	UND	\$ 83.300	\$ 83.300
5.12	Presostato	1	UND	\$ 2.760.000	\$ 2.760.000
5.13	Sensor de Velocidad	1	UND	\$ 535.500	\$ 535.500
5.14	Termocupla	1	UND	\$ 178.500	\$ 178.500
5.15	Sensor de Desplazamiento	1	UND	\$ 8.067.500	\$ 8.067.500
		SUBTOTAL			\$ 24.512.750
		TOTAL			\$ 34.014.976

Fuente: elaboración propia.

Cuadro 23. Costos de fabricación

FABRICACIÓN					
ITEM	DESCRIPCIÓN	CANT	UND	PRECIO UNIT	PRECIO TOTAL
1	Mecanizado del eje	16	Hora	\$ 30.000	\$ 480.000
2	Fundición de Aluminio 60-61 T6 para la fabricación de los rodetes	35	kg	\$ 22.000	\$ 766.814
3	Fundición de Acero 4130 para la elaboración de la carcasa	227	kg	\$ 15.500	\$ 3.513.385
4	Soldadura para los soportes	3	Hora	\$ 15.000	\$ 45.000
5	Pintura general	1	GL	\$ 300.000	\$ 300.000
6	Fundición a la cera perdida para la elaboración de álabes	632	UND	\$ 5.000	\$ 3.160.000
TOTAL					\$ 8.265.199

Fuente: elaboración propia.

Cuadro 24. Costos de Ingeniería

INGENIERÍA					
ITEM	DESCRIPCIÓN	CANT	UND	PRECIO UNIT	PRECIO TOTAL
1	DISEÑO				
1.1	Diseño	1	GL	\$ 5.000.000	\$ 5.000.000
1.2	Software	1	GL	\$ 1.000.000	\$ 1.000.000
1.3	Equipos	1	GL	\$ 500.000	\$ 500.000
SUBTOTAL					\$ 6.500.000
2	FUNGIBLES				
2.1	Transportes	1	GL	\$ 200.000	\$ 200.000
2.2	Papelería	1	GL	\$ 200.000	\$ 200.000
2.3	Otros	1	GL	\$ 150.000	\$ 150.000
SUBTOTAL					\$ 550.000
TOTAL					\$ 7.050.000

Fuente: elaboración propia.

Cuadro 25. Costo total de una turbina a gas refrigerante sobrecalentado

TURBINA A GAS REFRIGERANTE SOBREALENTADO		
ITEM	DESCRIPCIÓN	PRECIO TOTAL
1	Materiales	\$ 34.014.976
2	Fabricación	\$ 7.498.385
3	Ingeniería	\$ 7.050.000
	TOTAL	\$ 48.563.361

Fuente: elaboración propia.

Por otro lado, se realiza un análisis de los valores comerciales de una turbina de vapor con el fin de realizar una comparación entre estos y la turbina a gas refrigerante sobrecalentado. No obstante, actualmente en el mercado se encuentran disponibles turbinas de una potencia de 300kW, siendo este el punto de análisis para comparar los valores comerciales teniendo en cuenta que la turbina objeto de estudio es de una potencia de 211kW, de este modo, se garantiza que las turbinas comerciales cumplan con las especificaciones de esta propuesta.

Cuadro 26. Costos de una turbina de vapor comercial en USD

TURBINA DE VAPOR		
ITEM	DESCRIPCIÓN	PRECIO TOTAL
1	Turbina de vapor DONGTURBO ELECTRIC COMPANY, LTD. 300kW	USD \$ 67.000
2	Turbina de vapor NCON TURBO TECH 300kW	USD \$ 65.000
3	Turbina de vapor ANHUI XINNING ENERGY TECHNOLOGY CO. LTD 300kW	USD \$ 58.927

Fuente: elaboración propia.

Los precios comerciales de estas turbinas de vapor están dados en dólares, para realizar la comparación en pesos colombianos (COP), se tiene en cuenta el valor del dólar a la fecha de elaboración de este proyecto y se realiza una breve aproximación.

Cuadro 27. Costos de una turbina de vapor comercial en COP

TURBINA DE VAPOR		
ITEM	DESCRIPCIÓN	PRECIO TOTAL
1	Turbina de vapor DONGTURBO ELECTRIC COMPANY, LTD. 300kW	\$ 253.000.000
2	Turbina de vapor NCON TURBO TECH 300kW	\$ 246.000.000
3	Turbina de vapor ANHUI XINNING ENERGY TECHNOLOGY CO. LTD 300kW	\$ 223.000.000

Fuente: elaboración propia.

Una vez determinados los valores para la turbina a gas refrigerante sobrecalentado y obtenido los de una turbina de vapor comercial, se realiza el respectivo análisis que concluye en que la turbina desarrollada en este proyecto es financieramente viable ya que su valor es inferior, lo cual es una buena alternativa para la generación de energía en un pozo petrolero del campo Caño Limón.

6. APORTES DEL PROYECTO

A partir de la propuesta planteada en el presente proyecto se identifican ciertos beneficios los cuales permiten tener un control sobre las problemáticas identificadas; lo anterior se representa en el cuadro 33.

Cuadro 28. Beneficios del proyecto

PROBLEMÁTICA	BENEFICIOS DEL PROYECTO
El agua residual que proviene de la extracción del petróleo se desaprovecha y genera un impacto ambiental negativo debido al funcionamiento de los motores Diesel.	Todo el proceso es ecosostenible gracias a que se aprovecha el agua residual, se sustituyen los generadores eléctricos por el ORC y se incluye el refrigerante R134a como fluido de trabajo.
Para implementar una turbina comercial el refrigerante R134a no es el indicado, se disminuye la eficiencia y no sería óptimo teniendo en cuenta la baja potencia que ofrece dicho fluido.	La turbina requiere un diseño propio teniendo en cuenta el fluido de trabajo, donde se aprovecha al máximo los parámetros de entrada dadas las características del fluido residual.
Se requiere de un gasto frecuente de combustible, transporte, almacenamiento, entre otros, para el funcionamiento de los generadores eléctricos.	El diseño propuesto de la turbina es autosostenible basados en la fuente de alimentación ya que no hay pérdida de fluido en el ciclo del cual hace parte.

Fuente: elaboración propia.

7. CONCLUSIONES

- Las turbinas de vapor se dividen en sistemas que permiten el funcionamiento de esta, tales como el sistema de alimentación, dinámico, de potencia, estructural, de control, lubricación y de refrigeración; cada uno de ellos posee sus respectivos elementos que han sido identificados con el fin de establecer la composición de la turbina objeto de estudio de este proyecto.

De igual manera las turbinas de vapor se clasifican según criterio tal como lo es la forma de aprovechamiento, el número de etapas, la dirección del flujo de vapor, si hay o no extracción del vapor antes del escape, y finalmente según la presión de salida del vapor.

- Se establece el diseño conceptual y el tipo de turbina a diseñar según algunos parámetros relevantes, por medio una matriz de priorización se determina la mejor alternativa entre las diferentes configuraciones con el fin de establecer las características de la turbina a gas refrigerante sobrecalentado, de este modo, se establece que la turbina a diseñar será multietapa, de acción, con dirección de flujo axial, sin extracción de vapor y a contrapresión; sistema de alimentación por cámara-disco, salida de vapor por ducto, sistema de control por PLC, sistema dinámico mediante rueda con álabes y el sistema estructural mediante soportes.

Posteriormente se determinan los parámetros de diseño e ingeniería como lo son las propiedades termodinámicas del fluido y la normativa guía que rige el diseño de una turbina de vapor.

- Determinados los componentes relevantes de una turbina y las propiedades termodinámicas del fluido, se realiza el diseño de cada uno de estos elementos cumpliendo con las condiciones requeridas para un óptimo funcionamiento sin la presencia de falla alguna, comprobado mediante un análisis matemático y en algunos casos por elementos finitos.

Se determina que la potencia máxima es de $211,41 \text{ kW}$ teniendo en cuenta las condiciones del fluido, esta potencia es suficiente para suplir el requerimiento de la bomba del sistema BES (256 HP) con un respectivo factor de seguridad del 10% estimando sobrecargas en el sistema.

- Se establecen manuales de ensamble, operación, mantenimiento y seguridad que soportan el diseño de la turbina a gas refrigerante sobrecalentado, de este modo se garantiza el correcto funcionamiento y se da cumplimiento con la normatividad establecida para darle al usuario las herramientas y/o elementos necesarios para una adecuada operación de la máquina.

- Un sistema de generación de energía como lo es un ORC y la inclusión del refrigerante R-134a como fluido de trabajo resultan una alternativa ecosostenible teniendo en cuenta este tiene propiedades adecuadas para no generar un impacto negativo en el ambiente y en la capa de ozono, como también que en este proceso hay un aprovechamiento de agua residual producida en la extracción del petróleo.

La turbina a gas refrigerante sobrecalentado resulta una propuesta financieramente viable debido a que su costo es de \$48.563.361, este es considerablemente inferior en comparación a una turbina de vapor comercial cuyo valor promedio es de \$240.000.000, es decir, resulta una alternativa útil como generación de energía en un pozo petrolero del campo Caño Limón.

8. RECOMENDACIONES

- La demanda energética de un pozo petrolero es alta en comparación a lo producido en la turbina diseñada, sin embargo, pensando en una fuente de generación ecosostenible como lo es este proyecto, se propone una configuración en paralelo de 3 turbinas donde se lograría cumplir con la demanda del pozo; por otro lado, también se propone incrementar el flujo másico suministrado, con el fin de aumentar las velocidades del fluido, sin embargo, requeriría un rediseño de la máquina.
- La propuesta del ORC como generación de energía requiere de una fuente de gas refrigerante sobrecalentado, para ello es indispensable el diseño de un intercambiador de calor donde se aproveche el agua residual de la extracción de petróleo y este fluido lleve el refrigerante al estado requerido, teniendo en cuenta que se tiene un flujo másico establecido.
- A lo largo del diseño se puede observar la precisión en las dimensiones de cada elemento, por ende, para una posible construcción de la máquina, es de suma importancia que estas dimensiones sean respetadas milimétricamente.
- Tener en cuenta las recomendaciones planteadas en el diseño y los diferentes manuales permitirán una adecuada operación y vida útil de la máquina como también la seguridad y bienestar de quien la opere. INTERMEC Catálogo de productos. INTERMEC. [en línea]. Colombia. [Consultado Mayo 27, 2020]. Disponible en: https://www.intermec.com.co/pdf/Dimensiones_Bujes_QD.pdf

BIBLIOGRAFÍA

ALDANA-DOMÍNGUEZ, Juanita, et al. Dinámica y estructura de la población de chigüiros (*hydrochaeris hydrochaeris*: Rodentia, hydrochaeridae) de caño limón, arauca, colombia. CALDASIA. [en línea]. 2012. Disponible en: <http://www.bdigital.unal.edu.co/37600/>.

AMAT-ALBUIXECH, Marta. Desarrollo de un modelo de ciclo orgánico rankine. ejemplo de aplicación para análisis de fluidos de trabajo de bajo potencial de efecto invernadero. [en línea]. Universitat Jaume I, España: 2017.

API STD 611. General-purpose steam turbines for petroleum, chemical, and gas industry services. General API. [en línea]. US. 2008., [Consultado Mar 02, 2020]. Disponible en: https://global.ihs.com/doc_detail.cfm?gid=PAKPCCAAAAAAAAAAAAA&input_doc_number=API STD 611.

API STD 612. Petroleum, petrochemical, and natural gas industries-steam turbines-special-purpose applications. Energy API. [en línea]. US. 2014., [Consultado Mar 02, 2020]. Disponible en: https://global.ihs.com/doc_detail.cfm?gid=ZFXJIFAAAAAAAAAAAA&input_doc_number=API STD 612.

ARL SURA. Identificación y control de los agentes de riesgo en el lugar de trabajo. ARL SURA. [en línea]. Colombia. 2015., pp. 15. [Consultado Jun 12, 2020]. Disponible en: https://www.arlsura.com/files/identificacion_control_riesgo.pdf.

ASME Boiler and Pressure Vessel Committee. Subcommittee on Pressure Vessels. ASME boiler and pressure vessel code. section VIII, rules for construction of pressure vessels. division 1 / ASME boiler and pressure vessel committee, subcommittee on pressure vessels. The American Society of Mechanical Engineers. New York (State). 2019., pp. 796. [Consultado May 7, 2020], [catálogo].

ASTM International. A322-13. standard specification for steel bars, alloy, standard grades. ASTM International. U.S. 2020., pp. 4. [Consultado Abril 16, 2020], [catálogo].

COLOMBIA; Grupo de Diarios América. AUTORIDAD NACIONAL DE LICENCIAS AMBIENTALES ANLA. . No. 01101. (Sep 11,). Por la cual se otorga licencia ambiental para la actividad de importación de las sustancias refrigerante R.22 (HCFC-22) y R-134^a (HCF-134a) y se toman otras determinaciones. Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible. Bogotá D.C. 2017. 31 p.

BI, Zhuming; PILKEY, Walter D. y PILKEY, Deborah F. Peterson's stress concentration factors. 3rd ed. US: John Wiley & Sons, Incorporated, 2007. 555 p. ISBN 1119532515

BLOCH, Heinz P. y SINGH, Murari P. Steam turbines : Design, applications, and rerating. 2nd ed. U.S.: McGraw Hill, 2009.

BUDYNAS, Richard G. y NISBETT, J. Keith. Diseño en ingeniería mecánica de shigley. 9th ed. México, D.F: McGraw-Hill Interamericana, 2012. 1065 p.

CASAS RIVERA, Gerardo Andrés y GIRALDO GÓMEZ, Herbert. Método de priorización para la identificación de los parámetros determinantes que generan los cambios de gran magnitud en los proyectos de construcción. DEARQ. [en línea]. 2014. (No. 14)., pp. 224-235. Disponible en: <https://doaj.org/article/306a3a5f2cb64f4884b2d6b9000643f1>.

ÇENGEL, Y. y BOLES, M. Thermodynamics an engineering approach. 8th ed. New York: McGraw Hill Education, 2015. 1115 p. ISBN 978-0-07-339817-4

CHEN, Huijuan; GOSWAMI, D. Yogi y STEFANAKOS, Elias K. A review of thermodynamic cycles and working fluids for the conversion of low-grade heat. RENEWABLE AND SUSTAINABLE ENERGY REVIEWS. [en línea]. 2010. Vol. 14. (No. 9)., pp. 3059-3067. [Consultado Feb 13, 2020]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.006>.

DÍAZ CESPEDES, Leonardo. Análisis comparativo del consumo energético y económico con la implementación de motores de inducción vs motores pmm en los sistemas BES. [en línea]. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga: 2016. DRESSER RAND. Instruction manual for single stage 350, 500, and 700 frame steam turbines. Dresser Rand. Ohio. 2011., pp. 523. [Consultado Mar 03, 2020], [catálogo].

DUPONT SUVA REFRIGERANTES. HFC-134a propiedades, usos, almacenamiento y manipulación. Nature Biotechnology. [en línea]. Ecuador. 2014., pp. 596. [Consultado Feb 18, 2020]. 1087-0156 Disponible en: <http://www.refecol.com.ec/wp-content/uploads/2015/02/FichaTecnica-SUVA-R134a-Dupont.pdf>.

ELLIOT GROUP. YR steam turbines. Ebara corporation. [en línea]. Estados Unidos. 2015., [Consultado Feb, 2020]. Disponible en: <https://www.elliott-turbo.com/Files/Admin/Literature/TUR.3001.1115---YR-Steam-Turbines.pdf>.

ELLIOTT GROUP. Dyrhh steam turbine. Ebara Corporation. [en línea]. Estados Unidos. 2016., pp. 2. [Consultado Feb, 2020]. Disponible en: <https://www.elliott-turbo.com/Files/Admin/Literature/Literature%20Updates%20July%202018/dyrhh-steam-turbine.pdf>.

ENERGIZA.ORG. Especial turbinas de vapor. Renovetec. [en línea]. España. 2011., [Consultado Feb 10, 2020]. Disponible en: <http://www.energiza.org/anteriores/energizadiciembre2011.pdf>.

FERREIRA DA SILVA, Ricardo y ANK DE MORAIS, Willy. Estudo da falha em palheta de uma turbina a vapor geradora de energía. [en línea]. 2017. Vol. 6. (No. 1)., [Consultado Feb 03, 2020]. Disponible en: <http://periodicos.unisanta.br/index.php/sat>. FLITNEY, Robert. Seals and sealing handbook. 6th ed. GB: Butterworth Heinemann, 2014.

FREON. Tables of chemical thermodynamic properties refrigerant R134a. Chemours. [en línea]. Washington. 2018., pp. 52. Disponible en: shorturl.at/fkB79. GASSERVEI. Ficha técnica R-450a. Gasservei. [en línea]. España. pp. 3. [Consultado Feb, 2020]. Disponible en: www.gas-servei.com.

HALLIBURTON. Halliburton electric submersible pumps, motors and protectors. Netwise Manufacturing Industry Company Reports. [en línea]. Boca Raton. 2012., [Consultado Feb 20, 2020]. Disponible en: <https://search.proquest.com/docview/1966789021>.

HC ENERGÍA. Manual de prevención de riesgos laborales. HC ENERGÍA. [en línea]. Madrid. 2007., pp. 149. [Consultado Jun 12, 2020]. Disponible en: https://www.hcenergia.com/recursos/doc/Colaboradores/Proveedores/Documentacion_general/1342400294_712009131049.pdf.

HYUNDAI. Steam turbine type SSH MSS CSH HGS. South Korea. 2010., pp. 8. [Consultado Feb 25, 2020], [catálogo].

ICONTEC. Compendio de dibujo técnico. ICONTEC. [en línea]. Colombia. 2002., Disponible en: https://www.academia.edu/14955997/NTC_Compendio_de_Dibujo_Tecnico.

ICONTEC. Norma técnica colombiana 6166. ICONTEC. [en línea]. Colombia. 2016., [Consultado Agosto, 2020].

ICONTEC. Norma técnica colombiana 1486. ICONTEC. [en línea]. Colombia. 2018., pp. 14. [Consultado Agosto, 2020]. Disponible en: http://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portallG/home_15/recursos/01_general/09062014/n_icontec.pdf.

ICONTEC. Norma técnica colombiana NTC 1486. ICONTEC. [en línea]. Colombia. 2019., pp. 14. [Consultado Feb, 2020]. Disponible en: http://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portallG/home_15/recursos/01_general/09062014/n_icontec.pdf.

INSTITUTO DISTRITAL DE GESTIÓN DE RIESGOS Y CAMBIO CLIMATICO. Guía técnica para la identificación de aspectos e impactos. INSTITUTO DISTRITAL DE GESTIÓN DE RIESGOS Y CAMBIO CLIMATICO. [en línea]. Colombia. 2015., pp. 15. [Consultado junio 10,2020]. Disponible en: <https://www.idiger.gov.co/documents/20182/297947/PLE-GU-01+Guia+Para+la+Identificacion+de+Aspectos+e+Impactos+Amb+V3.pdf/db462a5d-9133-4248-aa1d-422b2d9a105c>.

INTERMEC. Catálogo de productos. INTERMEC. [en línea]. Colombia. [Consultado Mayo 27, 2020]. Disponible en: https://www.intermec.com.co/pdf/Dimensiones_Bujes_QD.pdf.

LEÓN, Juan. Diseño y cálculo de recipientes a presión. Ingeniería León. [en línea]. México. 2001., pp. 190. [Consultado Mayo 7, 2020]. Disponible en: https://www.academia.edu/7116276/Dise%C3%B1o_y_C%C3%A1lculo_de_Recipientes_a_Presi%C3%B3n.

MCCONKEY, A. y EASTOP, T. Applied thermodynamics for engineering technologists. 5th ed. India: Pearson education, 2009. 307-366 p. ISBN 978-81-7758-238-3

MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Boletín ozono. [en línea]. Bogotá. 2010., pp. 16. 24 [ConsultadoFeb, 2020]. Disponible en: http://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/Boletines_de_Ozono/boletin_ozono_24.pdf.

MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. HFC-134a. [en línea]. Bogotá. 2020., pp. 1. 8141-2_00579 [ConsultadoMar 10, 2020].
MINISTERIO DE SALUD Y PROTECCIÓN SOCIAL. Programa de elementos de protección personal, uso y mantenimiento. [en línea]. Bogotá, Colombia. 2017., pp. 47. [ConsultadoJun 12, 2020]. Disponible en: <https://www.minsalud.gov.co/Ministerio/Institucional/Procesos%20y%20procedimientos/GTHS02.pdf>.

NEMA. Steam turbines for mechanical drive service. Butterworth Heinemann. [en línea]. US. 2002., [Consultado Mar 03, 2020]. Disponible en: [https://ebookcentral.proquest.com/lib/\[SITE_ID\]/detail.action?docID=1823234](https://ebookcentral.proquest.com/lib/[SITE_ID]/detail.action?docID=1823234).

NORTON, Robert. Diseño de máquinas. 4th ed. México: Pearson Educación de México, SA de CV, 2011. 888 p. ISBN 9786073205894

ROY, J. P.; MISHRA, M. K. y MISRA, Ashok. Parametric optimization and performance analysis of a waste heat recovery system using organic rankine cycle. ENERGY. [en línea]. 2010. Vol. 35. (No. 12)., pp. 5049-5062. [Consultado Feb 16, 2020]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2010.08.013>.

SCHLUMBERGER. Oilfield review. Schlumberger. [en línea]. 2015., Disponible en: https://connect.slb.com/~media/Files/resources/oilfield_review/spanish15/sept15/composite.pdf.

SCHLUMBERGER. REDA electric submersible pump systems technology catalog. Schlumberger. [en línea]. Houston. 2017., pp. 362. [Consultado Feb 20, 2020]. Disponible en: <https://www.slb.com/~media/files/al/catalog/artificial-lift-esp-technology-catalog.ashx>.

SKF. Retenes y soluciones en sellado SKF. REOP - Revista Española de Orientación y Psicopedagogía. [en línea]. 2011., pp. 21. 1139-7853 Disponible en: https://www.skf.com/binary/87-133001/31.6373%2001-21%20es%20_tcm_87-133001.pdf.

SKF. Catálogo de rodamientos SKF. [en línea]. 2015., [Consultado mayo 01, 2020]. Disponible en: https://www.skf.com/binary/76-121486/0901d19680416953-10000_2-ES---Rolling-bearings.pdf.

SKINNER POWER SYSTEMS. Instruction and maintenance manual 'S-series turbine'. US. pp. 49. [Consultado Mar 05, 2020], [catálogo].

SUMMIT ESP LLC. Reliable, durable, and efficient electric submersible pumping and horizontal pumping system technology. Netwise Manufacturing Industry Company Reports. [en línea]. Boca Raton. 2019., [Consultado Feb 20, 2020]. Disponible en: https://www.halliburton.com/content/dam/ps/public/artificial_lift/contents/Brochures/web/summit-esp-combined-products.pdf.

UNEP. Montreal protocol on substances that deplete the ozone layer: 2014 report of the refrigeration, air conditioning and heat pumps technical options committee. UNEP. [en línea]. 2015. Vol. 1. pp. 244. [Consultado Feb, 2020]. Disponible en: <http://conf.montreal-protocol.org/meeting/mop/mop-27/presession/Background%20Documents%20are%20available%20in%20English%20only/RTOC-Assessment-Report-2014.pdf>.

VÉLEZ, Fredy; CHEJNE, Farid y QUIJANO, Ana. Thermodynamic analysis of R134a in an organic rankine cycle for power generation from low temperature sources. DYNA. [en línea]. 2014. Vol. 81. (No. 185)., pp. 153-159. [Consultado Feb 16, 2020]. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0012-73532014000300021&lng=en&tlng=en.

ANEXOS

ANEXO A.
MATRIZ DE PRIORIZACIÓN PARA LA SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS

En el capítulo 2 se hace establece como método de evaluación la matriz de priorización para la selección de alternativas, con el fin de determinar las características de los sistemas que poseerá el diseño objeto de estudio de este proyecto.

Cuadro 29. Matriz de priorización para la selección del sistema de alimentación

Opción Criterio	Eficiencia	Peso	Total	Fabricación	Peso	Total	Costos	Peso	Total	Mantenimiento	Peso	Total	TOTAL
Cámara-Tobera	4	35%	1,4	4	30%	1,2	3	20%	0,6	4	15%	0,6	3,8
Tobera	3	35%	1,05	3	30%	0,9	3	20%	0,6	3	15%	0,45	3
Cámara- Disco	5	35%	1,75	4	30%	1,2	2	20%	0,4	4	15%	0,6	3,95

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 30. Matriz de priorización para la selección de la salida del fluido

Opción Criterio	Eficiencia	Peso	Total	Fabricación	Peso	Total	Costos	Peso	Total	Mantenimiento	Peso	Total	TOTAL
Ducto directo	3	35%	1,05	3	30%	0,9	4	20%	0,8	4	15%	0,6	3,35
Ducto en semicírculo	5	35%	1,75	3	30%	0,9	2	20%	0,4	3	15%	0,45	3,5

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 31. Matriz de priorización para la selección del sistema de control

Opción Criterio	Eficiencia	Peso	Total	Implementación	Peso	Total	Costos	Peso	Total	Mantenimiento	Peso	Total	TOTAL
PLC	5	35%	1,75	4	30%	1,2	2	20%	0,4	3	15%	0,45	3,8
Mecánico	3	35%	1,05	2	30%	0,6	3	20%	0,6	4	15%	0,6	2,85
Integrados cerrados	4	35%	1,4	3	30%	0,9	3	20%	0,6	5	15%	0,75	3,65

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 32. Matriz de priorización para la selección del sistema dinámico

Opción Criterio	Eficiencia	Peso	Total	Fabricación	Peso	Total	Costos	Peso	Total	Mantenimiento	Peso	Total	TOTAL
Rueda con álabes	5	35%	1,75	4	30%	1,2	4	20%	0,8	4	15%	0,6	4,35
Corona de álabes	4	35%	1,4	3	30%	0,9	2	20%	0,4	3	15%	0,45	3,15
Corona de álabes de medio cuerpo	4	35%	1,4	2	30%	0,6	3	20%	0,6	3	15%	0,45	3,05

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 33. Matriz de priorización para la selección del sistema estructural

Opción Criterio	Eficiencia	Peso	Total	Fabricación	Peso	Total	Costos	Peso	Total	Mantenimiento	Peso	Total	TOTAL
Soportes estructurales	3	35%	1,05	5	30%	1,5	4	20%	0,8	5	15%	0,75	4,10
Base estructural	4	35%	1,40	3	30%	0,9	2	20%	0,4	5	15%	0,75	3,45
Soporte placa base	3	35%	1,05	4	30%	1,2	3	20%	0,6	4	15%	0,6	3,45

Fuente: Elaboración propia.

**ANEXO B.
RESULTADOS ANÁLISIS DINÁMICO (ÁLABES)**

El análisis dinámico en los álabes realizado en el capítulo 3, es explícito mediante los siguientes cuadros en donde se replica las operaciones desarrolladas, de este modo, obtener el comportamiento del fluido en todas las etapas de la turbina.

Cuadro 34. Resultados análisis dinámico de álabes parte 1

Etapa	Tipo	α_e (°)	β_s (°)	λ (°)	Ω (°)	δ (°)	φ (°)	ξ (°)	Vb (m/s)	Vae (m/s)	nf	Vas (m/s)	Vre (m/s)	Vaex (m/s)
1	M	30	20	60	49,1	9,8	150,2	60,2	193,06	445,85	0,87	386,11	294,90	222,92
	F	20	29,5	70	37,9	16,4	134,1	44,1	193,06	386,11	0,87	336,06	215,09	132,06
2	M	29,5	19,3	60,5	31,0	12,6	148,1	58,1	193,06	336,06	0,87	292,49	193,06	165,48
	F	19,3	29	70,7	49,4	21,5	129,5	39,5	193,06	292,49	0,87	255,82	127,41	96,67
3	M	29	18,6	61	13,9	16,0	145,4	55,4	193,06	255,82	0,87	223,74	127,76	124,02
	F	18,6	28,5	71,4	75,1	27,9	123,6	33,6	193,06	223,74	0,88	196,63	73,85	71,36
4	M	28,5	17,9	61,5	12,2	20,1	142,0	52,0	193,06	196,63	0,88	172,80	95,98	93,82
	F	17,9	28	72,1	61,7	36,4	115,6	25,6	193,06	172,80	0,88	152,57	60,33	53,11

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 35. Resultados análisis dinámico de álabes parte 2

Vaey (m/s)	Vrey (m/s)	Vrex (m/s)	Vrs (m/s)	Vasx (m/s)	Vasy (m/s)	Vrsx (m/s)	Vrsy (m/s)	n (m)	ϵ (°)
386,11	193,06	222,92	561,84	192,16	334,90	192,16	527,96	0,0136	50
362,83	169,77	132,06	490,36	241,46	233,73	241,46	426,79	0,0134	49,5
292,49	99,43	165,48	467,65	154,57	248,31	154,57	441,37	0,0133	48,8
276,05	82,99	96,67	406,93	197,28	162,85	197,28	355,91	0,0131	48,3
223,74	30,69	124,02	398,07	126,97	184,23	126,97	377,28	0,0129	47,6
212,06	19,00	71,36	343,38	163,85	108,71	163,85	301,77	0,0128	47,1
172,80	20,26	93,82	346,00	106,35	136,20	106,35	329,26	0,0126	46,4
164,44	28,62	53,11	293,19	137,65	65,82	137,65	258,88	0,0125	45,9

Fuente: Elaboración propia.

**ANEXO C.
MANUAL DE MANTENIMIENTO**

Como es mencion en el capítulo 4, en la sección del manual de mantenimiento, se amplía dicha información a través de dos cuadros: el primero de ellos de análisis periódico que se debe realizar en los respectivos elementos que componen la turbina identificando una probable falla; y el segundo corresponde al análisis general de dicha posible falla.

Cuadro 36. Análisis periódico en los elementos de la turbina

SISTEMA	COMPONENTES	ANÁLISIS (INSPECCIÓN)	PERIODICIDAD
Sistema de alimentación	Toberas	Análisis por ultrasonido	Semestral
Sistema de generación	Generador	Análisis de vibración	Anual
		Análisis termográfico	
		Análisis de parámetros de funcionamiento	Anual
Sistema dinámico	Álabes	Inspección boroscópica de álabes	Anual
	Virador	Inspección del virador	Anual
Sistema de potencia	Rodamiento de empuje	Análisis de lubricación	Anual

Cuadro 36. (Continuación)

	Rodamiento de apoyo	Análisis de lubricación	Anual
Sistema de potencia	Rotor	Análisis de parámetros de funcionamiento	Semestral
		Termografía de la turbina	Anual
	Acoples	Inspección visual	Mensual
	Sellos laberínticos	Inspección visual de los sellos laberínticos	Semestral
		Comprobación de la presión del vapor de sellos	Anual
	Sellos retenedores	Inspección estado del sello y grasa	Anual
Sistema estructural	Carcasa	Análisis por tintas penetrantes	Semestral
	Soportes	Análisis por tintas penetrantes	Anual
		Análisis de vibraciones	Anual
Sistema de control	Tablero de control	Análisis de parámetros de funcionamiento	Semanal
	Válvula de regulación	Inspección elementos internos, filtros, conexiones eléctricas y al sistema.	Semestral
	Interruptores	Inspección visual	Mensual
	PLC	Inspección a componentes electrónicos	Anual
	Válvula de alivio	Verificación de fugas	Semestral

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 37. Análisis de falla

FALLA	DEFINICIÓN DE LA FALLA	CARACTERÍSTICAS	METODOLOGÍA	RECURSOS PARA EMPLEAR
Taponamiento en alguna tobera	Por causa de partículas en el fluido se generan obstrucciones en los conductos de las toberas.	Las revoluciones bajan por falta de fluido	Se revisan los conductos de las toberas	Aparatos de ultrasonido o inyectores de limpieza
Problemas en cojinetes, alineación y acoplamiento con la turbina.	El desgaste de los rodamientos, una posible desalineación en el eje o un problema en el acople con la turbina puede provocar vibraciones excesivas.	Vibración excesiva	Comprobar la alineación mediante láser	Cojinete, alternador, equipos de alineación
Sobrecarga en el generador.	En caso de que la turbina transfiera variables como voltaje o revoluciones superiores a las permitidas por el generador se podría generar una sobrecarga.	Daño en el acople con la turbina	Termografía de la turbina	Cámaras térmicas
Potencia en un rango menor a la demandada.	Si la turbina no transfiere los parámetros necesarios el generador no podrá suplir la energía demandada.	No supe la demanda de energía	Prueba de potencia	Componentes del generador
Incrustaciones en la superficie y defectos por roces o impactos.	Las partículas presentes en el fluido realizan un impacto en los álabes generando daños en la superficie de estos, aumentando las probabilidades de rotura.	Sonido y vibraciones anormales.	Observar con ayuda del análisis boroscópico el estado de los álabes.	Instrumento óptico, álabes de repuesto
Dificultad o imposibilidad de arrancar la turbina.	El motor eléctrico del virador no funciona y no se puede arrancar la turbina.	No arranca la turbina	Se revisa el virador y válvula de regulación	Motor, componentes del virador, válvula

Cuadro 37. (Continuación)

Vibraciones por mal estado.	Cuando la grasa del rodamiento pierde sus propiedades se empieza a generar fricción entre los elementos rodantes y se generan vibraciones.	Vibraciones excesivas.	Apertura de rodamiento	Rodamiento de empuje
Vibraciones por mal estado.	Cuando la grasa del rodamiento pierde sus propiedades se empieza a generar fricción entre los elementos rodantes y se generan vibraciones.	Vibraciones excesivas.	Apertura de rodamiento	Rodamiento de apoyo
Rodamientos con sobrecarga.	Si los rodamientos no están en óptimas condiciones podría generar un mal funcionamiento en el rotor.	Movimientos extraños en el rotor	Balanceo	Cojinetes, elementos de balanceo.
Pérdidas de rendimiento.	Si el rotor presenta fallas de algún tipo de sobrecarga el rendimiento de las variables de salida de la turbina se verá afectadas.	Aumento de temperatura y funcionamiento inadecuado	Termografía de la turbina	Cámaras térmicas
Perdida de potencia	Si el acople no tiene una fijación óptima la potencia de salida no será transmitida en su totalidad.	No se está generando lo requerido	Revisar el estado de los acoples	Acoples y equipos de medición
Daño en los sellos.	Si los sellos laberínticos terminan su vida útil y no se cambian habrá pérdidas de fluido y por consecuencia pérdidas de eficiencia.	Sonidos anormales	Revisar sellos y comprobar presiones	Sellos
Vapor en el exterior y pérdida de energía.	Una forma de comprobar el estado de los sellos es realizando una medición en la presión del fluido.	Presiones Inadecuadas	Se evalúan las presiones y las pérdidas de energía	Sellos

Cuadro 37. (Continuación)

Sello en mal estado	Por mal montaje o finalización de vida útil el sello puede tener perforaciones que compromete simultáneamente al rodamiento.	Superficie del sello en mal estado	Se cambia el sello y se revisa el estado del rodamiento	Sellos
Fuga del fluido	Al ser el componente que retiene el fluido por cualquier discontinuidad del material o cavidad se presentará perdida de fluido.	Hay fugas de fluido por una imperfección en la superficie de la carcasa	Tintas penetrantes en la superficie defectuosa	Líquidos requeridos
Daño en la soldadura	Por sobrecargas en los soportes o poros en la soldadura se pueden desoldar las partes de los soportes.	Vibraciones por movimiento en el soporte	Tintas penetrantes en las soldaduras	Líquidos requeridos
Defecto en la sujeción	Si hay tornillos de fijación sueltos provocarán vibraciones en los soportes.	Sujeción incorrecta por tornillos sueltos	Revisar el apriete de los tornillos	Torquímetro
Problema en los elementos de medición	Cuando las variables a medir están en el rango adecuado pero los elementos de medición arrojan un resultado erróneo.	No se puede accionar o funciona inadecuadamente	Limpieza y mantenimiento del tablero de control	Elementos de limpieza y repuestos eléctricos o electrónicos
Problemas de sincronización y regulación, partículas en la turbina.	La válvula no regula de la manera en la forma requerida o hay paso de partículas por fallas en el filtro.	Descontrol en las revoluciones del rotor	Revisar el estado de los componentes que hacen parte de la válvula	Válvula y elementos de medición
Daño en los contactos	Los contactos de los interruptores se desueldan o se sulfatan y no funcionan.	Mal contacto al prender la turbina	Revisar el estado de los interruptores	Soldadura, elemento de medición

Cuadro 37. (Continuación)

Señales erróneas	Las entradas y salidas del PLC se cargaron de forma incorrecta y no se realizan las actividades de la forma esperada.	Daño en elemento de medición	Revisar el comportamiento de la variable y el elemento de medición	Repuestos, elemento de medición
No cierra correctamente	Ocurren fugas de fluido al dañarse elementos internos de la válvula como resortes o sellos que ayudan al correcto aislamiento.	Perdidas de presión por fuga de fluido	Revisar el sistema de accionamiento y sellado de la válvula	Válvula y repuestos

Fuente: Elaboración propia.

ANEXO D. MATRIZ DE IMPACTO AMBIENTAL

En el capítulo 5, se establece la metodología de evaluación del impacto ambiental del proyecto, representada mediante la siguiente matriz de evaluación.

Cuadro 38. Matriz de evaluación de impacto ambiental

TURBINA A GAS REFRIGERANTE SOBRECALENTADO, PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA EN UN POZO PETROLERO EN EL CAMPO CAÑO LIMÓN, ARAUCA.					MATRIZ DE IDENTIFICACION DE ASPECTOS E IMPACTOS AMBIENTALES SIGNIFICATIVOS										
IDENTIFICACION DE ASPECTOS E IMPACTOS AMBIENTALES						VALORACION DE SIGNIFICANCIA DEL IMPACTO AMBIENTAL									
DESCRIPCION DE LA ACTIVIDAD		ASPECTO AMBIENTAL			IMPACTO AMBIENTAL	LEGAL			IMPACTO AMBIENTAL				PARTES INTERESADAS	SIGNIFICANCIA TOTAL DEL ASPECTO	
PROCESO	ACTIVIDAD	DESCRIPCIÓN DEL ASPECTO	TIPO DE ASPECTO	CONDICION DE OPERACIÓN	DESCRIPCIÓN	EXISTENCIA	CUMPLIMIENTO	TOTAL CRITERIO LEGAL	INCIDENCIA	FRECUENCIA	SEVERIDAD	ALCANCE	TOTAL CRITERIO IMPACTO AMBIENTAL		EXIGENCIA / ACUERDO
Adecuación y montaje en el área de influencia del proyecto	Construcción de obras civiles	Generación de residuos convencionales y peligrosos	Salida	Normal	Contaminación de los recursos naturales	10	1	10	I	1	10	10	68,5	1	29,125
		Generación de emisiones atmosféricas (MP y gases)	Salida	Normal	Alteración en la calidad del aire	10	1	10	D	1	10	10	68,5	1	29,125
		Remoción de capa suelo	Salida	Normal	Cambio en las propiedades del suelo- erosión de suelo	10	1	10	D	1	10	5	53,5	1	23,875
		Generación y emisión de ruido	Salida	Normal	Alteración de niveles de ruido-contaminación auditiva	10	1	10	D	1	5	10	51	1	23

Cuadro 38. (Continuación)

		Generación y arrastre de sedimentos	Salida	Normal	Alteración en la calidad del recurso hídrico	10	1	10	I	1	1	10	37	1	18,1
Adecuación y montaje en el área de influencia del proyecto	Montaje de equipos y ensamble de unidades	Generación de residuos convencionales y residuos peligrosos	Salida	Normal	Contaminación de los recursos naturales	10	1	10	I	1	1	10	37	1	18,1
		Generación y emisión de ruido	Salida	Normal	Alteración de niveles de ruido-contaminación auditiva	10	1	10	D	1	1	5	22	1	12,85
	Instalación de sistemas eléctricos y de control	Generación de residuos convencionales y residuos peligrosos	Salida	Normal	Contaminación de los recursos naturales	10	1	10	I	1	1	10	37	1	18,1
		Generación y emisión de ruido	Salida	Normal	Alteración de niveles de ruido-contaminación auditiva	10	1	10	D	1	1	5	22	1	12,85
Proceso de generación de energía (modelo ciclo Rankine orgánico)	Funcionamiento hidráulico y de bombeo	Consumo de energía	Salida	Normal	Agotamiento de recurso- alto consumo energético	1	1	1	I	10	5	1	55,5	1	20,075
		Consumo de agua almacenada	Salida	Normal	Agotamiento de recurso hídrico	1	1	1	I	10	5	1	55,5	1	20,075
		Vertimiento agua residual	Salida	Normal	Contaminación recurso hídrico	10	1	10	D	10	5	10	82,5	1	34,025
		Derrames y fugas de agua residual	Salida	Normal	Contaminación recurso hídrico y suelo.	10	1	10	I	5	10	10	82,5	1	34,025

Cuadro 38. (Continuación)

Proceso de generación de energía (modelo ciclo Rankine orgánico)	Generación de energía mecánica y eléctrica en la turbina a gas	Liberación de fluido por pérdidas en accesorios	Salida	Normal	Contaminación atmosférica	10	1	10	D	10	10	10	100	1	40,15
		Acumulación de partículas de fluido en suelo	Salida	Normal	Cambio en las propiedades del suelo- erosión de suelo	10	1	10	I	10	5	5	67,5	1	28,775
	Generación de energía mecánica y eléctrica en la turbina a gas	Salida	Normal	Alteración de niveles de ruido-contaminación auditiva	10	1	10	D	10	5	5	67,5	1	28,775	

Fuente: Elaboración propia.

ANEXO E. COTIZACIONES

Imagen 71. Cotización elementos para la turbina



Bogotá D.C., 12 de agosto de 2020

Señor(a):
CARINA GÓMEZ
La ciudad

Estimado cliente:

Agradeciendo su formal invitación a cotizar el material, dejo a su consideración mi presupuesto:

ITEM	DESCRIPCIÓN	UND MED	CANT	VAL UNITARIO	VALOR TOTAL
1	Pin seeger	UND	2	\$ 1.300	\$ 2.600
2	Perno V7 3/4"x4 1/2"	UND	20	\$ 3.300	\$ 66.000
3	Perno M8x30	UND	20	\$ 450	\$ 9.000
4	Perno 1/2" x 1 5/8"	UND	16	\$ 1.585	\$ 25.360
5	Perno 1/2" x 2"	UND	4	\$ 2.830	\$ 11.320
6	Buje QD-SK	UND	2	\$ 115.000	\$ 230.000
7	Voltímetro	UND	1	\$ 16.900	\$ 16.900
8	Botón ON/OFF	UND	2	\$ 53.000	\$ 106.000
9	Botonera	UND	1	\$ 74.000	\$ 74.000
10	Manómetro	UND	1	\$ 201.000	\$ 201.000
11	Botón de emergencia rojo	UND	1	\$ 37.000	\$ 37.000
12	Tacómetro	UND	1	\$ 649.700	\$ 649.700
13	Loctite 5/18 x 300ml	UND	1	\$ 267.000	\$ 267.000
SUBTOTAL					\$ 1.695.880
IVA 19%					\$ 322.217
TOTAL					\$ 2.018.097

CONDICIONES COMERCIALES:

- Validez de la oferta: 30 (treinta) días calendario
- Tiempo de entrega: Una vez realizado el pago
- Forma de pago: Contado
- Materiales de primera calidad

FERRETERIA INDUSTRIAL LG S.A.S

DANIEL RAMIREZ
Departamento de Ventas

Cra 31 No. 11-37. Telefax: (1) 568 1978. e-mail: ferreindlg@hotmail.com. Bogotá, Colombia




Fuente: FERRETERÍA INDUSTRIAL LG. Cotización elementos turbina. Bogotá D.C., (2020). pp. 1, [Consultado julio 1, 2020].

Imagen 72. Cotización sensor de desplazamiento

ISATECK

ISATECK S.A.S NIT 900292239-1
SOLUCIONES EN AUTOMATIZACIÓN
INDUSTRIAL GERENCIAL
www.isateck.com

Servicios y suministros de
Automatización Industrial Fabricante
de Soluciones Integrales

Imagen/ F. Técnica	Producto	Código	Precio Venta	Cant.	Dscto.	Precio Total
	High-performance inductive measuring system eddyNCDT 3060	4107062	2,330.00 USD	1	0.00%	2,330.00 USD
Ficha técnica						
	Eddy current sensor, cylindrical construction form with integrated cable, 3m	ES-S4-C-CA3,0/mB0	1,860.00 USD	1	0.00%	1,860.00 USD
Ficha técnica						
	Supply and signal cable 8-pole with M12 connector Standard length: 3 m Optionally available: 5 m / 10 m / 15 m / 10 m as drag-chain suitable variant	PCx/8-M12	190.00 USD	1	0.00%	190.00 USD
Ficha técnica						

Subtotal: 4380 USD
IVA: 832.2 USD
Total: 5212.2 USD

Otras formas de pago

Descuento pago 100% anticipado (sin iva): 4161 USD

Pago via Baloto ó Efecty (5,6%): 5521.4 USD

Pago virtual con tarjeta de crédito (5,6%): 5521.4 USD

Financiación

Zona Centro Industrial Norte: Carrera 2 Este N° 1-27 Cajicá, Cundinamarca PBX: 57-1- 8855336, Zona Centro
Oficinas: Clí 95 No 9A-08 Bogotá, D.C., Zona Costa Caribe: Calle 87 No 75-24, Barranquilla, Atlántico Tel:
(+575) 3093796, COLOMBIA

Fuente: ISATECK. Cotización PC-CT-00001741-20, sensor de desplazamiento. Colombia. (2020)., pp.1 [Consultado junio 24, 2020].

Imagen 73. Cotización proceso de fabricación de los álabes



Bogota D.C., 10 de agosto de 2020

MICROFUNDICIONES PEREZ

NIT 79.493.084-0

COTIZACION

Señor: David Rodríguez

A continuación, envío cotización requerida

Para la elaboración de 632 alabes en obra gris sin la original, por el valor de \$5000 pesos M/C, la unidad

Para un total de \$3.160.000 M/C. que, en el momento de llegar a un acuerdo, se llevaría a cabo en un tiempo aproximado de 20 días.

Agradecemos su confianza en nosotros.

ATT

RAFAEL DARIO PEREZ

C.C No 79.493.084 de Bogotá

Representante Legal.

CRA 14A No 10-A12 SUR TEL: CELS: 3112514536 - 3008910

E-MAIL: microfundicionesperez@hotmail.com

Fuente: MICROFUNDICIONES PEREZ. Cotización proceso de fabricación de los álabes, fundición a la cera perdida. Bogotá D.C., pp. 1., [Consultado agosto 10, 2020].

Imagen 74. Cotización PLC



Quimel Ingeniería SAS
NIT 901108357 -8

+57 1 9262230

facturacion@quimeling.co

Carrera 13 # 60-91 OF. 201 EDIFICIO BANCOLOMBIA CHAPINERO - Bogotá, D.C.

COTIZACIÓN

Cotización No. 1651
Fecha de expedición 11/08/2020
Fecha de vencimiento 25/08/2020

Ítem	Precio	Cantidad	Descuento	Total
Siemens - PLC S7-1200(DC/DC/DC, I/O integrada: 8 DI DC 24V; 6 DO 24V DC; 2 AI 0-10V DC, alimentación: DC 20,4-28,8V DC TIEMPO DE ENTREGA: INMEDIATO + Módulo salida analoga 1 AO, +/-10VDC o 0-20 mA TIEMPO DE ENTREGA: 3-4 semanas)	\$1,903,000.00	1.00	0.00%	\$1,903,000.00
Siemens - PLC S7-1200 (AC/DC/relé, E/S INTEGRADAS: 8 DI DC 24V; 6 DO, relé 2 A; 2 AI 0-10V DC, alimentación: AC 85-264 V AC TIEMPO DE ENTREGA: INMEDIATO + Módulo salida analoga 1 AO, +/-10V DC o 0-20 mA TIEMPO DE ENTREGA: 3-4 semanas)	\$1,903,000.00	1.00	0.00%	\$1,903,000.00
Mean well - Fuente de alimentacion 24V DC 2.5A (DIN Rail Power Supplies 60W 24V 2.5A. TIEMPO DE ENTREGA: INMEDIATA)	\$180,000.00	1.00	0.00%	\$180,000.00

Cuatro millones setecientos cuarenta y tres mil trescientos cuarenta pesos (COP)

Subtotal	\$3,986,000.00
IVA (19.00%)	\$757,340.00
Total	\$4,743,340.00

Observaciones

TODO ÍTEM OFERTADO ES SALVO VENTA PREVIA; FORMA DE PAGO: ANTICIPADO; FLETE: INCLUIDO HASTA SUS INSTALACIONES EN BOGOTA.










Karol Sanabria
Asistente Administrativo
asistencia@quimeling.co
administracion@quimeling.co
Cel. + 57 3108057296

ELABORADO POR

Generado en www.alegra.com/colombia - Con Alegra ganas tiempo y tranquilidad

Fuente: QUIMEL INGENIERÍA SAS. Cotización PLC. Bogotá D.C., pp. 1. (2020). [Consultado agosto 11, 2020].


Imagen 75. Cotización rodamientos y retenedores

		<p align="center">LUGO HERMANOS S.A. Calle 13 # 62-94 PBX 420 2511 * Call Center 260 7800 * Bogotá D.C. Avda. 3N # 45N-43 * PBX 524 6640 * Cali www.lugohermanos.com * NIT 860.020.240-7</p>						
		<p>Proveedor Integral de Soluciones para la Industria</p>						
								
FECHA:	AGOSTO 12 DE 2020				COTIZACION:			
CLIENTE:						JL-00333		
CONTACTO:	DAVID RODRIGUEZ					E-mail		
CIUDAD:	BOGOTA	TEL: 313 4426022			david.r1025@hotmail.com			
VALIDEZ OFERTA:	10 DIAS							
ITEM	CANT	DESCRIPCIÓN	MARCA	ENTREGA	PRECIO COP	V/TOTAL COP		
1	1	NU 207 ECJ/C3	SKF	INMEDIATA	\$ 208.700	\$ 208.700		
2	1	6207-2RS1/C3	SKF	INMEDIATA	\$ 36.500	\$ 36.500		
3	1	35X72X7 HMSA10 V	SKF	INMEDIATA	\$ 46.800	\$ 46.800		
4								
<p>NOTAS: VALIDEZ DE OFERTA 10 DIAS. ENTREGA INMEDIATA, SUJETOS A PREVIA VENTA. FORMA DE PAGO: CONTADO.</p>					Sub Total	\$ 292.000		
					19% IVA	\$ 55.480		
					TOTAL	\$ 347.480		
Asesor:	John Fredy Moreno Sosa							
Celular:	314 2428367							
Email:	john-moreno@lugohermanos.com							

FORMATO COTIZACIONES COP

Fuente: LUGO HERMANOS SA. Cotización JL-00333, rodamientos y retenedores. Bogotá D.C., pp. 1. (2020). [Consultado agosto 12, 2020].

Imagen 76. Cotización acero 4130

 S U M I N O X		COTIZACION	6082020	
		VENDEDOR N°	08	
Sr: DAVID RODRIGUEZ Atn: Fax: e-mail		FECHA:	6/08/2020	
Por me,				
ITEM	DESCRIPCION	KILOS	VALOR KILO	PRECIO TOTAL
1	4130 API6A RDO.5"	100	8.000,00	\$ 800.000,00
Elaborado por:		SUBTOTAL		800.000,00
Nombre	MANUEL ARDILA	I.V.A. 19%		152.000,00
Cargo	ASESOR COMERCIAL	TOTAL		952.000,00
Celular	3204101605			
TIEMPO DE ENTREGA:		1 DIA		
CONDICIONES DE PAGO:		CONTADO		
VALIDEZ DE LA COTIZACION		2 DIAS		
OBSERVACIONES:				
BOGOTÁ: Zona Carvajal - Cr 72 L 37 b sur 56 7557293 -7557296				
F-VEN-002 (Rev.0)				

Fuente: SUMINOX, Cotización 6082020, acero 4130. Bogotá D.C. (2020)., pp. 1. [Consultado agosto 06, 2020].

Imagen 77. Cotización 1 turbina de vapor de la empresa DEC



四川省东透电气有限公司
Dongturbo Electric Company, Ltd.

中国成都市高新区天府大道北段 1700 号新世纪环球中心东三区 3-2-608
3-2-608, East 3 District, New Century Global Center, No. 1700, North Section, Tianfu Avenue, Chengdu, China
Tel: +86 28 8612 3963 Fax: +86 28 6873 0103 · dqzhanghaovue@126.com

QUOTATION SHEET

Date: Aug.13, 2020
Ref.: DTEC-O-20200813

Sub: 300KW back pressure steam turbine & generator

We, Dongturbo, hereby would like to make our best offer as follows for your target products.

1. Technical parameters of steam turbine

Sl. No.	Description	Parameters	Remarks
1	Turbine type	N0.3-1.6/0.3	
2	Rated power	300KW	
3	Rated speed	3000r/min	
4	Generator speed	3000r/min	
5	Inlet steam pressure	1.6MPa	Inlet steam parameter
6	Inlet steam temperature	202°C	
7	Inlet steam flow	10.0t/h	
8	Steam consumption	31.17kg/kw.h	
9	Rated exhaust steam pressure	0.3MPa	
10	Condensate temperature	133.63°C	
11	Turbine layout	Single layer	
12	Rotor structure	1C ₂	
13	Connection between the turbine and generator	Coupling	
14	Turbine noise level (db)	≤ 80	
15	Generator power	300 KW	

Imagen 77. (Continuación)



四川省东透电气有限公司 Dongturbo Electric Company, Ltd.

中国成都市高新区天府大道北段 1700 号新世纪环球中心东三区 3-2-608
3-2-608, East 3 District, New Century Global Center, No. 1700, North Section, Tianfu Avenue, Chengdu, China
Tel: +86 28 8612 3963 Fax: +86 28 6873 0103 · dqzhanghaoyue@126.com

16	Generator voltage	380 V	
17	Generator frequency	50HZ	
18	Generator speed	3000r/min	

2. Price

USD67000.-/set for the equipment, CIF Basic seaport in the destination country, including the steam turbine & generator

3. Delivery

The delivery will be 70 days after the receipt of the payment.

4. Payment

50% will be paid as down payment, the remaining 50% will be paid before delivery of the contract goods.

5. Warranty

5.1 All equipment offered in this specification shall be guaranteed for operation under normal conditions for a period of 12 months from the date of final acceptance at manufacturer's works or 18 months from the date of B/L at site whichever is earlier. This guarantee covers defective design, materials and workmanship only and shall not be applicable to damages caused by misuse of the equipment.

5.2 Dongturbo will not be responsible / liable for any contingency charges or loss of profit arising on account of agreeing to undertake repair / replacement of equipment / component under warranty.

5.3 All documents and drawing will be described in English language & in all correspondences technical schedules and drawings, METRIC units of measurement will be employed.

Fuente: DONGTURBO ELECTRIC COMPANY LTD. Cotización DTEC-20200813, turbina de vapor de 300wK. Chengdu, China., pp. 2. [Consultado agosto 13, 2020].

Imagen 78. Cotización 2 turbina de vapor de la empresa NCON Turbo Tech



1

NCON Quotation Number: 2020-21-SIL-192

To : Mr. David Rodriguez
Address : Bogota-Colombia.

Phone Number(s) : +91-
Email : david.r1025@hotmail.com

From : Mr. Nainesh Varma
Designation : VP-Global Business Development
Address : # F-62 & F-63, Industrial Estate, Rajajinagar, Bangalore -
560044

Phone Number(s) : +91-9624442506
Email : nainesh@nconturbines.com

Turbine Design Operating Parameters

- Steam Inlet Pressure (kg/cm2G) : 36.7
- Steam Inlet Condition : 100% Dry Saturated
- Steam Inlet Temperature (°C) : *Saturated*
- Steam Exhaust Pressure (kg/cm2G) : 1.05ATA
- Steam Exhaust Condition : Saturated about 98% dry
- Steam Exhaust Temperature (°C) : Saturated
- Steam Flow Rate (kg/hr) : 4000 (4TPH)
- Electrical Power (kW) : **300** (3%Tolernace)
- LT Alternator (KVA) : **400KVA**
- Model : 550BG

Imagen 78. (Continuación)



6

SCOPE OF SUPPLY

Steam Turbine:

- Impulse Rotor with Multi Blades/Stages
- Operating Speed, **7300 RPM**
- Gland Seal, Stainless Steel Labyrinth + Carbon Rings
- MOC:
 - Blades, X22Cr13
 - Nozzles, SS304
 - Disc, EN19
 - Shaft, EN24, hard-chrome plated
 - Casing, A216 WCB
- MS base frame, common for turbine and gearbox
- Separate base plate for generator

PERFORMANCE DATA

Steam Parameter	Design Value
Steam Inlet Pressure (kg/cm2G)	36.7
Steam Inlet Condition	100% Dry Saturated
Steam Inlet Temperature (°C)	Saturated
Steam Exhaust Pressure (kg/cm2G)	1.05ATA
Steam Flow Rate (kg/hr)	4000
Electrical Power (kW)	300 (3% Tolerance)

NCON Turbo Tech Pvt. Ltd.

F-62 & F-63, Industrial Estate, Rajajinagar, Bangalore – 560044, India

Phone: +91-80-23151486, 23301629; Fax: +91-80-23159158; Email: enquiry@nconturbines.com

Imagen 78. (Continuación)

7



COMMERCIAL TERMS

List of Clauses:

1. Tender Price
2. Terms of Delivery
3. Terms of Payment
4. Validity

Tender Price

1. Tender Price

USD: 1,65,000/- (One Lakhs Sixty Five Thousand US Dollars Only)

Erection & Commissioning Charges: USD: 350/day -manday

Packing & Forwarding: 1.5%

Transportation: Extra at Actual

Lodging Boarding, Flight, Visa: Extra At Actual

Payment Terms:

- 40% Advance along with Purchase Order
- 10% on submission of drawings.
- Remaining against Performa Invoice before delivery.

NCON Turbo Tech Pvt. Ltd.

F-62 & F-63, Industrial Estate, Rajajinagar, Bangalore – 560044, India

Phone: +91-80-23151486, 23301629; Fax: +91-80-23159158; Email: enquiry@nconturbines.com

www.nconturbines.com

Fuente: NCON TURBO TECH. Cotización 2020-21-SIL-192, turbina de vapor de 300wK. Bangalore, India, pp. 3. [Consultado agosto 13, 2020].

Imagen 79. Cotización 3 turbina de vapor de la empresa AXET

 Anhui Xinning Energy Technology Co., Ltd Technology First Quality First			
Quotation of 300kw single-stage impeller condensing steam turbine generator set Quotation and delivery date of steam turbine 300kw凝汽式汽轮机发电机组报价单 汽轮机报价及交货期			
No 序号	Quotation item details 报价项目明细		
1	Project Name: condensing steam turbine generator set (NO.3-1.25) 项目名称: 凝汽式汽轮发电机组 (NO. 3-1. 25)		
	Equipment Name 设备名称	Price USD 价格 (美金)	Remarks 备注
	Pure condensing single-stage impeller steam turbine body 汽轮机本体	58,927.00	Including condenser and lubricating oil station. 含冷凝器、润滑系统
	300 KW Synchronous brushless excitation Generator 300KW 同步步无刷励磁电机同	22,571.42	400v/60Hz, 3000rpm
2	Electric speed control system and complete set of electric control cabinet 电调速系统和控制柜	43,786.87	Including electronic speed control system, generator grid synchronization cabinet, generator protection and switch cabinet, etc. 含电子调速系统, 发电机并网装置, 发电机保护及开关等
	Local Transportation and packing fee 运输费、包装费	3,285.71	Standard export packaging & by truck forward to Qingdao port.

Imagen 79. (Continuación)

 Anhui Xinning Energy Technology Co., Ltd Technology First Quality First				
	标准出口包装，由卡车运往青岛港。			
	<table border="1"> <tr> <td>Total Price 总价</td> <td>128,571.00 USD</td> </tr> </table>	Total Price 总价	128,571.00 USD	
Total Price 总价	128,571.00 USD			
3	<table border="1"> <tr> <td>Special tool fee (in figures) 专用工具费（小写）</td> <td rowspan="2">Free 免费</td> </tr> <tr> <td>Spare Parts For steam turbine and generator. 备件用于汽轮机和发电机。</td> </tr> </table>	Special tool fee (in figures) 专用工具费（小写）	Free 免费	Spare Parts For steam turbine and generator. 备件用于汽轮机和发电机。
Special tool fee (in figures) 专用工具费（小写）	Free 免费			
Spare Parts For steam turbine and generator. 备件用于汽轮机和发电机。				
4	Total offer (in words): One hundred twenty-eight thousand five hundred and seventy one USD only. 总报价（大写）：壹拾贰万捌仟伍佰柒拾壹美元整。			
5	Payment method: 30% of the contract comes into effect in advance, 70% of the total contract price (delivery payment) shall be paid before delivery, and the Seller shall take it from the warehouse. 付款方式：预付 30% 合同生效，发货前再支付合同总价的 70%（提货款），卖方仓库内自提。			
6	Delivery time: within 120 days after the contract comes into effect. 交货期：合同生效后 <u>120 天</u> 内。			
7	Design service life \geq 30 years. 设计使用寿命 <u>\geq30 年</u> 。			
8	Installation and commissioning personnel visa fee, travel, air ticket, accommodation, catering costs are borne by the buyer, installation and commissioning costs are \$150 per person per day (time calculation: from the date of departure to the date of return to the company). 安装调试人员签证费、差旅费、机票、住宿费、餐饮费均由买方承担，安装调试费为每人每天 150 元（时间计算：从出发之日起至返回公司之日止）。			

Imagen 80. (Continuación)



Anhui Xinning Energy Technology Co., Ltd Technology First Quality First

Note:

1. We quoted and calculated based on the following parameters:
Steam mass flow: 5.4 tons
Steam pressure: 1.25 MPa
Steam temperature: 194°C
Based on above parameters steam turbine will generate 300KW, if the user will decrease the boiler temperature to 250°C then steam turbine will generate the 300KW at 5 tons inlet steam.

2. Question: Why this set of steam turbine is cheaper than the multi stage impeller steam turbine?
Single stage steam turbine adopts electronic control and pneumatic control. We provide steam turbine + Generator + control cabinet. The structure is relatively simple, with single valve regulation and single-stage impeller. The turbine efficiency is low and the investment cost is slightly lower. The single-stage impeller turbine unit (including condenser and lubrication system), synchronous brushless excitation power generation Unit speed 3000r/ min), control cabinet (including electronic speed control system, generator grid connected device, generator protection and switch, etc.).The efficiency of the single stage steam turbine is low as compare to multi stage pure condensing steam turbine and scope of supply is also very short.

Anhui Xinning Energy Technology Co. Ltd
安徽新宁能养科技有限公司
15 August, 2020



3 | Page

Fuente: ANHUI XINNING ENERGY TECHNOLOGY CO. LTD. Cotización, turbina de vapor de 300wK. Shenzhen, China., pp. 3. [Consultado agosto 15, 2020].