



DISEÑO DE UN MOTOR ROTATIVO POR EXPANSIÓN DE VAPOR

Esp. Ing. ALCIDES LOPEZ CAMELO

Universidad ECCI
Dirección de Postgrados
Bogotá Distrito Capital, Colombia
2021



Diseño de un motor rotativo por expansión de vapor

Esp. Ing. ALCIDES LOPEZ CAMELO

Tesis o trabajo de investigación presentado como requisito para
optar al título de:

Magister en Ingeniería con Énfasis en Mecánica

Director:

PhD. CAMILO BAYONA

Asesor:

(C)MEng. DAVID BARÓN

Línea de Investigación:

Aprovechamiento Tecnológico de Materiales y Energía

Grupo de Investigación:

Aprovechamiento Tecnológico de Materiales y Energía GIATME

Universidad ECCI

Dirección de Postgrados

Bogotá Distrito Capital, Colombia

2021

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma. _____

Nombre: _____

Presidente del Jurado:

Firma. _____

Nombre: _____

Jurado:1

Firma. _____

Nombre: _____

Jurado 2

DEDICATORIA

Dedico este triunfo a mis padres, MERCEDES Y ALCIDES, a mi hermana ÁNGELA, a mi esposa CLAUDIA y a mi hijo DAVID, por apoyarme incondicionalmente en la culminación exitosa de este proyecto de investigación. De ahora en adelante, me queda como compromiso aplicar lo aprendido y compensar todos esos sacrificios, brindando una mejor calidad de vida a los míos.

"SEGUIR CUANDO CREES QUE YA NO PUEDES MAS, ES LO QUE TE HACE DIFERENTE A LOS DEMÁS"

AGRADECIMIENTOS

Yo ALCIDES LOPEZ CAMELO, agradezco de todo corazón al equipo de trabajo conformado por el PhD. Camilo Bayona (Director de tesis) y el (C)MEng. Jose David Barón (Asesor Principal).

Adicionalmente, también agradezco a las siguientes personas: PhD. Giovanni Orosco, PhD. Carolina Sarmiento; MEng Vladimir Silva MEng. Francisco Villate; (C)MEng. Rodrigo Dueñas, (C)MEng. Daniel Gomez.

Así pues, cada una de las personas mencionadas apoyaron y aportaron su granito de arena para la planeación, ejecución y evaluación de este proyecto, estando siempre a disposición y guiándome para poder cumplir con éxito la ejecución de este proyecto de investigación.

Por otro lado, también agradezco a los integrantes del grupo de investigación GIATME, quienes confiaron en mí y en mis capacidades para hacer parte de este equipo, y poder divulgar en diferentes escenarios los resultados del proyecto.

Por otro lado, agradezco la ayuda de mi primo el Ing. Daniel Gutierrez, quien estuvo presente durante toda la investigación y me asesoró en el desarrollo del documento y del código de programación.

Así mismo, agradezco a toda mi familia por brindarme el tiempo para lograr este objetivo, a mis padres y hermana por esa formación en valores y hacerme la persona que soy actualmente.

Por último, doy gracias a Dios por la vida en general, mi salud, educación y trabajo ya que sin esto no podría terminar con éxito la ejecución de este proyecto.

TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS.....	9
LISTA DE TABLAS	12
LISTA DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS	13
Símbolos con letras latinas.....	13
Símbolos con letras griegas	14
Subíndices	14
Superíndices	15
Abreviaturas	15
TÍTULO.....	- 16 -
RESUMEN.....	- 16 -
PALABRAS CLAVE:	- 17 -
ABSTRACT	18
KEYWORDS	19
1 INTRODUCCIÓN.....	20
2 PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	- 28 -
2.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	- 28 -
2.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	- 30 -
3 OBJETIVOS	- 31 -
3.1 OBJETIVO GENERAL.....	- 31 -
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	- 31 -
4 JUSTIFICACIÓN Y DELIMITACIÓN.....	33
4.1 JUSTIFICACIÓN.....	33
4.2 DELIMITACIÓN	33
4.3 ALCANCE	34
5 MARCOS DE REFERENCIA	36

5.1 ESTADO DEL ARTE	36
5.2 MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL.....	47
5.2.1 Tipología de Motores.....	47
5.2.2 Matriz de Pugh.....	50
5.2.3 Motor Radmax	50
5.2.4 Plantas térmicas	52
5.2.5 Ciclo Rankine.....	54
5.2.6 Diseño de experimentos.....	57
5.2.7 Estudio de viabilidad.....	57
6 MARCO METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN	59
6.1 METODOLOGIA	59
6.1.1 Paradigma.....	59
6.1.2 Método	59
6.1.3 Tipo de investigación.....	60
6.1.4 Fases de la investigación	61
6.2 RECOLECCIÓN DE LA INFORMACIÓN.....	63
6.2.1 Fuentes primarias:.....	63
6.2.2 Fuentes secundarias	63
6.2.3 Fuentes terciarias	64
6.3 ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN	65
7 MÉTODOS.....	66
7.1 FASE 1: SELECCIÓN Y UBICACIÓN DE LA TIPOLOGÍA DEL MOTOR A DISEÑAR	66
7.1.1 PRÁCTICA GUIADA CON PLANTA TÉRMICA ECCI.....	67
7.1.1.1 Descripción de la practica en la planta térmica	67
7.1.1.2 Datos obtenidos.....	69
7.1.2 TIPOLOGÍAS DE MOTORES	73
7.1.3 MATRIZ DE DECISIÓN.....	75
7.1.4 APLICACIÓN DE DISEÑO DE EXPERIMENTOS DOS FACTORES CON DOS NIVELES 3.....	80
7.2 FASE 2 MODELAMIENTO MATEMÁTICO.....	85
7.2.1 ECUACIONES GOBERNANTES	85
7.2.1.1 Cálculo de áreas.....	87
7.2.1.2 Calculo volumétrico cada una de las cámaras	94

7.2.1.3 Presión ejercida en cada una de las paletas	95
7.2.1.4 Fuerza ejercida en cada una de las paletas	98
7.2.1.5 Torque ejercido en cada una de las paletas	99
7.2.1.6 Torque de carga	102
7.2.1.7 Momento de inercia del motor.....	102
7.2.1.8 Aceleración angular del motor.....	103
7.2.1.9 Velocidad angular del motor.....	104
7.2.1.10 Potencia entregada por el motor	107
7.2.2 PROGRAMACIÓN EN MATLAB®	108
7.3 FASE 3 MODELADO Y SIMULACIÓN CAD	120
7.3.1 PARTES DEL PROTOTIPO.....	121
7.3.2 EXIGENCIAS PARA MODELADO CAD	122
7.3.3 DATOS DIMENSIONALES DEL PROTOTIPO.....	125
7.3.4 PLANOS DE PIEZAS DISEÑADAS	126
7.4 FASE 4 VIABILIDAD PARA LA FABRICACIÓN.....	128
7.4.1 SITUACIÓN ACTUAL PARA FABRICACIÓN DEL PROTOTIPO CON LAS MAQUINAS DE LA ECCI.....	128
7.4.2 PROCESO DE FABRICACIÓN GENERALIZADO	130
7.4.3 COSTOS DE FABRICACIÓN.....	131
7.4.4 VALOR AGREGADO DE LLEVAR A CABO LA FABRICACIÓN DEL DISEÑO PROPUESTO	134
8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	135
8.1 CONCLUSIONES	135
8.2 RECOMENDACIONES.....	136
9 ANEXOS.....	139
ANEXO A. PROTOCOLO PLANTA TÉRMICA.....	139
ANEXO B. CÓDIGO DE PROGRAMACIÓN EN MATLAB.....	146
ANEXO C. PLANOS MOTOR DISEÑADO	169
10 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS Y WEB GRAFÍA.....	182

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. EMISIONES DE DIÓXIDO DE CARBONO A NIVEL MUNDIAL.....	20
FIGURA 2. FUENTES PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA.....	21
FIGURA 3. FUENTES PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA.....	22
FIGURA 4. PROYECCIÓN DE CONSUMO ENERGÉTICO NIVEL MUNDIAL.....	23
FIGURA 5. GENERACIÓN DE ENERGÍA EN COLOMBIA.	23
FIGURA 6. GENERACIÓN DE ENERGÍA ASOCIADOS A ACOLGEN.	24
FIGURA 7. EMISIONES DE DIÓXIDO DE CARBONO.	25
FIGURA 8. CAPACIDAD INSTALADA EN COLOMBIA.	25
FIGURA 9. PLANTA TÉRMICA ECCI-1.....	26
FIGURA 10. DESPIECE MOTOR RADMAX.....	40
FIGURA 11. CICLO DE OPERACIÓN RADMAX EXPANSOR.....	42
FIGURA 12. CLASIFICACIÓN DE LOS MOTORES.....	48
FIGURA 13. CICLO OTTO.....	49
FIGURA 14. MOTOR RADMAX.....	51
FIGURA 15. ESQUEMA CICLO RANKINE IDEAL.....	53
FIGURA 16. CICLO RANKINE IDEAL.	54
FIGURA 17. DIAGRAMA T-S CICLO RANKINE CON SOBRECALENTAMIENTO.....	56
FIGURA 18. MÉTODO USADO.....	60
FIGURA 19. VISTA LATERAL IZQUIERDA DE LOS COMPONENTES DE LA PLANTA TÉRMICA ECCI-1.....	67
FIGURA 20. VISTA LATERAL DERECHA DE LOS COMPONENTES DE LA PLANTA TÉRMICA ECCI-1.....	68
FIGURA 21. DIAGRAMA GENERAL DE INSTRUMENTACIÓN EN LA PLANTA TÉRMICA.....	69
FIGURA 22. DIAGRAMA PLANTA TÉRMICA.....	71
FIGURA 23. PORCENTAJES DE LA MATRIZ DE PUGH.	78
FIGURA 24. DECISIÓN FINAL.....	79
FIGURA 25. GRÁFICA DE CUBOS (MEDIAS DE LOS DATOS) PARA PRESIÓN.....	81

FIGURA 26. GRAFICA NORMAL DE LOS EFECTOS.	82
FIGURA 27. DIAGRAMA DE PARETO DE LOS EFECTOS.	83
FIGURA 28. SUBENSAMBLE DEL MOTOR.	85
FIGURA 29. ÁREA DE UN TOROIDE.	87
FIGURA 30. ÁREA DE UNA SECCIÓN TOROIDAL.	88
FIGURA 31. ÁREA DE LA SECCIÓN TOROIDAL REAL.	89
FIGURA 32. ÁREAS DE LAS CÁMARAS VISTAS EN PLANTA.	90
FIGURA 33. PERFIL SINUSOIDAL DEL ROTOR CON $F=1$	91
FIGURA 34. ÁREAS DE LAS PALETAS.	93
FIGURA 35. VOLUMEN DE CADA CÁMARA.	94
FIGURA 36. UBICACIÓN DE CADA UNA DE LAS PALETAS EN EL ROTOR.	97
FIGURA 37. FUERZAS APLICADAS SOBRE LA PALETA BETHA., LA SIGUIENTE Y LA ANTERIOR.	98
FIGURA 38. FUERZA RESULTANTE EJERCIDA EN UNA PALETA.	101
FIGURA 39. ENCABEZADO Y RESPUESTA SOFTWARE GENERADO.	108
FIGURA 40. TORQUE GENERADO EN EL MOTOR.	112
FIGURA 41. ACELERACIÓN ANGULAR DEL MOTOR.	113
FIGURA 42. VELOCIDAD ANGULAR DEL MOTOR.	113
FIGURA 43. POTENCIA GENERADA POR EL MOTOR.	114
FIGURA 44. VOLUMEN DE CADA CÁMARA.	115
FIGURA 45. PRESIÓN EN CADA CÁMARA.	116
FIGURA 46. FUERZA EN CADA PALETA.	117
FIGURA 47. TORQUE EN CADA PALETA.	118
FIGURA 48. ANÁLISIS DE PRESIONES EN LAS CÁMARAS 1 Y 2 VS FUERZAS APLICADAS EN LA PALETA 2	119
FIGURA 49. PROCESO DE MODELADO EN CAD.	120
FIGURA 50. PRECIO DE ALUMINIO EN DÓLARES POR TONELADA.	131
FIGURA 51. INSTRUMENTACIÓN ANÁLOGA EN LA PLANTA.	139
FIGURA 52. DIAGRAMA DE FLUJO DEL CÓDIGO	146
FIGURA 53. SIMULACIÓN MOTOR ENSAMBLADO	169
FIGURA 54. EXPLOSIVO DEL MOTOR	170
FIGURA 55. PLANO ENSAMBLE FINAL.	171
FIGURA 56. LEVA.	172
FIGURA 57. PALETAS.	173

FIGURA 58. ROTOR.....	174
FIGURA 59. CARCAZA.....	175
FIGURA 60. TAPA DE CARCAZA.....	176
FIGURA 61. ANILLO SELLO CARCAZA.....	177
FIGURA 62. EMPAQUE LATERAL.....	178
FIGURA 63. EMPAQUE SUPERIOR.....	179
FIGURA 64. EMPAQUE INFERIOR.....	180
FIGURA 65. EJE.....	181

LISTA DE TABLAS

TABLA 1. USO DE COMBUSTIBLES EN DIFERENTES MOTORES ROTATIVOS.	39
TABLA 2. FASES Vs ETAPAS DEL MÉTODO CIENTÍFICO.....	61
TABLA 3. PRESIONES EN CADA UNO DE LOS PUNTOS DE ACUERDO A LAS CARGAS ELÉCTRICAS EN KPA, REQUERIDAS EN LA PLANTA.	72
TABLA 4. CRITERIOS DE SELECCIÓN MOTOR A DISEÑAR.	76
TABLA 5. RESULTADOS MATRIZ DE PUGH.....	78
TABLA 6. DOE PARA LA UBICACIÓN DE UN MOTOR ROTATIVO DE EXPANSIÓN VOLUMÉTRICA.....	81
TABLA 7. PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUBENSAMBLE.....	103
TABLA 8. DIMENSIONES RODAMIENTO SKF SELECCIONADO.	123
TABLA 9. DIMENSIONES PROTOTIPO INICIAL.	126
TABLA 10. INVENTARIO MAQUINAS ECCI.....	128
TABLA 11. COSTO APROXIMADO MATERIALES.	132
TABLA 12. COSTO APROXIMADO MANO DE OBRA.....	132
TABLA 13. COSTO APROXIMADO MAQUINARIA Y EQUIPOS.	133
TABLA 14. PRESUPUESTO ESTIMADO.....	134

LISTA DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS

Abreviaturas con letras latinas

Símbolo	Definición
A	Área
b	Espesor de paleta
B	Constante de amortiguación por cojinetes
BHP	Capacidad de una caldera para entregar vapor
C	Constante de Amplitud
CV	Caballos de vapor
d	Distancia al eje de giro
F	Fuerza
f	Frecuencia del perfil sinusoidal
H₀	Medio espesor del rotor
I	Momento de Inercia
J	Joules
k	Constante
Kg	Kilogramos
KW	Kilowatts
L	Longitud de la Paleta
m	Masa
MAX	Máximo
MIN	Mínimo
mL	mililitros
MW	Megavattios
N	Número de paletas y cámaras
P	Presión
R	Radio mayor
r	Radio menor
T	Tiempo

V	Volúmen
v	voltios
w	Trabajo
W	Vatios
X	Brazo mecánico
Z	Distancia entre el eje del rotor y el eje del perfil sinusoidal

Símbolos con letras griegas

Símbolo	Definición
τ	Torque
ω	Velocidad Angular
α	Aceleración angular
λ	Separación entre paletas
β	Posición Angular
Δ	Cambio
μ	Rugosidad
π	Constante Pi
Ω	Relación de compresión
\acute{o}	Potencia

Subíndices

Subíndice	Definición
C	Circunferencia
CFI	Cámara Inferior vista de frente
CFS	Cámara superior vista de frente
CI	Cámara inferior
CM	Centro de masa
CR	Cámara vista desde el Rotor
CS	Cámara superior
f	Final
i	Inicial
m	Motor
PI	Paleta Inferior

PIN	Paleta inferior N
PS	Paleta superior
PSN	Paleta superior N
PT	Planta térmica
R	Radio mayor
r	Radio Menor
ST	Sección toroidal
T	Toroide
t	total

Superíndices

Superíndice	Definición
n	Exponente, potencia

Abreviaturas

Abreviatura	Definición
®	Software Licenciado
ACPM	Aceite combustible para motores
C.N.C.	Control Numérico Computarizado
CAD	Diseño asistido por computador
CAE	Análisis de diseño en ingeniería
CAM	Manufactura asistida por computador
DOE	Diseño de experimentos
DTG	Dimensiones y tolerancias geométricas
RCM	Mantenimiento centra en Confiabilidad
RPM	Revoluciones por minuto
RPS	Revoluciones por segundo
SI	Sistema internacional

TÍTULO

Diseño de un motor rotativo por expansión de vapor

RESUMEN

El proyecto planteado en este documento está enmarcado dentro del Grupo de Investigación de Aprovechamiento Tecnológico de Materiales y Energía, GIATME, de la Universidad ECCI y hace parte de un macro proyecto aprobado dentro de una convocatoria interna de la universidad, el cual busca contar con otra máquina térmica conectada a la planta térmica ECCI-1, en la que se puedan variar las condiciones de entrada y determinar el comportamiento del proceso ocurrido al interior del equipo.

El objetivo general del proyecto es diseñar un motor que funcione por expansión volumétrica y evaluar la viabilidad para la fabricación, funcionamiento y ubicación del mismo para que funcione eficientemente bajo los parámetros de salida de la caldera ECCI-1 del laboratorio de máquinas térmicas de la sede J de la Universidad, para la cual se realiza:

En primera instancia se realiza la evaluación de cada una de las tipologías existentes de motores rotativos que están en la capacidad de ser modificados para convertirlos de motores rotativos de combustión a motores rotativos de expansión volumétrica, que funcionen con el vapor de agua producido en la planta térmica de la universidad, empleando una matriz de Pugh para determinar la tipología del motor.

Por otro lado, se caracteriza la calidad del vapor desde la salida de la caldera hasta antes de la turbina en la planta y así, por medio de la aplicación del modelo estadístico de diseño de experimentos (DOE) se evalúa la mejor ubicación del motor.

Adicionalmente, el DOE también permite determinar qué tipos de plantas sirven como fuente primaria de alimentación para el motor.

Cabe resaltar que el modelamiento matemático del motor se desarrolla a partir de la tipología seleccionada, por lo cual, se plantean las ecuaciones que gobiernan y describen todo el proceso ocurrido al interior del motor durante su funcionamiento. De este modo dicha información sirve para programar una herramienta computacional en MATLAB® que da solución a dichas ecuaciones asignando valores a las variables por medio de diferentes métodos numéricos mediante iteraciones en el software programado.

Posterior a esto, se modela en CAD un prototipo a partir de los datos generados en la herramienta computacional, por medio de la aplicación de SOLID WORKS®, y así poder dimensionar el prototipo planteado y generar un paquete de planos del modelo desarrollado.

Por último, se realiza un estudio de viabilidad técnico-económico del motor diseñado, evaluando si con las máquinas con las que cuenta la universidad se puede fabricar y el costo aproximado para la fabricación del mismo.

PALABRAS CLAVE:

- Diseño.
- Simulación.
- Motor de vapor.
- Expansión volumétrica.
- Laboratorio.
- Plantas térmicas.

ABSTRACT

The project proposed in this document is framed within the research group of technological use of materials and energy, GIATME, of the ECCI University and is part of a macro project approved within an internal call of the university, which seeks to have another thermal machine connected to the ECCI-1 thermal plant, in which the input conditions can be varied and the behavior of the process occurring inside the equipment can be determined.

The general objective of the project is to design a motor that functions by volumetric expansion and to evaluate the feasibility for the manufacture, operation and location of the same so that it works efficiently under the output parameters of the ECCI-1 boiler of the thermal machines laboratory of the headquarters. J of the University, for which it is carried out:

In the first place, an evaluation of each of the existing types of rotary engines is carried out, which are capable of being modified to convert them from rotary combustion engines to rotary engines with volumetric expansion. A Pugh matrix is applied to determine the type of engine to be designed.

On the other hand, the characterization of the steam quality from the outlet of the boiler to before the turbine of the plant aids to locate the best motor position, through the application of a Design Of Experiments (DOE) technique.

It should be noted that the mathematical modeling of the motor is developed from the selected typology, therefore, the equations that govern and describe the entire process that occur inside the motor during its operation are stated. This is used to create a computational tool in MATLAB®, by solving these equations through different iterations of the programmed software.

By means of the SOLID WORKS application, a prototype is modeled in CAD from the data generated in the computational tool, and thus the proposed prototype and its the planes of the model are developed.

Finally, a technical-economic feasibility study is carried out to determine if the designed motor can be manufactured, evaluating whether it can be manufactured with the machines that the University has and the approximate cost for its manufacture.

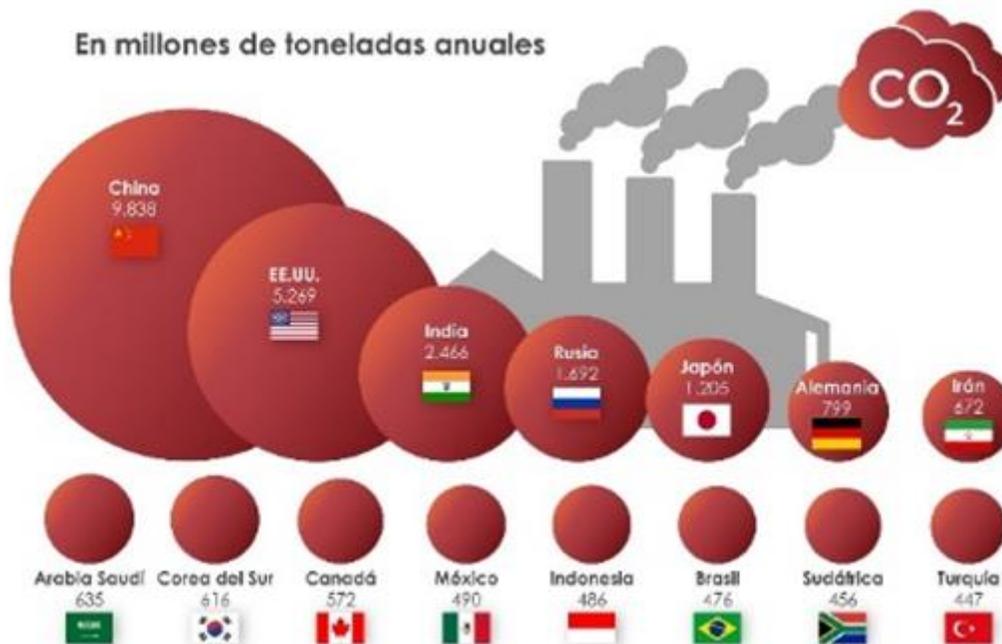
KEYWORDS

- Design.
- Simulation.
- Steam Engine.
- Volumetric expansion.
- Laboratory.
- Thermal plants.

1 INTRODUCCIÓN

Actualmente, hay una situación medioambiental, debido al calentamiento global producido por los gases de efecto invernadero. Por lo cual, es importante desarrollar tecnologías que ayuden a mitigar los efectos de este fenómeno o que al menos no contribuyan a su intensificación. Entre los campos que abarcan estas tecnologías, es importante direccionar la investigación al desarrollo de motores que funcionen con energías menos contaminantes.

Figura 1. Emisiones de dióxido de carbono a nivel mundial.

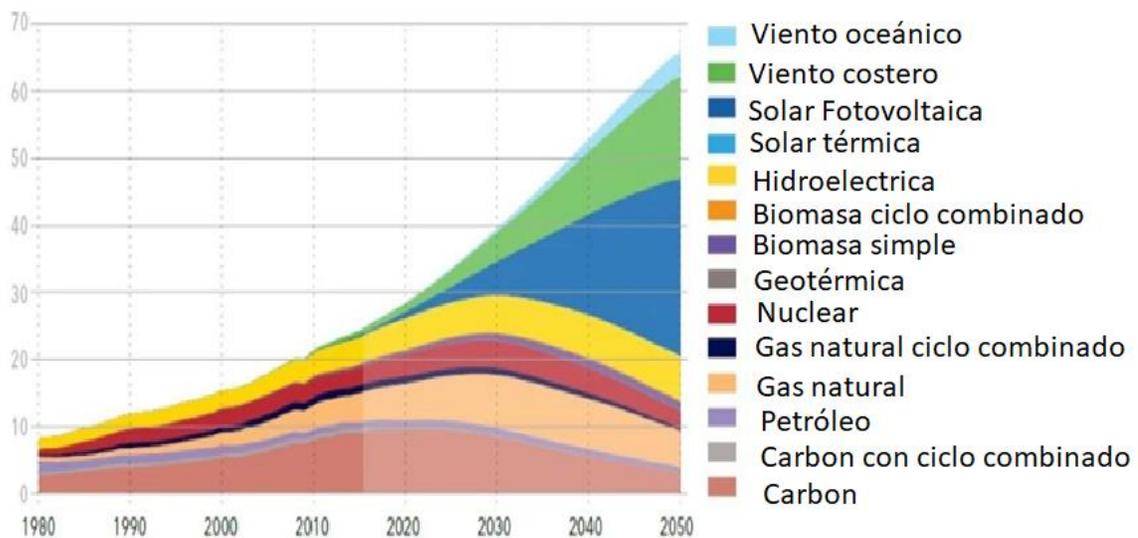


Fuente: Revista el orden mundial.[1]

En la Figura 1, se muestra que los mayores emisores de CO₂ son las potencias económicas del planeta, por ejemplo, el desarrollo que China ha tenido durante las últimas dos décadas ha surtido un evidente impacto en las emisiones de dióxido de carbono. Le sigue Estados Unidos y otro conjunto de potencias y países en desarrollo, India, Rusia, Alemania e Irán, países donde el sector industrial tiene un peso importante dentro de la economía.

Sin embargo, existe la tendencia de reducir el uso de combustibles fósiles buscando el uso de energías alternativas (como se muestra en la Figura 2) con el fin de reducir el impacto ambiental de las actividades humanas. Por lo cual, hay varios proyectos existentes en el mundo que buscan modificar y mejorar los motores de combustión y así reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

Figura 2. Fuentes para la generación de energía eléctrica.



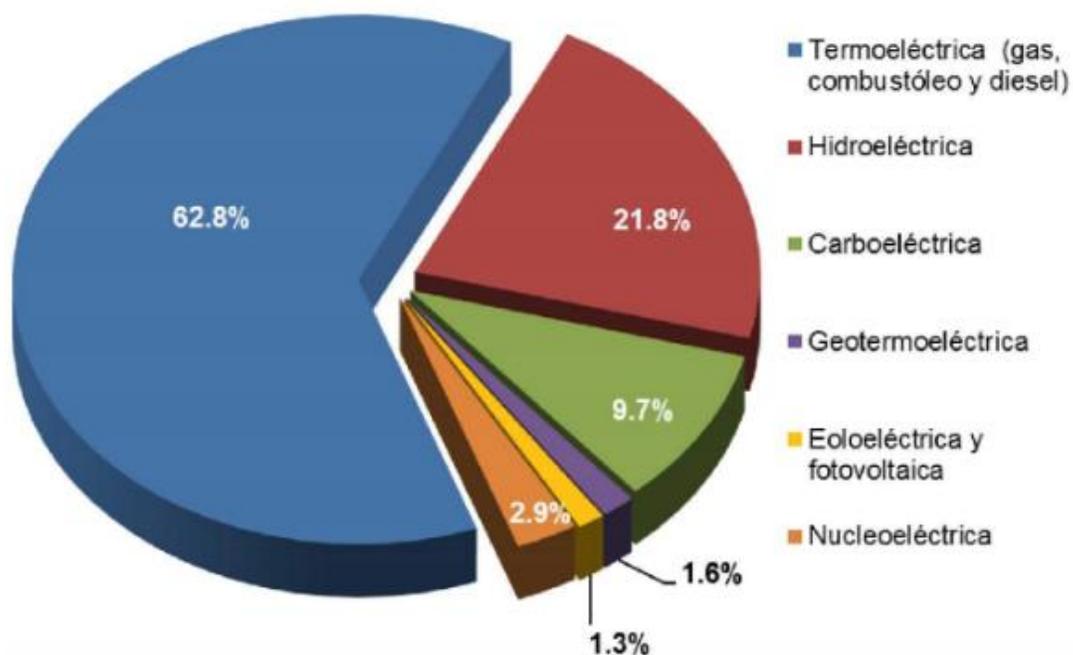
Fuente: Periódico de la energía.[2]

Como se muestra en la Figura 2, se espera que la capacidad de la red eléctrica global se triplique para el año 2050, es decir, que el 80% de la producción mundial de electricidad provendrá de las energías renovables para el año 2050. Así mismo, para el 2027, se espera que la mitad de todas las ventas de automóviles nuevos en Europa sean vehículos eléctricos.

Adicionalmente, con el fin de identificar un panorama a nivel mundial sobre generación de energía, en la Figura 3 se muestra que la fuente primaria para la

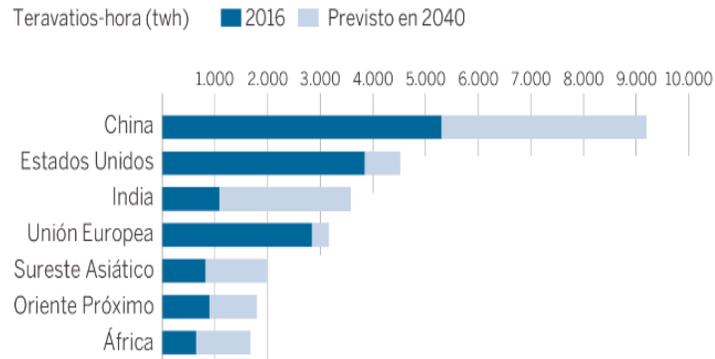
generación de energía en la actualidad son los combustibles fósiles, principales generadores de gases de efecto invernadero que ocasionan el calentamiento global.

Figura 3. Fuentes para la generación de energía eléctrica.



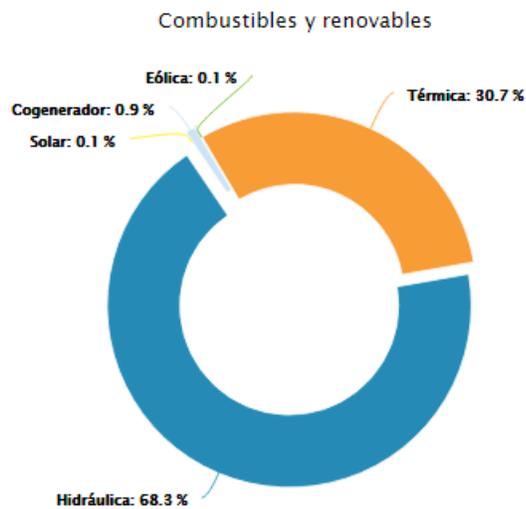
Fuente: Análisis de circuitos eléctricos. [3]

Así mismo, en la Figura 4 se muestra la proyección del consumo eléctrico que van a tener los países con un sector industrial grande hacia el año 2040. Por lo tanto, si estas naciones quieren evitar o mitigar los efectos del cambio climático, deben iniciar o fortalecer los proyectos que busquen generar energía a partir de fuentes renovables o menos contaminantes.

Figura 4. Proyección de consumo energético nivel mundial.

Fuente: Diario El País.[4]

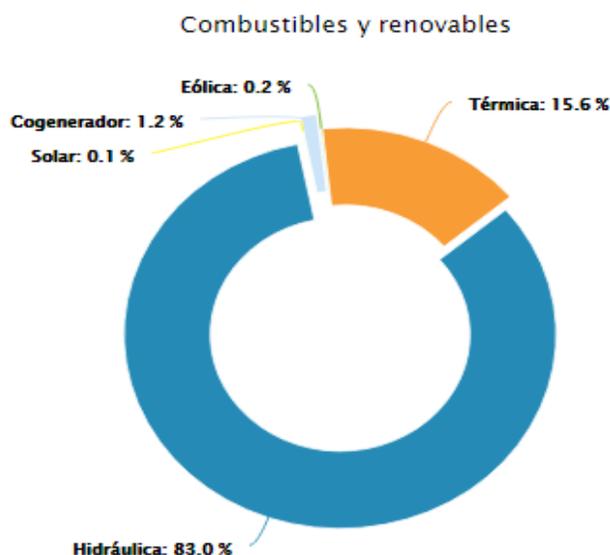
Ahora bien, observando el comportamiento de la producción energética de Colombia y comparándola con otros países, como lo hace la Asociación Colombiana de Generadores de Energía Eléctrica (ACOLGEN) [5], se obtiene que la matriz de generación eléctrica colombiana es la sexta matriz más limpia del mundo, debido a que el 68% de la capacidad instalada es de fuentes renovables de energía eléctrica (Ver Figura 5).

Figura 5. Generación de energía en Colombia.

Fuente: Asociación Colombiana de Generación de Energía (ACOLGEN).[6]

Por otro lado, las empresas Asociadas a ACOLGEN, representan el 70% de la capacidad instalada del país, de la cual el 85% son plantas de fuentes renovables, como se muestra en la Figura 6.

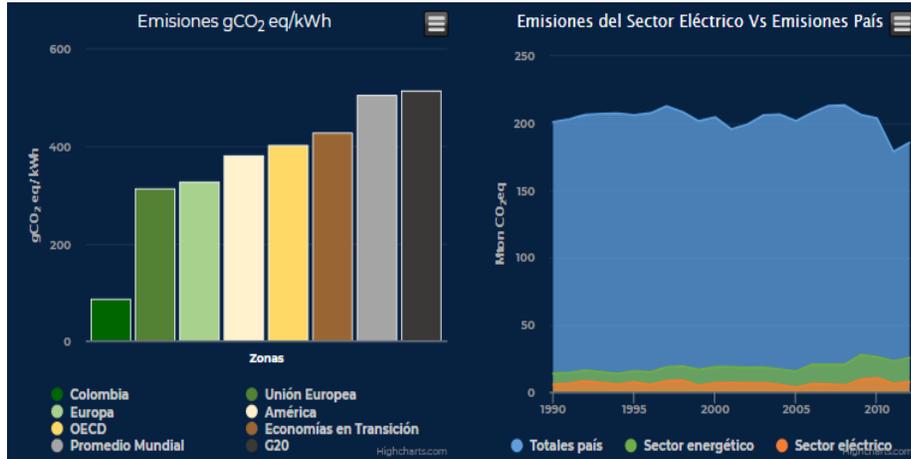
Figura 6. Generación de energía asociados a ACOLGEN.



Fuente: Asociación Colombiana de Generación de Energía (ACOLGEN).[6]

Adicionalmente, en cuanto a emisiones de dióxido de carbono, ACOLGEN muestra que la matriz eléctrica colombiana se destaca como una de las más limpias a nivel mundial, como resultado de la participación mayoritaria de tecnologías que utilizan el agua como fuente de generación, con un factor de emisión 83% menor al promedio mundial y el sector eléctrico tiene una participación de emisiones en el país, promedio histórico, de 4% como se muestra en la Figura 7.

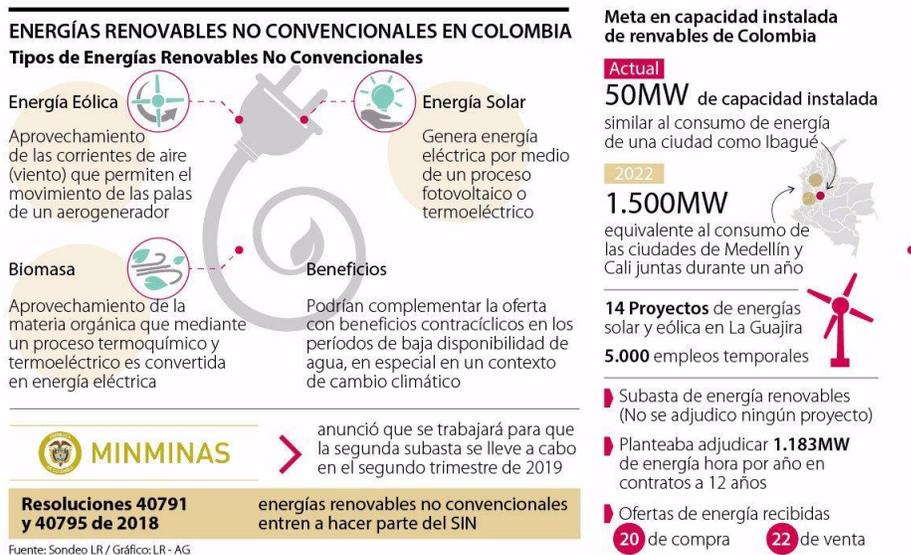
Figura 7. Emisiones de Dióxido de Carbono.



Fuente: Asociación Colombiana de Generación de Energía (ACOLGEN). [6]

Por otro lado, en cuanto a capacidad instalada, El diario de la republica muestra por medio de la Figura 8 en su artículo Meta de capacidad instalada que el país sí está aportando para reducir las emisiones de dióxido de carbono, aprovechando los recursos hídricos existentes en el país, puesto que la mayoría de las generadoras son hidroeléctricas.

Figura 8. Capacidad instalada en Colombia.



Fuente: Diario La República. [7]

Para el caso particular de la presente investigación, el estudio se centra en las centrales termoeléctricas, puesto que una planta de esta tipología a escala es la que está instalada en el laboratorio de máquinas térmicas de la Universidad.

Una central termoeléctrica es una maquina térmica que genera energía eléctrica por medio de combustibles como el petróleo, gas natural, carbón y núcleos de uranio o la combinación entre ellos.

Adicionalmente, en la Universidad ECCI existe la necesidad de enseñar a sus estudiantes el proceso de transformación de energía térmica a trabajo, y fortalecer el proceso de aprendizaje de los estudiantes en las asignaturas de máquinas térmicas, utilizando la planta térmica piloto ubicada en la sede J de la institución (Ver Figura 9), la cual tiene una baja eficiencia.

Figura. 9. Planta Térmica ECCI-1



Fuente: Practica realizada octubre 2020

Es importante resaltar que la planta tiene una caldera pirotubular de 15 BHP, una presión de diseño de 150 PSI y una presión de operación de 125 PSI, que comparada con otros equipos esta entre 3 y 15%, la cual es baja para este tipo de máquinas térmicas .

Por lo anterior, este proyecto de investigación busca encontrar una tipología de motor rotativo de expansión volumétrica que permita el uso de vapor de agua como fuente de alimentación primaria. Esto por medio de unas variaciones en su geometría original, debido a que la mayoría de los motores existentes son de combustión interna funcionando bajo el ciclo termodinámico Otto o Diésel.

De este modo, se realiza una revisión bibliográfica sobre los motores existentes con el fin de evaluar cuál de ellos es susceptible a que por sus características técnicas pueda ser modificado, garantizando su funcionalidad mediante la expansión volumétrica y no mediante la combustión.

Existen varias arquitecturas de motores rotativos que fueron diseñadas y que se estudian detalladamente con el fin de ser modificadas, dando solución a la problemática planteada en el presente proyecto. De otro modo, existen varias herramientas estadísticas que permiten seleccionar la mejor opción entre las tipologías estudiadas. En este caso, se implementa una matriz de Pugh y un diagrama de Pareto.

Por otro lado, este proyecto de investigación desarrolla una herramienta computacional basada en el modelamiento matemático y el estudio de diferentes condiciones de entrada, que permita obtener al usuario las variables de respuesta del motor tales como, velocidad angular, aceleración angular, potencia entregada y torque.

Así mismo, se realiza el modelado en SOLIDWORKS® del motor a partir de los datos obtenidos con el software generado.

Como en todos los proyectos de este tipo, es de suma importancia tener en cuenta el factor técnico-económico, por lo cual este proyecto cuenta con un análisis de este tipo que determina si es posible fabricar el motor modelado, con la maquinaria existente en la universidad y un costo aproximado de dicha labor.

2 PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

2.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La Universidad ECCI cuenta con una planta térmica piloto que es utilizada en las asignaturas de máquinas térmicas de los diferentes programas que ofrece. Sin embargo, esta planta está presentando baja eficiencia térmica del 3% aproximadamente.

Por tal razón, dentro del grupo GIATME (Grupo De Investigación De Aprovechamiento Tecnológico De Materiales Y Energía) de la Universidad, se contempla realizar un proyecto interdisciplinar que aumente la eficiencia de la planta. Para esto, se plantea diseñar un motor de expansión volumétrica que funcione eficientemente con el vapor generado en dicha planta térmica.

En general, dentro de los motores por expansión volumétrica existentes sólo se encuentran tipologías de motores alternativos. Razón por la cual, se busca darle un valor agregado de innovación al diseñar un motor rotativo que funcione por expansión volumétrica.

Para diseñar este motor el primer problema que se encuentra es seleccionar una tipología de motor rotativo que facilite los cálculos para su diseño y que permita su modificación para que funcione con vapor, debido a que los motores rotativos existentes son en su mayoría de combustión o ciclo Otto.

Otro factor para tener en cuenta es seleccionar la mejor ubicación de este motor dentro de la planta térmica, debido a que existen varios puntos donde se puede ubicar y dependiendo de estos puntos, el estado del vapor puede variar afectando la eficiencia y la integridad del motor.

Por otro lado, se necesita saber que el motor diseñado pueda funcionar con el vapor generado en la planta térmica para lo cual se modela matemáticamente y así poder predecir este y otros parámetros de respuesta dentro de los que se encuentra el diseño y el dimensionamiento de la tipología programada

Por lo anterior, después de una contextualización sobre la situación actual de las plantas, se realiza una práctica en la planta térmica de la universidad y se evidencia que efectivamente las prácticas se desarrollan para demostrar los procesos termodinámicos ocurridos en esa máquina térmica que funciona bajo el ciclo Rankine, con el único propósito de generar energía eléctrica a través de una turbina conectada a un generador eléctrico [8].

Cabe resaltar que esta planta no tiene una configuración ideal, es decir que cuenta con instrumentación análoga y digital para mejorar la eficiencia ideal de un ciclo Rankine. Dentro de esos procesos adicionales que generalmente busca incrementar dicha eficiencia de la planta están [9].

- Un sobrecalentador que eleva la temperatura del vapor dentro del ciclo.
- Un proceso recalentamiento.
- Un proceso regenerativo.

Por esta razón, luego de la revisión en campo de la planta en funcionamiento, se determina que la eficiencia tan baja de la planta se debe a fallas dentro de los componentes internos de la misma, por lo cual se recomienda contactar al fabricante o distribuidor para que realice los mantenimientos o reparaciones necesarios.

Así mismo, se encuentra que por medio del desarrollo de la presente investigación, también se genera un valor agregado a la Universidad, para que mejore sus procesos pedagógicos y los estudiantes tengan la oportunidad de realizar dentro de sus prácticas un proceso de transformación de energía: donde se genere energía en forma de trabajo mecánico con el fin de que el motor diseñado sea la fuente primaria de alimentación de otra máquina conectada de forma paralela, y alineada axialmente con el eje del motor. Lo anterior será adicional a transformar energía térmica en energía eléctrica [10].

Por otro lado, para poder realizar la practica en la planta termica y levantar los datos de presiones en cada uno de los puntos de la planta, se revisan las características técnicas de los componentes, del funcionamiento y del mantenimiento, descritas en el documento Análisis Del Ciclo De Vida De La Planta Térmica Didáctica De La Universidad ECCI En Las Etapas De Operación Y Mantenimiento[10], donde se existen una serie de recomendaciones complementarias para que al realizar la

práctica en la planta térmica, estando en óptimas condiciones, se alcance una mayor eficiencia a la ideal y se cumpla con el protocolo realizado por el ingeniero Daniel Gómez [11] en sus cátedras de máquinas térmicas dentro de la Universidad.

Es decir, que con estos datos tomados se ubica el motor diseñado para que funcione con el vapor generado en la misma planta, sin tener que hacer muchas modificaciones a la estructura de la misma, y sin que esa ubicación afecte la eficiencia del motor en funcionamiento.

Adicionalmente, para generar el modelado en SolidWorks® por parte de un estudiante de tecnología es necesario determinar los elementos mecánicos estandarizados a utilizar para el ensamble del motor. De tal manera, que se pueda estudiar la viabilidad de poder fabricar el motor con las máquinas herramientas existentes dentro de la universidad y establecer un precio aproximado de dicha fabricación.

Finalmente, se identifican varias alternativas para que futuros estudiantes de los diferentes programas realicen nuevas investigaciones fortaleciendo más el trabajo interdisciplinar realizado. Esto mediante la evaluación de los resultados numéricos en el software, modificando los parámetros de entrada del modelo generado.

2.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿Se puede diseñar un motor rotativo por expansión de vapor que opere eficientemente por expansión volumétrica con las condiciones del vapor generado en la planta piloto ECCI 1?

Además ¿Es posible fabricar el motor diseñado con las máquinas instaladas en los laboratorios de la universidad ECCI y ubicarlo dentro de la planta sin realizar muchas adecuaciones físicas en ella?

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar termo-mecánicamente un motor de vapor tipo rotativo de expansión volumétrica para que funcionen eficientemente, siendo ubicado en la planta térmica ECCI-1 del laboratorio de máquinas térmicas de la sede J de la Universidad, y evaluar la viabilidad para su fabricación con las máquinas instaladas en los laboratorios de mecanizado de la misma universidad.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

OE1:

Caracterizar el proceso de funcionamiento de la planta térmica ECCI-1 que servirá como fuente de alimentación del motor de vapor tipo rotativo de expansión volumétrica logrando su mayor eficiencia.

OE2:

Definir mediante modelos mecánicos y termodinámicos las ecuaciones gobernantes que describen el comportamiento del vapor dentro del motor en funcionamiento con el fin de elaborar una herramienta computacional que muestre el comportamiento de esas variables de salida en forma gráfica y de esa manera, obtener los parámetros dimensionales para un prototipo.

OE3:

Definir parámetros dimensionales y técnicos de los componentes del motor, para que un estudiante de tecnología de mecánica automotriz entregue planos acotados y modele en un software CAD el prototipo resultante del OE2.

OE4:

Evaluar la viabilidad para la fabricación del modelo generado en el OE3 con las máquinas herramientas instaladas en el laboratorio de mecanizado convencional y de control numérico computarizado de la sede P y K respectivamente de la Universidad ECCI y generar un presupuesto estimado de fabricación.

4 JUSTIFICACIÓN Y DELIMITACIÓN

4.1 JUSTIFICACIÓN

Actualmente, en la Universidad ECCI existe la necesidad de enseñar a sus estudiantes el proceso de transformación de energía térmica en trabajo, y fortalecer el proceso de aprendizaje de los estudiantes en los diferentes ciclos que ofrece. Esto se debe a que en este momento la planta térmica ECCI-1 usada en los laboratorios de las asignaturas de máquinas térmicas, presenta una eficiencia de 3.68%, la cual es baja respecto a máquinas que poseen esta misma configuración y que presentan una eficiencia cercana al 30%.

Por tal motivo, el grupo de investigación GIATME (Grupo De Investigación De Aprovechamiento Tecnológico De Materiales Y Energía) de la universidad ha ideado un proyecto, en el cual se diseña un motor rotativo de expansión volumétrica que opere con el vapor de la planta térmica ECCI-1.

De acuerdo con lo anterior, se confirma la necesidad de seguir realizando prácticas en esa planta térmica pero generando trabajos de investigación para que esa eficiencia se incremente hasta que el valor llegue lo más cercano posible a la eficiencia ideal de operación [12].

Así mismo, el desarrollo del presente proyecto contribuye al conocimiento sobre motores y su viabilidad para ser modificados de acuerdo con la fuente de energía primaria que los alimenta, debido a que se estudian las tipologías existentes que trabajan por combustión y se evalúa cual de todas puede llegar a trabajar por expansión volumétrica de manera eficiente.

4.2 DELIMITACIÓN

La delimitación de este proyecto reside en el levantamiento de información actualizada, sobre el estado del vapor en cada uno de los puntos de la planta térmica

de la Universidad ECCI en Bogotá y la determinación del mejor punto para ubicar el motor diseñado.

Por otro lado, se plantean las ecuaciones que gobiernan el funcionamiento del motor con el fin de poder dimensionar un prototipo que funcione eficientemente con el vapor generado en la planta térmica de la universidad, dando solución a dichas ecuaciones por medio de la aplicación de una herramienta computacional generada en Matlab®, que represente de forma gráfica los parámetros de respuesta del motor diseñado.

Posterior a esto, se hacen representaciones en dos y tres dimensiones normalizadas de los elementos, partes constituyentes del motor rotativo y ensambles del motor. Así pues, se entregan planos y ensambles dibujados en SolidWorks, que sirven de guía para la generación de los modelos CAE y CAM.

Adicionalmente, en el presente proyecto se realiza un estudio técnico-económico que determina la viabilidad de fabricación del prototipo diseñado usando las máquinas existentes en la universidad.

En conclusión, para la ejecución de la presente investigación únicamente se requiere del uso de equipos de cómputo y software especializado, razón por la cual el factor económico reside en el costo de las licencias de los softwares usados, asumido por la universidad. No obstante, el diseño presentado no va a ser fabricado.

4.3 ALCANCE

En la presente investigación se selecciona la tipología de motor rotativo que mejor funcione por expansión volumétrica y la mejor ubicación del motor dentro de la planta térmica, garantizando la menor cantidad de adecuaciones físicas a la misma.

De otro modo, se programa un software en Matlab® que calcule los parámetros del funcionamiento del motor como velocidad angular, aceleración angular, torque y potencia entregada de forma gráfica y numérica, usando los valores de entrada que ingresa un usuario a través de una ventana de comandos (parámetros dimensionales y estado del vapor). Lo anterior, con el fin de modelar y simular en SolidWorks® un primer prototipo que opere eficientemente con el vapor de salida de la planta térmica.

Adicionalmente, se entrega la viabilidad de fabricación de dicho motor con las máquinas existentes en la universidad.

Cabe resaltar que la presente investigación no incluye dentro de sus entregables los siguientes elementos:

- Listado de adecuaciones y accesorios en la planta térmica para acoplar el motor.
- Interfaz gráfica de usuario del software programado en Matlab®.
- Una simulación dinámica y análisis por elementos finitos del funcionamiento del motor.
- Proceso para la fabricación en máquinas convencionales y de C.N.C.
- Prototipo físico del motor.

5 MARCOS DE REFERENCIA

5.1 ESTADO DEL ARTE

El estudio detallado de las plantas térmicas, de acuerdo a lo estipulado en el Libro de Termodinámica de Cengel [13], define que estas máquinas presentan una configuración básica denominada ideal. Es decir, que toda planta térmica que funcione por medio del ciclo Rankine como mínimo debe contener los siguientes elementos:

- Bomba.
- Caldera.
- Turbina.
- Condensador.

Por otro lado, las plantas térmicas pueden ser usadas con diferente tipo de combustible, lo único que varía es el tratamiento previo que se le da a este y los quemadores de la caldera también son distintos.

Los diferentes combustibles utilizados en este tipo de plantas son fósiles como el Gas natural, Carbón o Diésel. Las Plantas que funcionan con estos combustibles se llaman “Convencionales”, debido a que funcionan con combustibles fósiles, a diferencia de las plantas que funcionan con combustibles solares o nucleares, a ese tipo de plantas se les denomina “Combinadas”, ya que unen las Turbinas de Vapor con las de Gas, las cuales son sistemas aparte [14].

El Diésel o Gasóleo es un hidrocarburo líquido, cuando es extraído del petróleo se le conoce como Petrodiésel, en cambio al extraído de aceite vegetal se le conoce como Biodiesel, en Colombia el Petrodiésel es conocido como ACPM, por sus siglas Aceite Combustible Para Motores, este es el combustible que maneja la planta piloto de Vapor de la Universidad ECCI.[12].

Este último se quema en la caldera liberando calor para transformar el agua en vapor, el cual con la presión elevada hace girar los alabes de la(s) turbina(s), lo que transforma la energía cinética en energía mecánica, esta energía pasa al Generador, el cual cumple dos funciones en una de manera óptima, un transformador aumenta la tensión o diferencia de potencial, de la energía eléctrica suministrada por el alternador, y un alternador es el que convierte la energía mecánica en energía eléctrica. Los generadores representan una síntesis de estas dos máquinas.

El vapor utilizado es enviado al condensador donde se transforma de nuevo en agua para iniciar el ciclo otra vez, el líquido que se utiliza para el enfriamiento suele ser agua, la cual ingresa fría al sistema y sale caliente.

De acuerdo a lo mencionado en el artículo Ciclo Rankine Simple[9], el fluido transportado en estado líquido por esa planta térmica es suministrado a la bomba, la cual aumenta la presión isentrópicamente hasta que alcance la presión de la caldera. Luego, este fluido ingresa a la caldera por medio de un proceso isobárico, es decir, elevando la temperatura pero manteniendo la presión constante.

Ese fluido, cuando está dentro de la caldera, pasa de líquido comprimido a vapor sobrecalentado, es decir, que sufre una evaporación. Luego el gas resultante de ese cambio de fase a alta temperatura pasa a la turbina, donde se expande isentrópicamente para generar trabajo que usualmente es transmitido a un generador con el fin de que este sistema entregue energía eléctrica [15].

Cabe aclarar en ese proceso descrito anteriormente, la temperatura y presión disminuyen. En consecuencia, este vapor resultante que es un vapor húmedo de gran calidad ingresa a un condensador, el cual pasa nuevamente a una fase líquida, y por último, ese líquido recircula nuevamente a bomba para completar el ciclo termodinámico que como se mencionó anteriormente se denomina Rankine ideal.

Es importante recordar, que este ciclo Rankine descrito anteriormente se denomina ideal porque las pérdidas en estas plantas descritas son bajas y generalmente para incrementar esa eficiencia se realizan diferentes configuraciones. Por ejemplo, en el artículo "Conversión de la central térmica de Malacas de gas natural, de ciclo simple abierto de 100mw a ciclo combinado de 300MW" [16], se describe cómo realizan un estudio energético y económico que permite especificar el alcance del proyecto para convertir la central de ciclo abierto simple Malacas de 100 MW, a ciclo

combinado, mediante la adición de una turbina de similares características a la ya existente.

Los resultados obtenidos en ese documento muestran que en el estudio energético existe una mejora de la eficiencia térmica desde 30.09% en operación en ciclo abierto simple, hasta 52.11% en operación en ciclo combinado. Y del estudio de costos, el costo variable total (CVT), disminuye desde 29.66 US\$/MWh, hasta 19.05 US\$/MWh. En el estudio económico también obtuvieron un resultado de 1.29 en la relación beneficio costo (B/C), 25.6% en la tasa interna de retorno (TIR) y aproximadamente 5 años para la recuperación de la inversión de la central [16].

Por otro lado en Perú, la publicación “Conversión de ciclo simple a ciclo combinado para incrementar la potencia instalada de la central térmica de aguaytía manteniendo el consumo de gas natural” [15], muestra como realizan un estudio de factibilidad técnica y económica para realizar la configuración de disposición de equipos para la conversión de la central térmica de Aguaytia de ciclo simple a ciclo combinado, incrementando su potencia instalada en 100MW sin variar el consumo de combustible.

En cuanto a los resultados obtenidos en la investigación anterior, fueron determinar una eficiencia de planta obteniendo un incremento de 33,78% como ciclo simple y a 52,9% como ciclo Combinado; también se establece que el costo variable total operando como ciclo combinado es de 15.28 US\$/MW y por último se determinó que el tiempo de retorno de la inversión es de 3 años [15] importante en el desarrollo de la presente investigación en el momento de caracterizar la planta termicaECCI-1.

Así pues, en la actualidad existen muchas investigaciones más que realizan este tipo de optimizaciones con el único propósito de incrementar la eficiencia energética de las plantas, generalmente justificadas con ganancias monetarias elevadas.

Dentro de las posibles configuraciones a este tipo de plantas se encuentran aquellas que están condensadas en la tesis “Análisis termodinámico de los ciclos de Rankine” [17] donde se realiza un análisis termodinámico detallado de todas las configuraciones más usuales en este tipo de máquinas.

Actualmente, existe una clasificación de los motores que tiene en cuenta variables físicas, de funcionamiento, fuente de alimentación, entre otras. Por lo cual, se debe seleccionar el que pueda trabajar mejor con las variables que describen el vapor de salida de la planta térmica. Así pues, en el libro “Motores de combustión

interna" [18] se describe la clasificación general de los motores, sus componentes, su funcionamiento ventajas y desventajas.

Ahora bien, de acuerdo a las características, ventajas y desventajas de las tipologías de motores existentes se determina estudiar más a detalle los motores rotativos de que funcionan por expansión de vapor ya que la mayor cantidad de motores de este tipo han sido diseñados para funcionar por medio del ciclo Otto; razón por la cual se tiene en cuenta la tesis "Motores rotativos" [19], a partir de la cual se crea una tabla que muestra que los motores rotativos pueden utilizarse con uno u otro combustible (con base en la información aportada por los diseñadores/fabricantes de cada uno de los motores rotativos estudiados). Ver Tabla 1.

Tabla 1. Uso de combustibles en diferentes motores rotativos.

Motor:		Combustible:					
		GLP	Gas Natural	Biogas	Biodiesel	Alcoholes	Hidrógeno
Wankel	Otto						
	Diesel						
Radmax	Otto						
	Diesel						
Quasiturbina	Otto						
	Diesel						
Roundengine	Otto						
	Diesel						
Ripalda	Otto						
	Diesel						
A. Sánchez	Otto						
	Diesel						
Híbrido A.S.	Otto						
	Diesel						

Fuente: M. B. Farell, «MOTORES ROTATIVOS. Tipologías y combustibles alternativos.». [19]

La opción señalada en la Tabla 1 en color verde, significa que la combinación tecnológica es posible. Así, por ejemplo, sería posible fabricar un motor Radmax que funcionara con Gas Natural, pero este debería de ser de ciclo Otto. De la misma manera, el mismo motor Radmax de Ciclo Otto no podría utilizarse con Biodiesel [19].

De esta Tabla 1 se concluye que un motor puede consumir diferentes tipos de combustibles, siempre y cuando se realicen las modificaciones físicas del caso, debido a que cada combustible tiene unas características diferentes. También se concluye que dentro de los motores rotativos existentes muy pocos han sido trabajados por

expansión volumétrica y la aplicación de este tipo de motores se centra en los motores de combustión interna dejando de lado el estudio a detalle para estos motores rotativos funcionen por expansión de vapor razón por la cual, se hace necesario aplicar una herramienta gerencial para tomar decisiones respecto a unos criterios que se establecen más adelante.

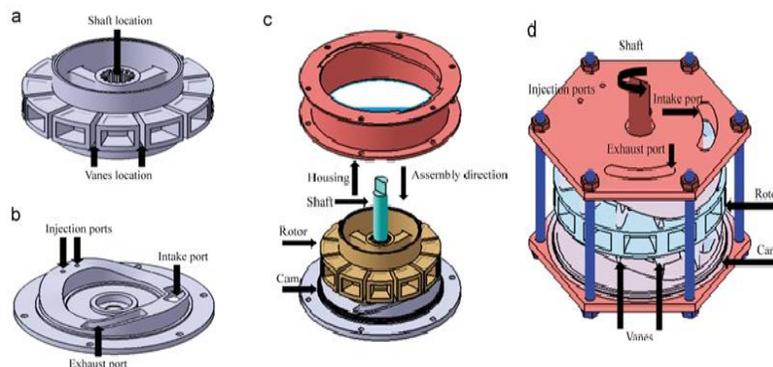
En consecuencia, para seleccionar la tipología de motor a diseñar, se usa la matriz de Pugh explicada en el artículo “La matriz de Pugh para la toma de decisiones y otras” [20], donde se muestra paso a paso cómo elaborar dicha matriz y cómo puede ser aplicada en decisiones como la planteada en el presente proyecto.

El motor Antonio Sánchez Híbrido, según el artículo Optimal control of rotary motors [21], conjuga las ventajas del motor convencional de émbolos con las del motor rotativo, eliminando los principales inconvenientes de ambos.

Adicionalmente, el motor Antimonio Sánchez Híbrido consiste en un motor de cuatro tiempos de desplazamiento positivo ideado con tecnología rotativa y recíproca, por lo que presenta las ventajas de los motores rotativos en cuanto a simplicidad de funcionamiento, la probada fiabilidad y rendimiento de los motores recíprocos de émbolo[22].

Por otro lado, el motor Radmax según la publicación del Journal of Business [23] en su artículo RadMax, presenta una tecnología de motor innovadora y manifiesta que la empresa RadMax Technologies ha trabajado para refinar una tecnología de motor rotativo que, según la compañía, tiene una serie de aplicaciones potenciales y poca competencia.

Figura 10. Despiece motor Radmax.



Fuente: Artículo científico Three-dimensional simulation of a novel rotary-piston engine in the motoring model. [24]

El dispositivo RadMax (Ver Figura 10), llamado RadMax TPXG, puede ser un motor de combustión interna, un compresor, una bomba, una turbina o una combinación de estas funciones, dependiendo de cómo estén configurados los puertos de admisión y escape. Por tal motivo con este artículo se evidencia que para esta tipología de motores la única empresa que lo ha trabajado es Radmax Technologies, ubicada en Canadá, y que tiene las patentes correspondientes. Por lo tanto no existe mucha información al respecto [24].

Así, de acuerdo con el boletín emitido por la misma empresa, quien tiene la patente de esta tipología de motores, realiza una comparación entre una válvula de estrangulamiento y un motor por expansión de gas. Cabe aclarar que estas dos últimas maquinas también son fabricadas, comercializadas y patentadas por ellos mismos [25].

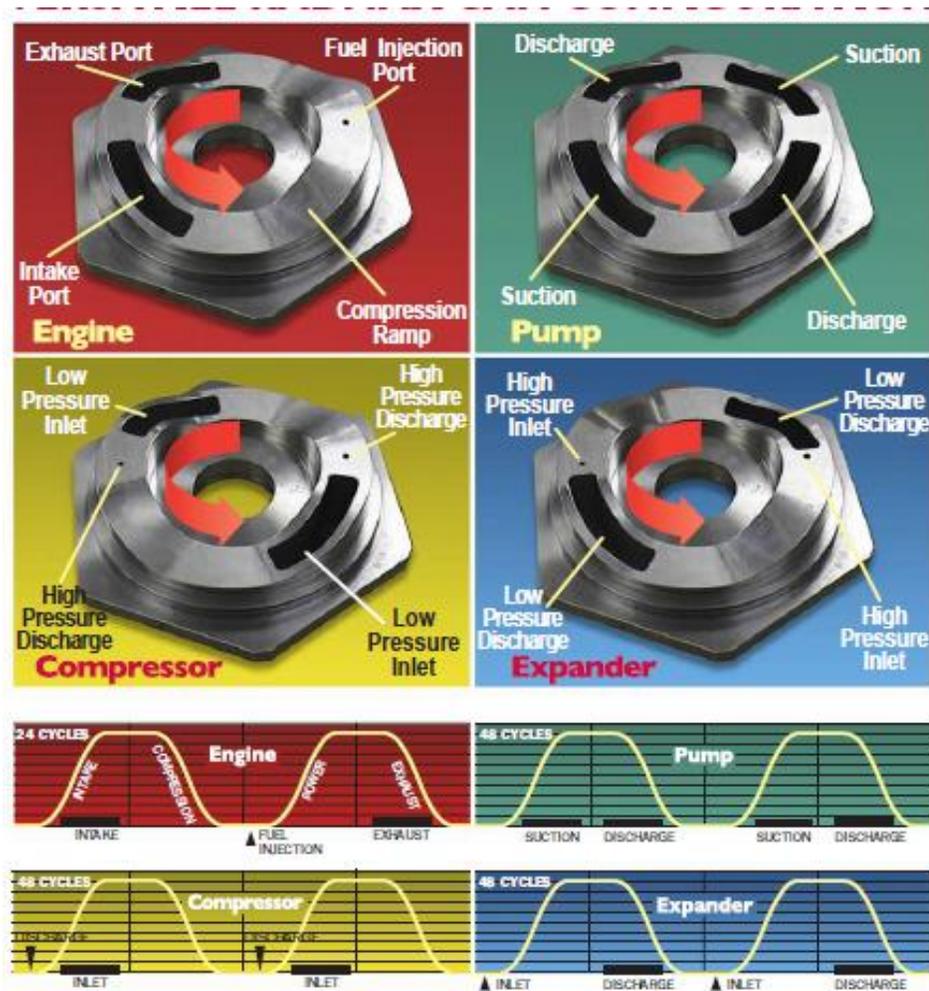
Del mismo modo, en este boletín se manifiesta que dentro de un motor RadMax que funciona por expansión, el fluido circula a través del expansor impulsado por la diferencia de presión entre las presiones de entrada y salida, y dentro de él, el fluido se expande a medida que disminuye su presión. En este caso, la tipología RadMax permite que las fuerzas causadas por la diferencia de presiones en cada una de las cámaras y la expansión del fluido generan el giro del eje del expansor [26] .

Por lo tanto, en lugar de convertir el trabajo de flujo en energía interna como en una válvula de estrangulamiento, parte del trabajo de flujo se convierte en trabajo mecánico en el eje, es decir, la energía asociada con un eje giratorio, y el equilibrio de energía.[27]

Este trabajo mecánico del eje puede ser utilizar para impulsar un generador o algún otro dispositivo. Por lo tanto, la compañía en este boletín determina que el RadMax Expansor permite la recuperación de una parte de la energía utilizada para comprimir el fluido que es irrecuperable con una válvula de estrangulamiento.

Es importante resaltar que la misma compañía en su página principal de internet muestra el ciclo de operación por expansión de gas, el cual se muestra en la Figura.11.

Figura 11. Ciclo de operación Radmax Expansor.



Fuente: Radmax Technology [25]

Por otro lado, para la ejecución de la evaluación técnico-económica de la viabilidad para fabricar el modelo propuesto, se consultan una serie de documentos con el fin de conceptualizar y profundizar más los conocimientos para dicho análisis. Dentro de dichos documentos se encuentran:

El Análisis Técnico Económico De Planta Térmica De Generación De Energía Eléctrica A Partir De Residuos Sólidos Municipales, para Santiago de Chile [28], donde se examina la situación del mercado de residuos en países desarrollados, identificando que en este momento Chile enfrenta un desafío importante en el manejo de residuos debido a que el costo es manejable pero el problema radica en la disposición final de los residuos , específicamente en la región Metropolitana que presenta 7.690 [ton/día].

En cuanto a las plantas termoeléctricas, se revisa la diferencia que hay entre una planta a nivel industrial y una tipo piloto similar a la que tiene la Universidad. Para esto, en la tesis Diseño De Un Plan De Mantenimiento Para El Ciclo Rankine De La Planta Termoeléctrica De La Universidad ECCI Mediante La Aplicación De Mantenimiento centrado en Confiabilidad (RCM). Se encuentra que una planta industrial tiene la capacidad de generar MW: como la empresa Termozipa, la cual, para Enero del 2020 genero una cantidad efectiva neta de 63MW, mientras que las plantas piloto generan kW [29].

A su vez, se encuentra que la planta piloto de la Universidad ECCI, llamada ECCI-1, genera como máx. 2kW de potencia, pero con una eficiencia extremadamente baja comparada con una planta en óptimas condiciones de la misma configuración, que tiene de eficiencia un valor cercano al 30%. La de la planta de la Universidad ECCI es de 3.68%. [30]

Ahora bien, después de la selección de la tipología se determina el mejor punto de ubicación del motor diseñado en la planta térmica, por medio de diseño de experimentos [31] y usando el software Minitab®, que genera unas respuestas de forma gráfica para confirmar o rechazar una hipótesis descrita con unos valores dados [32].

Entonces, para realizar ese modelo de diseño de experimentos se hace una revisión detallada del artículo Optimización Paramétrica Multiobjetivo De Ciclos De Potencia Rankine, Utilizando Técnicas De Diseño De Experimentos De Taguchi [33], donde se optimizan los ciclos de potencia Rankine (simple, recalentado, regenerativo) variando los parámetros de operación más significativos del ciclo, con el objetivo de poder mejorar sus características de calidad que en ese caso de estudio fueron la eficiencia y la destrucción de exergía del ciclo.

Luego de esto, los autores realizaron los modelos matemáticos de los tres diferentes ciclos Rankine. Enseguida se obtuvieron las combinaciones de los parámetros de los ciclos, usando un diseño de experimentos con un enfoque de Taguchi, en donde se seleccionó un arreglo ortogonal. Este último cumple con la necesidad de cubrir tres factores a tres niveles y un número mínimo de siete experimentos. Posteriormente, al tener la combinación de los parámetros, se insertaron en el software Engineering Equation Solver (EES) para hacer la simulación de los sistemas con cada combinación obtenida y ver el comportamiento de la

eficiencia y la destrucción de exergía a los tres ciclos. Al tener los resultados del comportamiento de cada combinación ellos analizaron el diseño de Taguchi para obtener la mejor combinación de parámetros para aumentar la eficiencia y disminuir la destrucción de exergía. Al tener esos parámetros de optimización realizaron un experimento de confirmación donde en los tres casos de los ciclos Rankine se obtuvo un aumento en los parámetros de calidad. Respecto a los parámetros iniciales del ciclo.[33]

Es por eso que para determinar la mejor ubicación del motor se utiliza este software aplicando el método de diseño de experimentos con la información generada en la práctica de la planta térmica de la Universidad.

Además, durante la investigación se aplican todos los conocimientos adquiridos en cálculo integral y diferencial para generar las ecuaciones gobernantes que describen el comportamiento del vapor dentro del motor en funcionamiento. Dentro de estos conocimientos aplicados está, el cálculo de áreas bajo la curva por medio de métodos de integración, leyes de Newton, leyes de mecánica de fluidos, termodinámica [34] entre otros.

En consecuencia, para generar las ecuaciones gobernantes del motor RadMax se realiza la revisión del artículo científico Boundary Conditions for Numerical Calculation of Gas Exchange in Piston Engines [35] en la cual se realiza una estimación de la eficiencia de la técnica de establecer condiciones de contorno con el uso de funciones dinámicas de gas para calcular numéricamente los procesos de admisión y escape en motores de pistón [35].

Así mismo, en esa investigación se desarrollan modelos matemáticos para diferentes motores, se realizan cálculos conjuntos del flujo de gas no estacionario y del proceso que se desarrolla en el cilindro. Se realiza una comparación de los resultados obtenidos con los datos experimentales y se confirma la adecuación de la descripción matemática para el tipo de motores analizado.

De igual modo, en el artículo científico A numerical simulation method and analysis of a complete thermoacoustic-Stirling Engine [36] simulan numéricamente motores termo acústicos, utilizando un método de red de cuatro puertos para construir la ecuación trascendental de frecuencia compleja, como criterio para juzgar si la distribución de temperatura de todo el sistema termo acústico es correcta para el caso con una potencia de calefacción dada. Luego, realizan la simulación numérica de un motor térmico termo acústico-Stirling [36].

Adicionalmente, en ese artículo también demuestran que el código de simulación numérico puede funcionar de forma robusta, de tal manera que los resultados calculados son comparados con los experimentos del motor térmico termo acústico-Stirling (TASHE).

Por otro lado, el libro "Métodos numéricos para Ingenieros" es útil en el desarrollo de la presente investigación debido a que por medio de la aplicación de los métodos estudiados en este libro es posible generar las ecuaciones gobernantes que serán implementadas en Matlab®. [37].

Debido a que las ecuaciones gobernantes no tienen una solución matemática fácil de resolver, se programa cada una de estas ecuaciones en Matlab®[38] para que la herramienta computacional generada muestre de forma gráfica los parámetros del respuesta del funcionamiento del motor dentro de los que se encuentran:

- Desplazamientos angulares.
- Velocidades angulares.
- Aceleraciones angulares.
- Potencia.

Por lo anterior, se revisa la tesis "Desarrollo de un software para centrales térmicas de ciclo rankine con precalentadores abiertos, cerrados y recalentamiento", en la que se expone el desarrollo e implementación de una aplicación informática para la simulación de circuitos termodinámicos de ciclo Rankine en diferentes configuraciones y como resultado, demuestran la versatilidad de la aplicación diseñada [39] útil en esta investigación para lograr generar la herramienta computacional propuesta dentro de los objetivos específicos

Por otro lado, para los planos de los componentes de las piezas, ensambles y simulaciones de un prototipo del motor a diseñar, se usa el software SolidWorks® [40] siguiendo la Norma técnica Colombiana de Acotado de planos mecánicos [41]. Se tienen en cuenta las siguientes características técnicas:

- Materiales de los componentes del motor.
- Ajustes y tolerancias.
- Acabados superficiales.

- Rodamientos.
- Tornillos.

Así pues, se revisa detalladamente el Libro de Dibujo y Diseño Para Ingeniería [42] con el fin de asesorar correctamente al estudiante de tecnología de la Universidad ECCI, para elaborar los planos del prototipo a partir de los parámetros entregados por la herramienta computacional creada. Este libro es muy importante en el desarrollo de esta etapa debido a que allí se menciona como se representa simbólica y esquemáticamente cualquier elemento mecánico que sea necesario dibujar en un plano.

Así mismo, el libro Compendio de dibujo técnico emitido por el ICONTEC [43] también fue muy útil en esta fase porque en este documento se establece como elaborar esos planos de una forma estandarizada.

Además, en la tesis Desarrollo De Metodologías Enfocadas A Aplicaciones De Ingeniería Inversa Para Reproducir Objetos Mediante Escaneo 3D, Sistemas CAD/CAM Y Prototipado Rápido [44], muestra como los autores de esta investigación desarrollaron metodologías enfocadas a aplicaciones de ingeniería inversa, con la finalidad de reproducir objetos mediante escaneo 3D sistemas CAD/CAM y prototipado rápido teniendo en cuenta las principales aplicaciones que pueden existir en este campo con el fin de tener la información digital del objeto de referencia [44].

En particular, en la tesis de la “Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial de Barcelona” se realiza la optimización de geometría mediante estudio de diseño con SolidWorks [45] creando los planos y realizando una simulación del elemento propuesto usando el software mencionado.

De la misma forma, la Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial de Barcelona presenta una tesis donde se realiza la Simulación y diseño del modelo de captación de energía en una planta termo solar con SolidWorks, construyendo así uno a uno los planos de los componentes y de ensamble de la planta, usando el mismo software que el usado en la presente investigación [46].

Entre tanto, en el artículo “Metodología para determinar la factibilidad de un proyecto”, se ve la posibilidad de analizar las fases de los proyectos que justifican la razón específica por la que se quieren desarrollar, logrando así un "estudio de factibilidad" que resulta del perfeccionamiento de las fases. Este último sería logrado

mediante un estudio detallado del mercado, la determinación de los recursos, el diseño preliminar del proyecto, la descripción de los procesos técnicos, la determinación de precios de los productos, estimados de costos de operación y evaluación económica de su operación [47].

Por lo anterior, se revisa la tesis de la universidad tecnológica de Pereira con el título de “Estudio de la factibilidad y viabilidad de la creación de una empresa dedicada a la fabricación de biocombustible y productos de aseo con base en aceites usados”, mostrando un análisis DOFA para determinar qué tan conveniente económicamente sería montar dicha empresa en el mercado [48]. Del mismo modo, en la Universidad Estatal Península de Santa Elena se determina también el estudio realizado para la “Creación de una microempresa de servicios de mantenimiento a motores fuera de borda en la comuna san pedro, provincia de Santa Elena, año 2018” [49], mostrando un plan de negocios conformado por estudios de mercado, técnico y económico-financiero. Por otro lado, en la tesis de la Universidad Nacional de Córdoba se aprovecha una oportunidad descubierta por las ineficiencias del transporte público de la ciudad de Córdoba, el continuo incremento del precio de los combustibles realizando un Análisis de viabilidad técnica, económica y financiera de proyecto de fabricación de bicicletas eléctricas [50].

Es decir que con la información recolecta con la ultimas fuentes se logra establecer que tan viable es o no fabricar el motor diseñado con las máquinas de la Universidad ECCI.

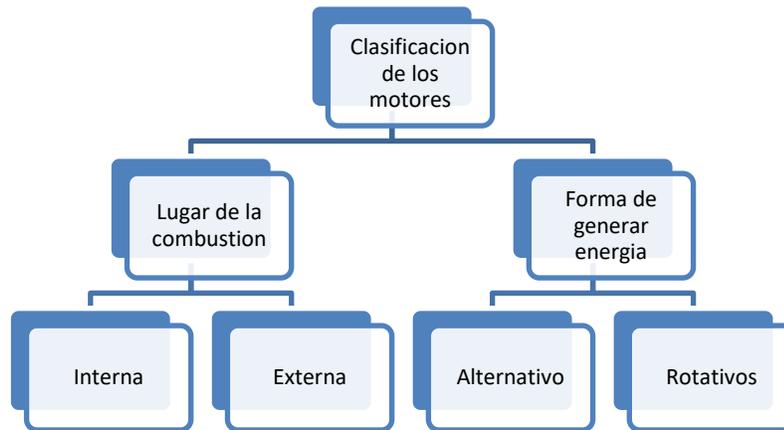
En definitiva, con esta revisión bibliográfica se logra determinar la originalidad de la presente investigación respecto de las previamente referenciadas en la literatura.

5.2 MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

5.2.1 Tipología de Motores

Un motor es un elemento mecánico que transforma algún tipo de energía (eléctrica, de combustibles fósiles, etc.), en energía mecánica capaz de realizar un trabajo. En los automóviles este efecto es una fuerza que produce el movimiento [51].

Figura 12. Clasificación de los motores.



Fuente: Elaboración propia.

Existen diversos tipos de motores tal como se muestra en la Figura 12, pero cabe aclarar que para el desarrollo de la presente investigación se evalúa la situación actual de los motores rotativos y las características específicas de algunas de sus tipologías [19] (principalmente aquellos que fácilmente pueden ser modificados para pasarlos de motores de combustión interna a motores de expansión volumétrica donde se suprime la combustión) con el fin de evaluar ventajas y desventajas del proceso de diseño y fabricación.

Dentro de los motores rotativos existentes y evaluados se incluyen:

- Motor Wankel
- Motor RadMax
- Motor Quasiturbina
- Motor Round Engine
- Motor Ripalda
- Motor Antonio Sánchez
- Motor Antonio Sánchez Híbrido

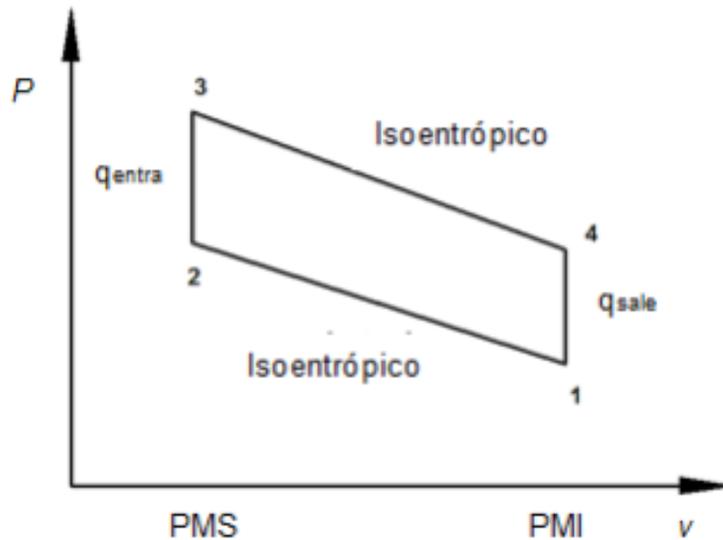
Así pues, mientras un motor de combustión interna alternativo efectúa sucesivamente procesos termodinámicos descritos en un diagrama de presión vs

volumen como se muestra en la Figura 13, los motores rotativos en general presentan una serie de ventajas respecto a los motores de combustión alternativos.

Las ventajas que presentan los motores rotativos respecto a los motores de combustión alternativos son:

- Facilidad de equilibrado
- Ausencia de valbulería y distribución
- Elevadas relaciones peso/potencia
- Altas relaciones potencia volumen
- Menos piezas
- Sencillez de diseño
- Mejor eficiencia

Figura 13. Ciclo Otto



Fuente: Handbook de la Ingeniería y la Tecnología del congreso Interdisciplinario Cuerpos Académicos. [52]

Adicionalmente, también presentan algunos inconvenientes a solucionar en el momento de modificar alguna tipología seleccionada, como el sellado de cada uno de

los componentes pero en general los motores rotativos juegan un papel importante funcionando con fuentes amigables con el medio ambiente y no por medio de combustibles fósiles. Es decir, como en el caso particular de este proyecto que el motor funcione con el vapor generado en la planta térmica

5.2.2 Matriz de Pugh

Luego de haber seleccionado dos tipologías susceptibles a ser modificadas se aplica la Matriz de Pugh[53], que es una herramienta cuantitativa que permite comparar valores entre varias alternativas, mediante un arreglo multidimensional (una matriz de decisiones) [54].

Esta matriz es aplicada habitualmente durante la fase de diseño de un producto, ya sea completamente nuevo o una actualización de uno existente [55]. Para el desarrollo de esta herramienta primero se identifican los criterios a ser evaluados que básicamente son las necesidades del cliente.

Estos criterios son ubicados generalmente como la primera fila de la matriz. Luego se deben especificar los posibles conceptos de diseño que apunten al cumplimiento de los criterios definidos; para el caso particular fueron las ventajas ofrecidas por las dos tipologías estudiadas (Motor Radmax y Motor Antonio Sánchez Híbrido) y esta información es ubicada en la primera columna de la matriz.

Después, se determina la influencia del criterio evaluado en el éxito del proyecto en porcentaje con el fin de determinar la prioridad o el orden en el que se deben controlar estos criterios para que el proyecto ejecutado sea culminado con éxito

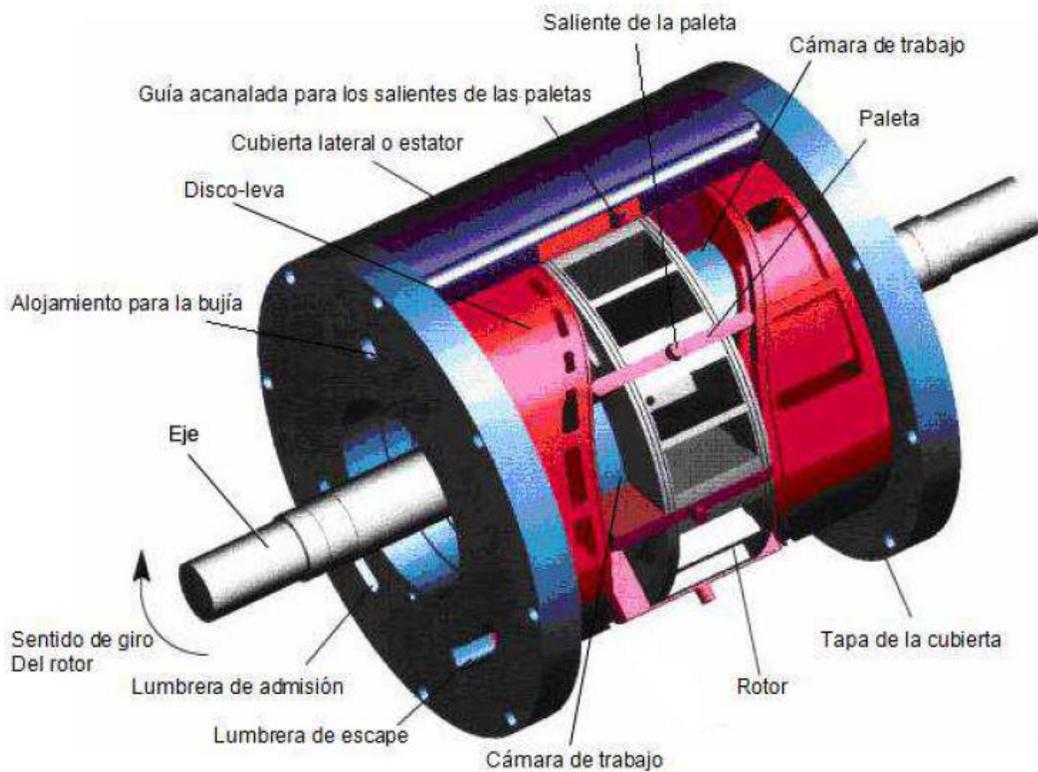
Posteriormente, mediante el uso de técnicas grupales se evalúa cada uno de los criterios para cada alternativa de diseño(concepto) comparándolo con el diseño de referencia, o la situación actual [56]; de tal manera que al concluir esta labor con ayuda de un diagrama de Pareto se logra definir la mejor alternativa.

5.2.3 Motor Radmax

Como en la mayoría de los casos, el motor RadMax al ser rotativo Ver Figura 14, consta de un eje que tiene acoplado un rotor que gira dentro del camino que forman dos discos-levas cuyas superficies son onduladas las cuales describen un perfil sinusoidal y estos discos se mantienen estáticos. Tanto el rotor como los discos-levas están envueltos lateralmente por medio de la cubierta lateral. El rotor alberga una

cantidad determinada de paletas y estas van montadas radialmente paralelas al eje y se deslizan hacia arriba y abajo debido a la ondulación de la superficie de los discos-levas.

Figura 14. Motor Radmax



Fuente: M. B. Farell, «MOTORES ROTATIVOS. Tipologías y combustibles alternativos.»[19]

El movimiento de las paletas se consigue gracias a que el camino por donde estas se mueven no es lineal sino ondulante. De esta manera estas piezas hacen que las paletas oscilen hacia arriba y hacia abajo como haría una leva en un motor alternativo. Es por esto que se llaman discos-leva a estas piezas del motor. Además cada una de las paletas dispone de un resalto que corre por dentro de una canal ubicada en la superficie interior de la cubierta lateral. Así, con la conjunción de estos dos sistemas se consigue el desplazamiento alternativo de las paletas.

Las cámaras de trabajo quedan delimitadas por el cuerpo del rotor, la superficie de los discos-levas, la cubierta lateral y las paletas. Así mismo, el volumen de estas cámaras de combustión varía (aumenta y disminuye alternativamente) con el movimiento de las paletas deslizantes durante la rotación. Aunque el diseño podría utilizar sólo dos paletas, la versión actual de este tipo de motor dispone de cierta cantidad de paletas las cuales generan el doble de cámaras de trabajo, con lo que se desarrollan a la vez esa misma cantidad de fases del proceso por cada rotación. Esto hace que el motor sea capaz de generar 3CV / 1kg aproximadamente, mientras que un motor de combustión interna alternativo ofrece una relación de 3CV / 8,84kg aproximadamente.

El motor Radmax tiene una relación de compresión de 20:1, que lo hace idóneo para quemar una gran cantidad de combustibles incluyendo el gasoil. Estos combustibles son: gasolina, etanol, gas natural, propano y gasoil. En comparación con el motor de combustión interna alternativo que suele tener unas 40 piezas móviles, el motor Radmax tiene menos partes móviles debido a que solo son el rotor y las 12 paletas.

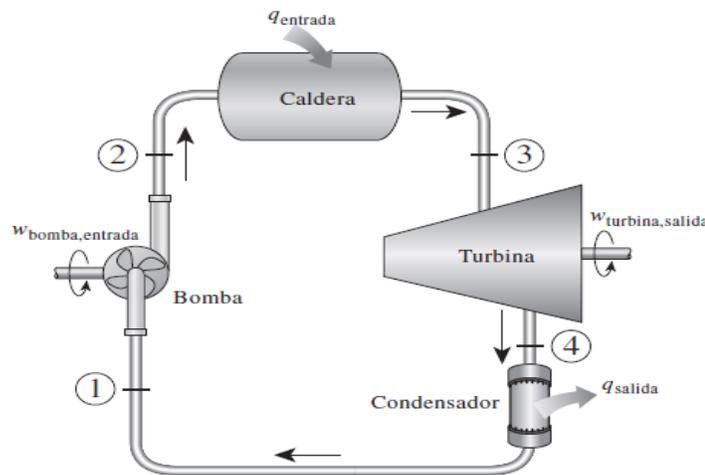
Esta tipología de motores fue creada y patentada por la firma canadiense Radmax Technologies aplicando dicha arquitectura en diferentes aplicaciones pero la información y modelos matemáticos de estos trabajos no son de fácil acceso.

Aunque para el desarrollo de la presente investigación fueron de gran importancia artículos científicos divulgados por esta compañía en el 2017 donde realizan una comparación entre válvulas de estrangulamiento versus expansores RadMax demostrando como esta tipología es capaz de transformar energía por medio de la expansión de un fluido en estado gaseoso.

5.2.4 Plantas térmicas

Una Planta Termoeléctrica, independientemente que sea de tipo industrial o a escala piloto como la que se encuentra ubicada en el laboratorio de máquinas térmicas de la Universidad ECCI debe contar como mínimo con los componentes como se muestra en la Figura 15.

Figura 15. Esquema Ciclo Rankine Ideal.



Fuente: Libro de Termodinámica de Cengel. [13]

Esto para una planta ideal, porque de acuerdo con la revisión bibliográfica realizada se puede determinar, que en la mayoría de las plantas que funcionan con este ciclo, la eficiencia es aproximadamente de 30%, la cual es baja para este tipo de máquinas térmicas. Razón por la cual existen procesos adicionales que mejoran la eficiencia de este tipo de plantas.

Para el caso particular de la presente investigación la planta que está instalada en la Universidad ECCI, tiene una configuración que permite incrementar la eficiencia de la planta, pero luego de realizar las prácticas en ella se encontró que el sobrecalentador no realiza la función para la que está fabricado; que existe instrumentación análoga y digital que no está contemplada dentro de la ficha técnica de la máquina, y que algunos puntos de control no existen o están en malas condiciones.

Razón por la cual, se evidencia que es necesario un mantenimiento urgente por parte del fabricante para que la eficiencia real presentada en este equipo se acerque a la eficiencia teórica en máquinas con una configuración similar a la planta termica ECCI-1

Pero, cabe resaltar que la planta instalada en la Universidad ECCI genera como máximo. 2kW de potencia, la cual se manifiesta al poder encender 10 bombillos de 200 watts a 120V.[29] obteniendo una eficiencia del 3.68% la cual es un dato extremadamente bajo.

El esquema de Figura15, es solo la representación básica de toda una planta Termoeléctrica, ya que como se verá más adelante, cuenta con más equipamientos, los cuales brindan seguridad, presión, ciclo estable y organización.

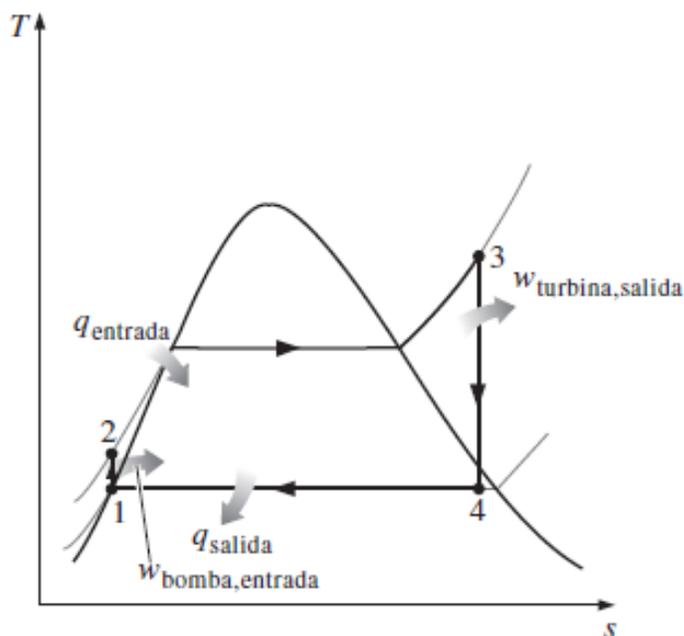
El material del que está hecho cada componente puede variar, ya que la finalidad de cada uno es diferente, independiente que juntos tengan la misma función, todas las especificaciones de la planta se encuentran en el manual de mantenimiento y operación de la planta [12], allí se encuentra la capacidad de almacenamiento, modelo, marca, presión de prueba, presión de diseño, presión de operación, peso y otras especificaciones como fichas técnicas.[57].

5.2.5 Ciclo Rankine

El ciclo Rankine es el ciclo que describe los procesos ocurridos durante la operación de la planta termoeléctrica, en la cual no existe ninguna irreversibilidad interna.

Dentro de las plantas térmicas ideales aparte de los componentes principales también es importante identificar los cuatro procesos termodinámicos ocurridos durante el ciclo mostrados en la Figura 16 a continuación:

Figura 16. Ciclo Rankine ideal.



Fuente: Libro de Termodinámica de Cengel. [13]

Esos cuatro procesos ocurridos son:

- De 1 a 2 una compresión Isoentrópica en la bomba.
- De 2 a 3 una adición de calor Isobárica en la caldera.
- De 3 a 4 una expansión Isoentrópica en la turbina.
- De 4 a 1 un rechazo de calor Isobárico en el condensador.

Luego de haber identificado cada uno de los procesos ocurridos a lo largo de toda la planta, es posible calcular el valor de las variables que describen el estado del vapor para establecer la eficiencia de la esta máquina térmica.

Para calcular la eficiencia se realiza un balance de energía involucrando todos los procesos enunciados anteriormente. Dicha eficiencia es calculada con la Ecuación.1.

$$\eta_{ter} = \frac{w_{neto}}{q_{entrada}} = 1 - \frac{q_{salida}}{q_{entrada}} \quad (1)$$

Donde:

$$w_{neto} = q_{entrada} - q_{salida} = w_{turbina,salida} - w_{bomba,entrada} \quad (2)$$

Y cada uno de estos términos se calcula con la diferencia de las entalpías en los puntos asociados al proceso analizado, aplicando las tablas termodinámicas, así:

$$w_{bomba,entrada} = v * (P_2 - P_1) \quad (3)$$

$$h_1 = h_{f a P_1} \quad Y \quad v \cong v_1 = v_{f a P_1} \quad (4)$$

Caldera (w=0)

$$q_{\text{entrada}} = (h_3 - h_2) \quad (5)$$

Turbina ($q=0$)

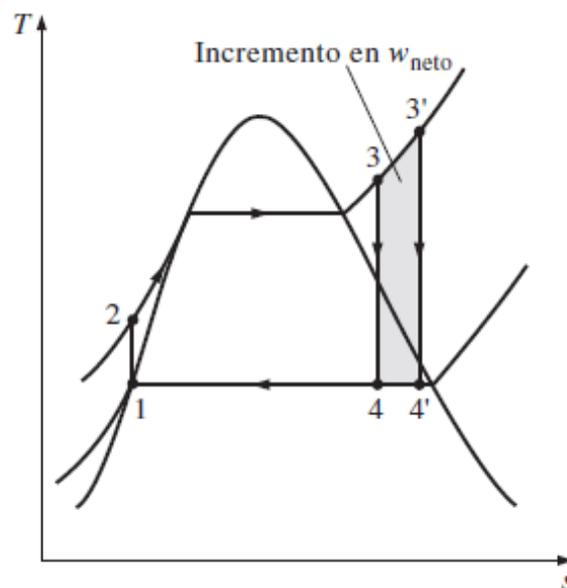
$$w_{\text{turbina-salida}} = (h_3 - h_4) \quad (6)$$

Condensador ($w=0$)

$$q_{\text{condensador,salida}} = (h_4 - h_1) \quad (7)$$

Por otro lado, como se mencionó anteriormente a ese ciclo ideal se le realizan una serie de modificaciones con el fin de mejorar la eficiencia de la planta dentro de esas modificaciones el único método que implementa la planta termica ECCI-1 se muestra en la Figura.17, la cual contempla un sobrecalentamiento del vapor que sale de la caldera antes de llegar a la turbina para incrementar la eficiencia termica de la planta.

Figura 17. Diagrama T-s Ciclo Rankine con sobrecalentamiento.



Fuente: Libro de Termodinámica de Cengel. [13]

5.2.6 Diseño de experimentos

El diseño estadístico de experimentos es la forma más eficaz de hacer pruebas y en determinar cuáles pruebas se deben realizar y de qué manera, para obtener datos que, al ser analizados estadísticamente, proporcionan evidencias objetivas que permiten responder las interrogantes planteadas, y de esa manera clarifica los aspectos inciertos de un proceso, resuelve un problema o logra mejoras.[58]

Es decir, que para la presente investigación esta herramienta estadística busca encontrar la mejor punta para ubicar el motor seleccionado de tal manera que la eficiencia en la planta térmica mejore sin realizar demasiadas modificaciones y que el motor también funcione eficientemente.

5.2.7 Estudio de viabilidad

Previo al comienzo de un proyecto, que conlleve un grado de incertidumbre alto, es planteable llevar a cabo un estudio o análisis de viabilidad. Ello sucede cuando es difícil fijar el alcance de un producto o servicio, y por lo tanto se nos hace muy complicado intentar establecer un Plan de trabajo con garantías de ser cumplido, en forma, tiempo y costos. Este proceso ayuda a ganar la confianza necesaria, al confirmar (o desmentir) que la iniciativa se puede implementar a tiempo y dentro del presupuesto, y es por eso que lo esencial es llevar a cabo el estudio de viabilidad tan temprano como sea posible.

Un proyecto viable [59] es un proyecto alcanzable, donde se tiene la capacidad de enfrentarse a las circunstancias concretas obteniendo los resultados esperados. No es un pronóstico, ni implica que el proyecto se vaya a entregar a tiempo, en las condiciones fijadas y dentro del presupuesto designado para ello; la incertidumbre no desaparece a pesar de una respuesta positiva del estudio de viabilidad.[60] Sin embargo, cuando se determina que la iniciativa es viable existe una mayor confianza en la entrega.

El estudio de viabilidad [61] está muy focalizado y debe ser siempre específico. Algunas de sus principales características son:

- Se trata de una herramienta de investigación que informa sobre la capacidad de hacer realidad una idea.
- No es lo mismo que un plan de negocios. Es posible utilizar un estudio de viabilidad como un predecesor a la creación de un plan de negocios.
- Parte de lo general para avanzar hacia los detalles más concretos.
- Obliga a considerar la necesidad del cliente y la posible competencia.
- Ayuda a identificar los riesgos a los que es probable tener que enfrentarse en el desarrollo.
- Describe las acciones a emprender, sus beneficios y el coste que implican.
- Permite predecir el beneficio que se obtendrá.

6 MARCO METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN

6.1 METODOLOGIA

6.1.1 Paradigma

Encontrar una tipología de motor que sea rotativo y que funcione por expansión volumétrica con las condiciones del vapor entregado por la planta térmica de la Universidad, para generar unas ecuaciones gobernantes que permitan programar una herramienta computacional en Matlab® que entregue de forma gráfica y numérica los parámetros de respuesta del motor. De acuerdo con lo anterior, poder modelar cada uno de los componentes, ensambles y subensamble del motor para determinar si es viable o no la fabricación de este elemento diseñado, con las máquinas instaladas actualmente en la Universidad.

6.1.2 Método

Para el desarrollo del presente proyecto se determina seguir el proceso mostrado en la Figura 18 la cual contempla dicho desarrollo en diferentes fases.

En primera instancia se realiza una revisión detallada de las leyes físicas que describen el funcionamiento y características de cada uno de los componentes del motor para generar las ecuaciones que gobiernen el motor seleccionado para que funcione con los parámetros de operación de la planta térmica ECCI 1 establecidos.

Por otro lado, como dichas ecuaciones no tienen una solución matemática se hace necesario la aplicación de un modelo matemático, por medio de una herramienta computacional en Matlab a través de diferentes iteraciones para que dicha herramienta entregue de forma gráfica el comportamiento de las variables de velocidad angular, aceleración angular, torque y potencia del motor en funcionamiento.

Todo esto con el fin de modelar en CAD un prototipo y evaluar la viabilidad de ser fabricado dentro de la misma Universidad.

Figura 18. Método usado.



Fuente: Elaboración propia.

6.1.3 Tipo de investigación

De acuerdo a la descripción del problema del numeral 2 y a la metodología empleada descrita en la sección anterior se determina que la investigación realizada en este proyecto puede estar definida así:

- Según el nivel de profundización en el objeto de estudio es **EXPLORATORIA** debido a que se centra en analizar e investigar aspectos concretos de la realidad que aún no han sido analizados en profundidad. Básicamente se trata de una exploración o primer acercamiento que permite que investigaciones posteriores puedan dirigirse a un análisis de la temática tratada. Por sus características no parte de teorías muy detalladas, sino que trata de encontrar patrones significativos en los datos que deben ser analizados para que a partir de estos resultados, se creen las primeras explicaciones completas sobre lo que ocurre.[62].
- Según el tipo de datos empleados es de tipo **CUANTITATIVA** porque se basa en el estudio y análisis de la realidad a través de diferentes procedimientos basados en la medición. Permite un mayor nivel de control e inferencia que otros tipos de investigación, siendo posible realizar experimentos y obtener explicaciones contrastadas a partir de hipótesis. Los resultados de estas investigaciones se basan en la estadística y son generalizables.

- Según el grado de manipulación de las variables, es **EXPERIMENTAL** ya que se basa en la manipulación de variables en condiciones altamente controladas, replicando un fenómeno concreto y observando el grado en que la o las variables implicadas y manipuladas producen un efecto determinado. Los datos se obtienen de muestras aleatorizadas, de manera que se presupone que la muestra de la cual se obtienen es representativa de la realidad.[62].
- Según el tipo de inferencia es **HIPOTÉTICA-DEDUCTIVA** debido a se basa en la generación de hipótesis a partir de hechos observados mediante la inducción, unas hipótesis que generan teorías que a su vez son comprobadas y falseadas mediante la experimentación. [62].
- Según el periodo temporal en el que se realiza es de tipo **TRANSVERSAL** porque se centra en la comparación de determinadas características o situaciones en diferentes sujetos en un momento concreto, compartiendo todos los sujetos la misma temporalidad [62].

6.1.4 Fases de la investigación

Cada una de las fases del proyecto aplica las etapas del método del numeral 6.1.2. Para lo cual se realiza la Tabla 2 que evidencia las tareas hechas en cada una de las fases del proyecto dentro de las etapas del método científico así:

Tabla 2. Fases Vs Etapas del método científico.

FASE	OBSERVACIÓN	SUPUESTOS CONTRASTABLES	EXPERIMENTACIÓN	CONCLUSIONES
1	Conceptualización sobre tipologías de motores existentes en el mercado	Seleccionar una tipología de motor rotativo fabricado que funcione por expansión volumétrica	Diseñar y aplicar una Matriz de Pugh que determine la tipología de motor a diseñar	Profundizar sobre la tipología de motor a diseñar
	Contextualización sobre funcionamiento y partes de una planta térmica didáctica específicamente de la planta térmica de la ECCI	Revisión practicas anteriores	Generar protocolo de prácticas en la planta	Recolectar información de presión en cada uno de los puntos de la planta
	Plantear hipótesis inicial sobre el mejor punto de ubicación del motor diseñado	Determinación de los factores y niveles del diseño	Aplicación del Minitab® para confirmar o rechazar la hipótesis inicial	Determinar el mejor punto de ubicación del motor diseñado

	de acuerdo a la experiencia del equipo investigador	de experimentos aplicado		
2	Conceptualización de diferentes teorías que describen las dimensiones y comportamiento del motor en funcionamiento	Relacionar las teorías con la información recolectada y el modelo a construir	Generar las ecuaciones gobernantes que describen las dimensiones y comportamiento del motor en funcionamiento	Modelado matemático
	Revisión sobre comandos de programación en Matlab	Programación en Matlab	Generar herramienta computacional y aplicarla en el primer prototipo	Graficas de respuesta
3	Revisión sobre características técnicas de los componentes y materiales a utilizar en el modelado CAD	Suministrar información a tener en cuenta en el modelado CAD	Revisión y acompañamiento de tesis de tecnología	Planos del primer prototipo del motor diseñado
4	Establecer qué tipo de máquinas se requieren la fabricar el modelo diseñado	Evaluar las maquinas existentes en la universidad	Realizar estudio técnico-económico de viabilidad para la fabricación	Determinar si es viable fabricar o no el motor diseñado

Fuente: Elaboración propia.

Por lo anterior las fases de este proyecto son

6.1.4.1 Fase1

Selección de una tipología de motor que sea rotativo, que funcione por expansión volumétrica con el vapor producido en la planta y determinar la mejor ubicación de este.

6.1.4.2 Fase2

Establecer las ecuaciones gobernantes que describan el estado del vapor durante el funcionamiento del motor con el fin de programarlas en Matlab® y generar una herramienta computacional que determine velocidad angular, aceleración angular, torque y potencia entregada del motor diseñado, teniendo en cuenta las dimensiones de cada uno de los componentes del motor y el estado del vapor entregado por la planta térmica.

6.1.4.3 Fase3

Dirigir la tesis de tecnología del estudiante que genera los planos de cada uno de los componentes y los ensambles del prototipo inicial de la tipología seleccionada.

6.1.4.4 Fase4

Realizar un estudio para determinar si es viable para la Universidad, técnica y económicamente fabricar el motor diseñado con las máquinas del laboratorio de mecanizados de la sede P.

6.2 RECOLECCIÓN DE LA INFORMACIÓN

Las fuentes consultadas para el desarrollo de la presente investigación son:

6.2.1 Fuentes primarias:

- Datos en prácticas hechas en las plantas térmicas.

6.2.2 Fuentes secundarias

- Artículos, revistas, publicaciones y tesis sobre:
 - Tipologías de motores construidas.
 - Motores rotativos.
 - Planta térmica de la Universidad.
 - Diseño de experimentos.
 - Aplicación de la matriz de Pugh.
 - Termodinámica.
 - Maquinas térmicas.
 - Estudios de viabilidad.
 - Dibujo asistido por computador.
 - Diseños realizados en SolidWorks.
 - Programación de máquinas térmicas en Matlab.
 - Modelos matemáticos.
- Patentes de motores rotativos diseñados.
- Reportes de indicadores económicos en la bolsa.

6.2.3 Fuentes terciarias

- Libros de:
 - Termodinámica.
 - Máquinas térmicas.
 - Estadística.
 - Diseño de experimentos
 - Cálculo integral
 - Diseño mecánico
 - Costos y presupuestos
 - Matlab
 - Minitab
 - SolidWorks
- Tutoriales de:
 - Matlab
 - Minitab
 - SolidWorks

Adicionalmente, para cumplir a cabalidad cada uno de los objetivos en esta una investigación, los pasos a seguir del presente proyecto son:

- Población: Para el desarrollo de esta investigación en primera instancia se contempla el estudio detallado de las tipologías existentes de motores rotativos las cuales se desean modificar con el propósito de convertirlos de motores de combustión a motores que funcionen por expansión volumétrica. Por otro lado, también se verifica una práctica en la planta térmica de la Universidad con el objetivo de poder determinar el valor que describe el estado del vapor en cada uno de los puntos dentro de esta.
- Materiales: Con el propósito de cumplir a cabalidad con cada uno de los objetivos se debe contar con la disponibilidad de los diferentes softwares licenciados:
 - Microsoft Office (Generación de documentos)
 - Minitab® (Diseño de experimentos)
 - Matlab R2020a®. (Generación de la herramienta computacional)

- SolidWorks 2019®. (Generación de modelos, documentos y simulaciones CAD)
- Técnicas: Para poder analizar la información recolectada en cada una de las fases se aplican técnicas gerenciales de toma de decisiones como
 - Matriz de Pugh
 - Diseño de experimentos

6.3 ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

La información obtenida para evidenciar los resultados de la investigación se agrupa en intervalos, construyéndose cuadros y cuando sea necesario, se establecen las medidas de tendencia central por medio de metodologías de decisión como la matriz de Pugh.

Adicionalmente se aplican softwares de tipo estadístico para llevar a cabo la medición cuantitativa como Minitab® con el fin de determinar por diseño de experimentos el mejor punto de ubicación para el motor.

Así mismo, en las ecuaciones gobernantes del motor se presentan de forma analítica todas las variables involucradas en el funcionamiento del mismo. Estas variables se encuentran descritas junto con sus unidades en el listado de símbolos y abreviaturas del presente documento.

Posteriormente se hace la programación en Matlab® con el fin de generar una herramienta computacional que represente gráficamente el comportamiento de algunas variables dentro de las que se encuentran, velocidad angular, aceleración angular, potencia, presiones y volúmenes obtenidos en el motor durante su funcionamiento.

Por otro lado, se hace entrega de un conjunto de planos de cada uno de los componentes del motor y los ensambles, teniendo en cuenta información técnica como ajustes, tolerancias, acabados superficiales y materiales empleados en la fabricación de un primer prototipo.

Todo lo anterior se hace con el propósito de determinar la viabilidad de construcción del motor con las maquinas instaladas en los laboratorios de mecanizado de la universidad.

7 MÉTODOS

7.1 FASE 1: SELECCIÓN Y UBICACIÓN DE LA TIPOLOGÍA DEL MOTOR A DISEÑAR

En primera instancia en este capítulo se revisa detalladamente la ejecución de una práctica en la planta térmica [63], describiendo paso a paso un protocolo a seguir en estas prácticas para que la información recolectada sea lo más confiable posible.[11] De tal manera que se obtuvieron datos reales y confiables del estado del vapor en cada uno de los puntos , con el fin de aplicar un modelo de diseño de experimentos [31] que determina el mejor punto de ubicación del motor que se va a diseñar.

Adicionalmente a esto, para lograr determinar la tipología del motor, se realiza una evaluación detallada de las tipologías de motores existentes [65] que deben cumplir unas características específicas a tener en cuenta (principalmente aquellos que fácilmente pueden ser modificados para pasarlos de motores de combustión interna [66] a motores de expansión volumétrica [67] donde se suprime la combustión).

Por consiguiente, se realiza una selección de los motores tipo rotativos Radmax [68] y Antonio Sánchez Híbrido [69] con el fin de aplicar la matriz de Pugh [70] como herramienta fundamental en el momento de definir la mejor tipología de motor a diseñar.

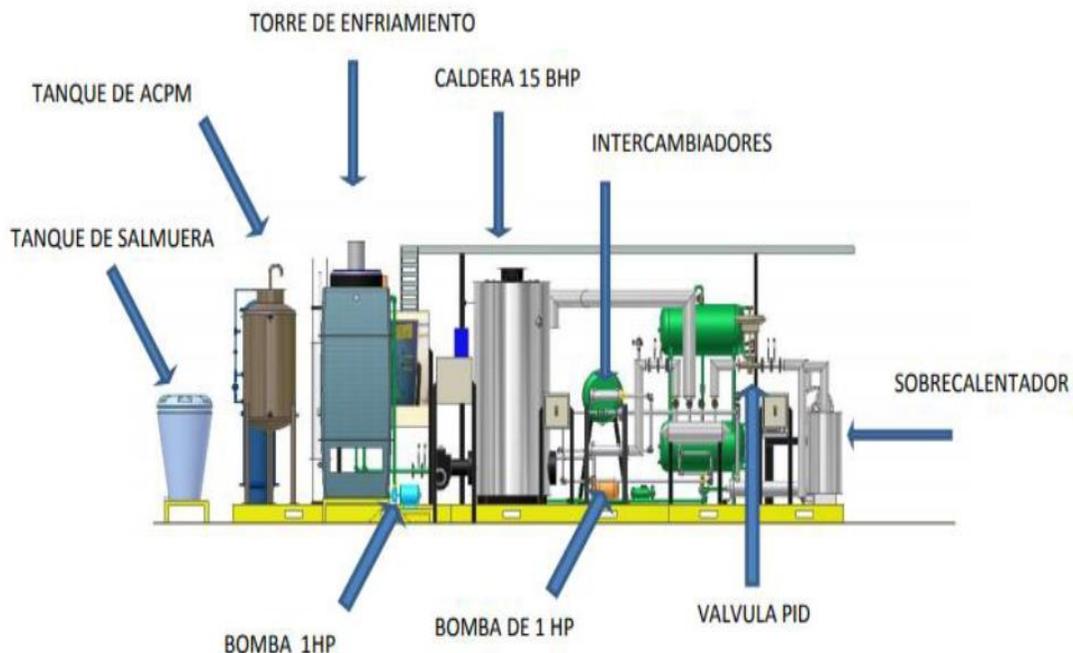
7.1.1 PRÁCTICA GUIADA CON PLANTA TÉRMICA ECCI

7.1.1.1 Descripción de la práctica en la planta térmica

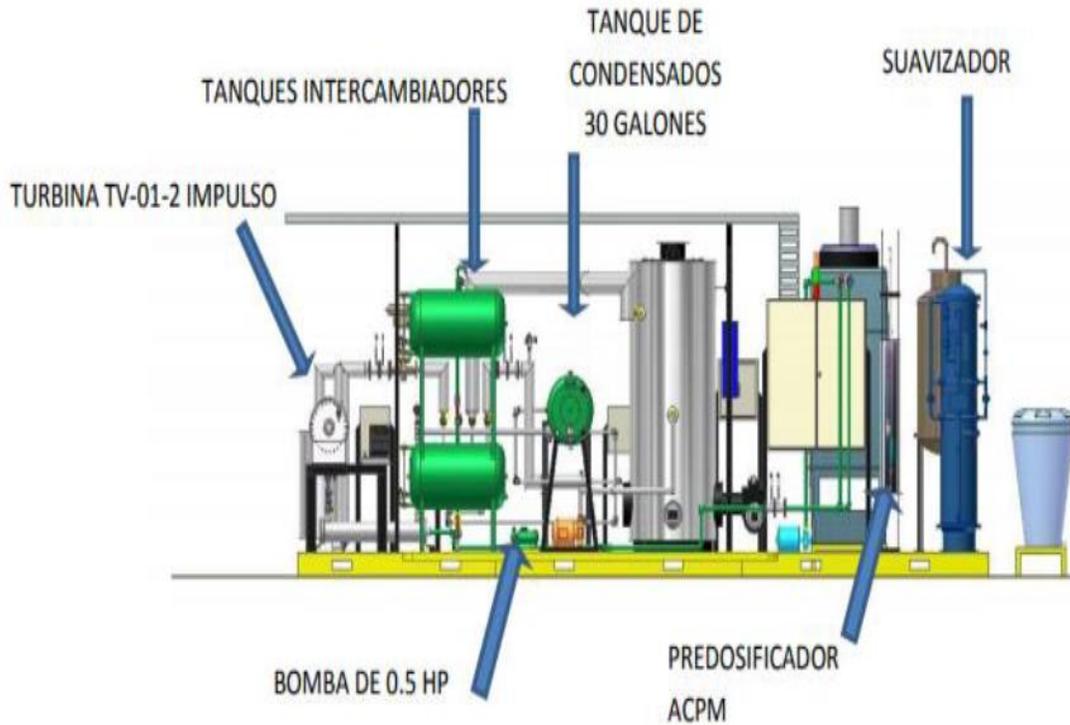
Para mejor entendimiento en la realización de las prácticas en la planta térmica de la Universidad se recomienda tener en cuenta el manual de operación y mantenimiento de la planta térmica suministrado por el fabricante de la planta INGENIUM S. A [12], donde se describe detalladamente el funcionamiento y las características técnicas de cada uno de los componentes de la planta térmica didáctica ubicada en el laboratorio de máquinas térmicas de la Universidad.

Posterior a esto, se realiza un protocolo a seguir (Ver Anexo A) [11], en el cual se estandarizan las prácticas en dicha planta, desarrollando así un orden lógico para recolectar la información que determine el estado y el comportamiento de las diferentes variables del vapor basados en las Figuras 19 y Figura 20. que representan las vistas laterales donde se muestra la ubicación de cada uno de los componentes que hacen parte de la planta termica instalada en la Universidad.

Figura 19. Vista lateral izquierda de los componentes de la planta térmica ECCI-1



Fuente: Manual de mantenimiento y operación, INGENIUM S.A.[12]

Figura 20. Vista lateral derecha de los componentes de la planta térmica ECCL-1

Fuente: Manual de mantenimiento y operación, INGENIUM S.A.[12]

Debido a que en la presente investigación se plantea únicamente el diseño del primer prototipo del motor rotativo de expansión volumétrica, se utilizaron los resultados de las prácticas realizadas en el año 2017 [71] ya que estas si cumplen con el protocolo establecido y que sirven como fuente información para la presente investigación [11].

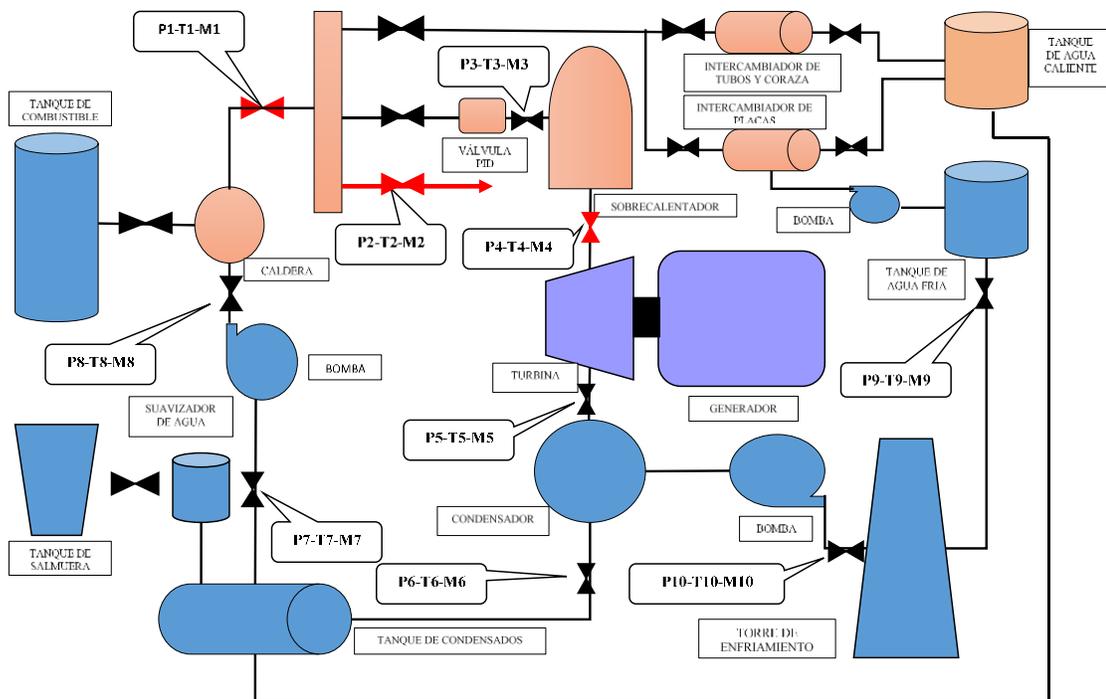
Cabe aclarar, que lo descrito en el párrafo anterior no significa que últimamente no se hayan realizado pruebas, sino que en las últimas pruebas realizadas en la planta (año 2019) no se cumplieron con los protocolos y por lo tanto los datos tomados no son confiables. Sin embargo, queda para una futura investigación realizar nuevas prácticas en donde se registre toda la información de acuerdo con los protocolos, de tal manera que dicha información sea actualizada y se pueda ingresar en el software desarrollado en esta investigación.

7.1.1.2 Datos obtenidos

Existen varios puntos para tener en cuenta que varían de acuerdo con la situación actual de la planta respecto a las condiciones en las que se encontraba esta planta en el 2017.

En primera instancia se determinan todos los parámetros a medir durante la operación de la planta térmica [72], las variables medidas por el PLC (Controlador lógico programable) [73] y las variables medidas por la instrumentación análoga [74] teniendo en cuenta la Figura 21 que representa esquemáticamente cada uno de los componentes y medidores instalados actualmente dentro de la planta térmica de la Universidad.

Figura 21. Diagrama general de instrumentación en la planta térmica.



Fuente: Elaboración propia.

De este modo, las variables medidas por el PLC son:

- *Ciclo de vapor (Ver numeral 5.2.5):*
 - ✓ Temperatura del vapor que sale de la caldera (T_1).
 - ✓ Presión antes y después de la placa orificio (P_3).
 - ✓ Flujo másico de vapor (m_v).
 - ✓ Temperatura del vapor antes de la turbina (T_4).
 - ✓ Presión del vapor que ingresa a la turbina (P_4).
 - ✓ Voltaje, corriente y frecuencia del generador (V , I , F_z).
 - ✓ Temperatura del vapor que sale de la turbina (T_5).
 - ✓ Presión del vapor que sale de la turbina (P_5).
 - ✓ Temperatura de los condensados (T_6).
 - ✓ Temperatura del agua que entra a la bomba (T_7).

- *Ciclo de enfriamiento:*
 - ✓ Presión del agua que sale de la torre de enfriamiento (P_9).
 - ✓ Temperatura del agua que sale de la torre de enfriamiento (T_9).
 - ✓ Presión del agua que entra a la torre de enfriamiento (P_{10}).
 - ✓ Temperatura del agua que entra a la torre de enfriamiento (T_{10}).
 - ✓ Caudal del agua que circula (Q_v).

Por otro lado, también se establecen los parámetros medidos por la instrumentación análoga:

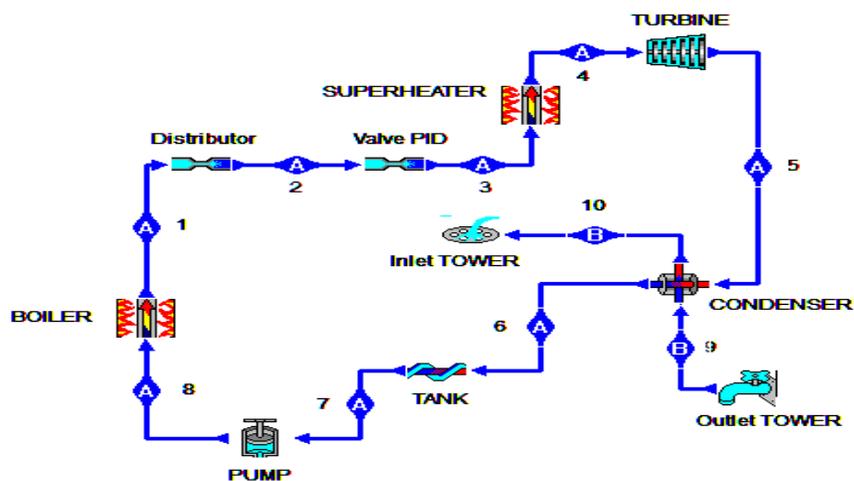
- *Ciclo de vapor:*
 - ✓ Presión manométrica en la caldera (P_1).
 - ✓ Consumo de combustible líquido.
 - ✓ Temperatura del vapor que llega al distribuidor (T_1).
 - ✓ Presión del vapor que llega al distribuidor (P_1).
 - ✓ Temperatura del vapor que sale del distribuidor (T_2).
 - ✓ Presión del vapor que sale del distribuidor (P_2).
 - ✓ Temperatura del vapor que entra al sobre calentador (T_3).
 - ✓ Presión del vapor que entra al sobre calentador (P_3).
 - ✓ Temperatura del vapor que entra a la turbina (T_4).
 - ✓ Presión del vapor que entra a la turbina (P_4).

- ✓ Presión del agua que sale de la bomba (P_8).
- *Ciclo de enfriamiento:*
 - ✓ Presión del agua que sale de la torre de enfriamiento (P_9).
 - ✓ Temperatura del agua que sale de la torre de enfriamiento (T_9).
 - ✓ Presión del agua que entra a la torre de enfriamiento (P_{10}).
 - ✓ Temperatura del agua que entra a la torre de enfriamiento (T_{10}).

En el momento en que se realiza la práctica y se recolecta la información para esta investigación, se evidencia la falta de algunos instrumentos análogos o dentro del PLC, que determinen el comportamiento de unas variables dentro de algunos puntos de la planta térmica[75]. Por ejemplo, después del distribuidor, se evidencia la falta de un termómetro y un manómetro que determina la temperatura y presión en dicho punto.

Por tal motivo, con el fin de no retrasar la investigación, por medio de los datos obtenidos y el uso de tablas termodinámicas [76] se procede a dejar diligenciado en su totalidad la versión del 2017 de los formatos estandarizados para tal fin. Cabe resaltar que estos formatos se han venido actualizando desde la fecha con el fin de realizar pruebas en la planta térmica con datos más cercanos a la realidad de tal manera que la información recolectada sea verídica y cumpla con los protocolos enunciados en el Anexo A.

Figura 22. Diagrama planta térmica.



Fuente: Tablero principal Planta [71]

Teniendo en cuenta el diagrama mostrado en la Figura 22, que corresponde al diagrama ubicado en el tablero principal de la planta, se inicia con la recolección de los datos de presión en cada uno de los puntos como se muestra en la Tabla 3

Tabla 3. Presiones en cada uno de los puntos de acuerdo a las cargas eléctricas en kPa, requeridas en la planta.

CONDICIÓN	CARGA 1	CARGA 2	CARGA 3	CARGA 4	CARGA 5	CARGA 6	CARGA 7	CARGA 8	CARGA 9	CARGA 10
Presión 2	314,66	384,66	454,66	524,66	594,66	664,66	704,66	734,66	684,66	744,66
Presión 3	284,66	344,66	404,66	474,66	534,66	604,66	634,66	664,66	614,66	664,66
Presión 4	260,66	316,66	375,66	439,66	493,66	557,66	589,66	617,66	575,66	621,66
Presión 5	75,76	74,96	77,86	81,76	82,56	86,26	92,76	86,76	88,86	87,56
Presión 7	74,66	74,66	74,66	74,66	74,66	74,66	74,66	74,66	74,66	74,66
Presión 8	1453,2	1453,2	1453,2	1453,2	1453,2	1453,2	1453,2	1453,2	1453,2	1453,2
Presión 9	204,56	202,46	201,46	202,26	201,16	199,56	200,96	201,96	201,16	200,96
Presión 10	153,86	154,36	154,06	154,36	153,56	154,86	153,26	154,86	155,46	153,26

Fuente: Elaboración propia.

Por último con la información recolectada se obtuvieron los datos que son la fuente de información para el DOE que establece el mejor punto de ubicación para el motor [77] a lo largo de toda la planta térmica.

Con lo anteriormente expuesto, se plantea una primer hipótesis para la ubicación del motor Radmax [23] a diseñar, que será confirmada o rechazada por medio del modelo estadístico de diseño de experimentos [78] (DOE por sus siglas en inglés). De este modo, para formular la hipótesis se realizó una revisión del manual de mantenimiento y operación de la planta [29] junto con una inspección in situ de la planta térmica, encontrando dos factores:

- Las variables termodinámicas que definen el estado del vapor (presión, temperatura y caudal) antes del sobrecalentador no son constantes porque están en función de la carga eléctrica de la planta.

- Las variables que definen el estado del vapor (presión, temperatura y caudal) en una de las salidas del distribuidor son constantes.

Así pues, la hipótesis planteada es: “El motor debe trabajar con vapor sobrecalentado, para evitar que ingrese al motor una mezcla de gas y líquido (en este caso vapor de agua y agua) la cual afectaría la integridad del motor. Por lo tanto, el mejor punto para ubicar el motor es después del sobrecalentador (Punto 4 Figura 16)”.

En consecuencia, se establece la necesidad de evaluar por medio del modelo DOE [79] la mejor alternativa para poder ubicar el motor. Dicha evaluación que será desarrollada más adelante en el presente documento.

7.1.2 TIPOLOGÍAS DE MOTORES

Posterior a la revisión bibliográfica expuesta dentro del marco teórico conceptual del presente documento y a una comparación de las tipologías de motores rotativos existentes realizada entre el autor del presente documento junto con los asesores de la presente investigación, se ha determinado evaluar a profundidad el motor Radmax [68] y el motor Antonio Sánchez Híbrido[69] debido a que estas tipologías presentan mayores ventajas frente a las demás tipologías.

En un motor RadMax las ventajas encontradas fueron:

- En comparación con el motor de combustión interna alternativo que suele tener unas 40 piezas móviles, el motor Radmax sólo tiene 13 partes móviles (el rotor y las 12 paletas). Esto hace que aumente la fiabilidad
- Motor totalmente rotativo. Las cámaras de combustión se reparten alrededor del rotor equilibrándolo y además el rotor actúa como un volante de inercia. Se reducen mucho las vibraciones en comparación con los motores alternativos debido a que todas las piezas que lo constituyen giran en el mismo sentido.
- Ausencia de válvulas de admisión y de escape. Como en el caso del motor Wankel esto conlleva evitar las complicadas distribuciones de los motores 4 tiempos.
- Trabajo motriz durante el 100% del ciclo. Como se ha indicado, se realizan 24 explosiones por rotación que garantizan un empuje casi lineal medido en el eje de salida.

- Capacidad de quemar varios combustibles.
- Alta eficiencia en la combustión.
- Amplia variedad de usos posibles, desde uso como condensador minúsculo a motor de jet comercial y/o militar. Otros de los usos que están en estudio son los referentes a la aplicación en compresores de aire acondicionado, automóviles híbridos y la generación de energía en plantas generadoras.

Y en el Antonio Sanchez híbrido:

- Facilidad de sellado. Este se realiza de la misma manera que en los motores de combustión interna alternativos, es decir mediante aros o segmentos.
- Alta relación de compresión. Como es conocido, en un motor de combustión interna, la máxima eficiencia se obtiene realizando la ignición del combustible a alta compresión. La mayoría de los motores rotativos conocidos hasta el momento presentan el inconveniente de no poder trabajar a elevadas relaciones de compresión. La incorporación de un sistema de sellado convencional en los pistones, y la ausencia de válvulas en la culata permiten a este motor trabajar a altas relaciones de compresión.
- Eficiencia termodinámica. Mientras que en algunos motores rotativos la relación superficie/volumen en la cámara de combustión produce bajo rendimiento termodinámico, debido a que esta cámara es larga y estrecha, en el motor Híbrido A.S. esta relación es parecida a la del motor alternativo convencional.
- Debido a que la mezcla admitida adquiere en su conducción hasta el interior de los cilindros dos componentes de velocidad (uno axial provocado por el vacío en el interior del cilindro, y un segundo producido por la velocidad angular relativa que provoca el movimiento del rotor), la carga se produce con un movimiento de torbellino que aumenta la efectividad de la combustión.
- El número total de piezas es alrededor de un 30% inferior al de un motor convencional equivalente, reduciéndose el número de piezas móviles en un 70%.
- La ausencia de válvulas para la admisión y el escape aumenta la sencillez de funcionamiento y la fiabilidad del motor.
- Dispone de un sistema de lubricación que recupera el lubricante.

- Potencial multicomcombustible. Aparentemente, el motor Híbrido A.S. puede emplear diferentes combustibles (entre ellos algunos combustibles alternativos) con las consiguientes modificaciones.

Adicionalmente a esto, estas tipologías cumplen con la mayoría de las características del motor que se plantearon en los objetivos del presente documento, las cuales son:

- Ser un motor rotativo.
- Ser un motor que funcione con expansión volumétrica.
- Ser viable para la realización de una serie de modificaciones en la estructura del motor para convertirlo en un motor a presión sin combustión.
- Ser viable de ser fabricado.
- Tener menor cantidad de componentes.
- Tener estructura liviana

7.1.3 MATRIZ DE DECISIÓN

A la hora de tomar decisiones es fundamental dejar de lado la subjetividad. Existen numerosas técnicas para lograr objetividad en las decisiones [80], dentro de las que se encuentra la matriz de Pugh.

Para la ejecución de la matriz de Pugh se tienen en cuenta los criterios determinados en la Tabla 4 donde se evalúa criterio por criterio el motor Radmax y el Antonio Sánchez Híbrido (ASH) dándole un valor de 1 al criterio muy importante y -1 al menos importante.

De esta manera se tiene en la Tabla 3:

Tabla 4. Criterios de selección motor a diseñar.

CRITERIO	RADMAX	ASH	PONDERADO (% SOBRE EL ÉXITO DEL PROYECTO)
Simplicidad de la geometría	1	-1	70
Simplicidad de funcionamiento	1	-1	40
Número de piezas a diseñar en SolidWorks	1	-1	20
Viabilidad del confinamiento de fluido	-1	1	90
RPM máximas admisibles	1	-1	80
Facilidad de armado y ensamble en SolidWorks	1	-1	90
Facilidad de Escalamiento	1	-1	30
Cantidad de fluido que puede desplazarse	1	-1	60
Cantidad de piezas móviles	1	-1	10
Tamaño final	1	-1	10
Viabilidad de los materiales	1	-1	80
Presión y Temperatura máxima admisible	1	-1	70
Eficiencia térmica	1	-1	70
Eficiencia mecánica	1	-1	70
Entrega de Potencia	1	-1	60
Facilidad de mecanizado	1	-1	50
Viabilidad de mecanizado	1	-1	80
Relación peso-potencia	1	-1	65
Diseño individual de componentes en SolidWorks	0	0	80
Ruido o vibración por operación	1	-1	40

Simplicidad de cálculos para diseño y ajuste	1	-1	50
Sistema externo de refrigeración	-1	1	70
Complejidad del elemento compresor	0	0	85
Complejidad del ensamblaje y los ajustes	1	-1	45
Viabilidad de la lubricación	-1	1	80
Fiabilidad de la lubricación	-1	1	85
Facilidad de Compresión y fuerza disponible	-1	1	45
Perdidas de fluido por componentes	1	-1	65
Modularidad	1	-1	40
Estabilidad estructural	1	-1	40
Eficiencia termo mecánica Vs. Tamaño	1	-1	10
Diseño de elementos y/o sistemas auxiliares	1	-1	30
Costo de mecanizado por pieza	1	-1	50
Diseño de pruebas diagnosticas	0	0	60
Diseño de entradas y salidas	1	-1	35
Fiabilidad	1	-1	30
Seguridad	1	-1	70
Diseño de elementos de sellado y estanqueidad	0	0	90
TOTAL	29	5	

Fuente: Elaboración propia.

Posterior a esto, la información recolectada en la Tabla 4 es sintetizada en la Tabla 5, la cual determina que el motor RADMAX es el más viable para ser diseñado de acuerdo con los criterios establecidos en las tipologías seleccionadas. De tal manera que para poder evidenciar mejor el resultado de esta matriz se plantea un

diagrama (Ver Figura 23) donde se representa el resultado porcentual y al diagrama de torta que representa la decisión final (Ver Figura 24).

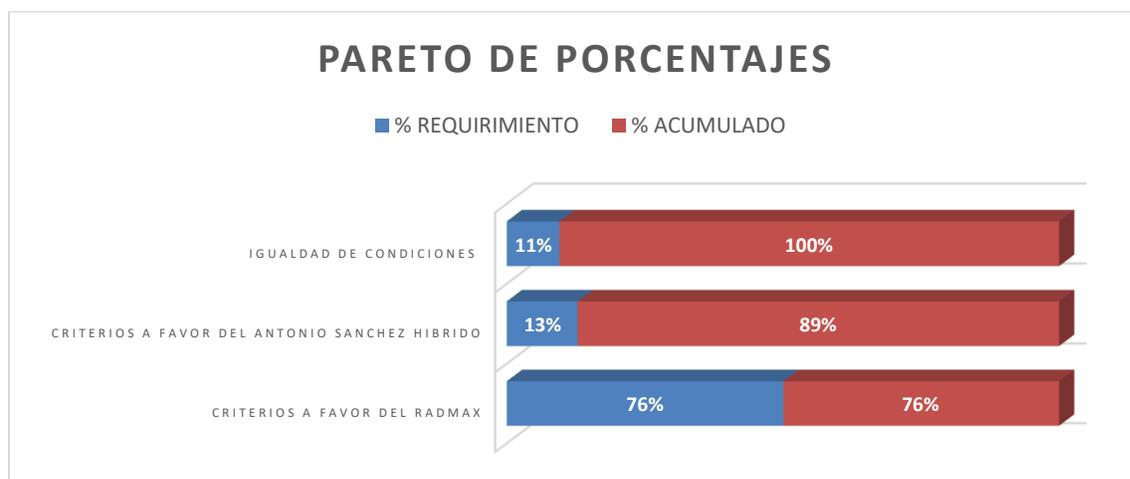
Tabla 5. Resultados Matriz de Pugh.

	TOTAL	% REQUERIMIENTO	% ACUMULADO
CRITERIOS A FAVOR DEL RADMAX	29	76%	76%
CRITERIOS A FAVOR DEL ANTONIO SÁNCHEZ HIBRIDO	5	13%	89%
IGUALDAD DE CONDICIONES	4	11%	100%
TOTAL	38		

Fuente: Elaboración propia.

Luego, con el fin de poder identificar los resultados obtenidos en la matriz de Pugh se realiza una gráfica de porcentajes de dichos resultados mostrada en la Figura 23 donde se compara el porcentaje obtenido en cada una de las tipologías respecto al total de criterios evaluados.

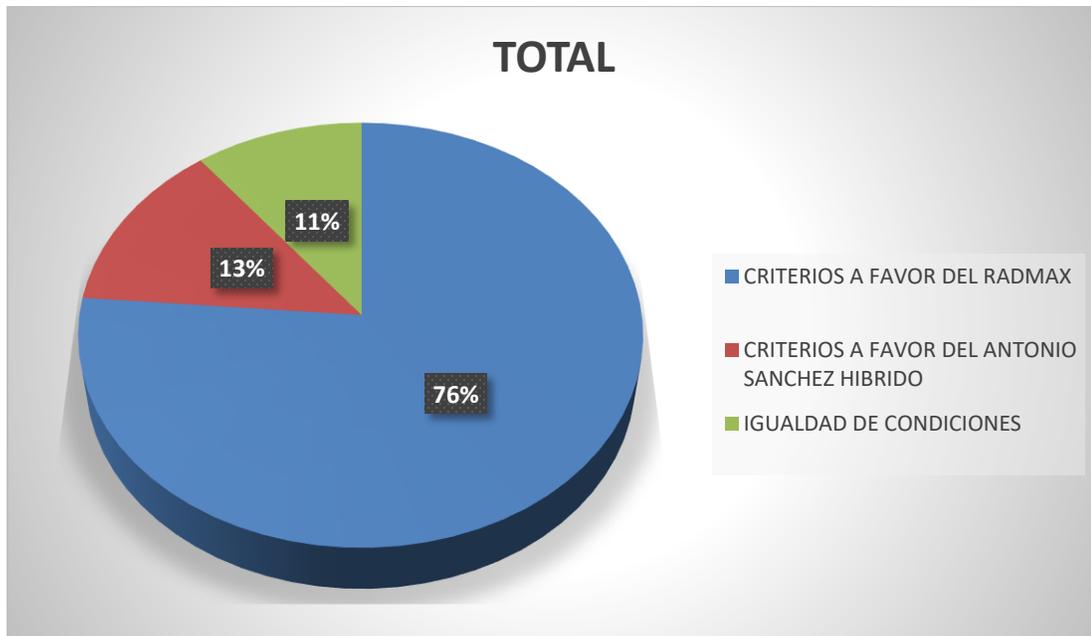
Figura 23. Porcentajes de la Matriz de Pugh.



Fuente: Elaboración propia.

De tal manera, que por medio de una gráfica de torta como se evidencia en la Figura 24 se puede identificar cual es la tipología que presenta un mayor porcentaje para ser modificado y que funcione eficientemente con el vapor generado en la planta termica.

Figura 24. Decisión Final.



Fuente: Elaboración propia.

Adicionalmente, la matriz de Pugh [53] fue útil para poder asignar una serie de prioridades en el momento de diseñar el motor, determinando la relevancia de los criterios, es decir, en los que se debe trabajar más para que el motor diseñado sea eficiente. Los criterios para tener en cuenta son:

- Condición hermética.
- Diseño de elementos de sellado y estanqueidad.
- Complejidad del elemento compresor.
- Fiabilidad de la lubricación.
- RPM máximas admisibles.
- Viabilidad en la selección de los materiales.
- Viabilidad en la selección del proceso de mecanizado.

7.1.4 APLICACIÓN DE DISEÑO DE EXPERIMENTOS DOS FACTORES CON DOS NIVELES 3

De acuerdo con las conclusiones de los numerales 7.1.1, 7.1.2 y 7.1.3, se establece la necesidad de aplicar un diseño de experimentos que determine la mejor ubicación para el motor de vapor a diseñar. Para este diseño de experimentos se usa el software libre MINITAB® [81].

Inicialmente, se descartó ubicar el motor después de la caldera debido a que se requieren demasiadas adecuaciones en la infraestructura de la planta térmica.

Por otro lado, es importante definir que los factores para este diseño de experimentos corresponden a los puntos donde se ubicaría el motor teniendo en cuenta la Figura 22 que representa esquemáticamente la planta térmica en el tablero principal de la planta. Los factores y niveles para este DOE son:

- **PRIMER FACTOR:** Punto 2 ubicación en una de las salidas del distribuidor.
- **SEGUNDO FACTOR:** Punto 4 ubicación después del sobrecalentador.

Y los niveles a trabajar en el diseño de experimentos corresponden a dos cargas eléctricas requeridas en la planta:

- **PRIMER NIVEL:** Carga al 50%.
- **SEGUNDO NIVEL:** Carga al 100%.

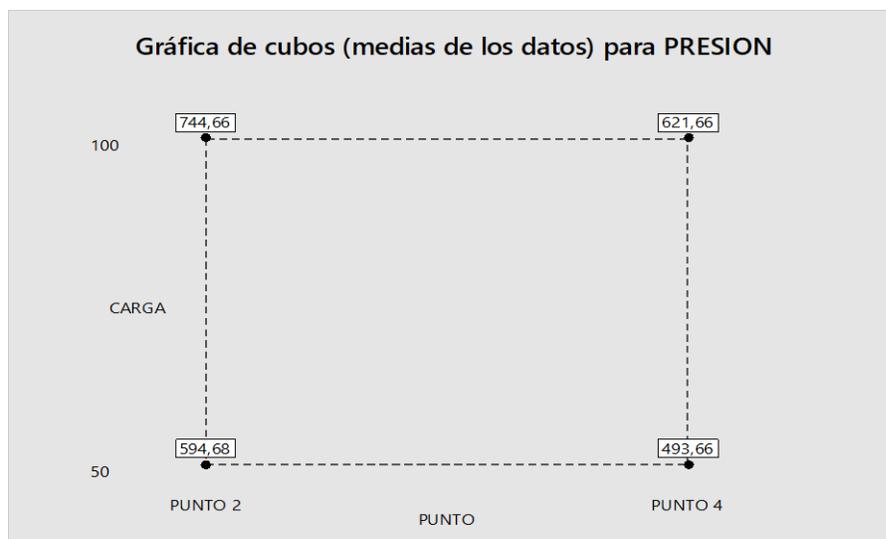
Es decir, la variable seleccionada que define calidad del vapor en cada uno de los puntos de la caldera es la presión, dato indispensable para determinar el mejor punto para ubicar el motor dentro de la planta, teniendo en cuenta los datos presentados en la Tabla 6, que determinan el valor exacto de la presión del vapor en cada uno de los factores evaluados a una carga eléctrica o niveles estudiados dentro de la planta termica de la Universidad:

Tabla 6. DOE para la ubicación de un motor rotativo de expansión volumétrica.

PRESIÓN (kPa)		NIVELES	
		CARGA AL 50%	CARGA AL 100%
FACTORES	PUNTO 2	594,68	744,66
	PUNTO 4	493,66	621,66

Fuente: Elaboración propia.

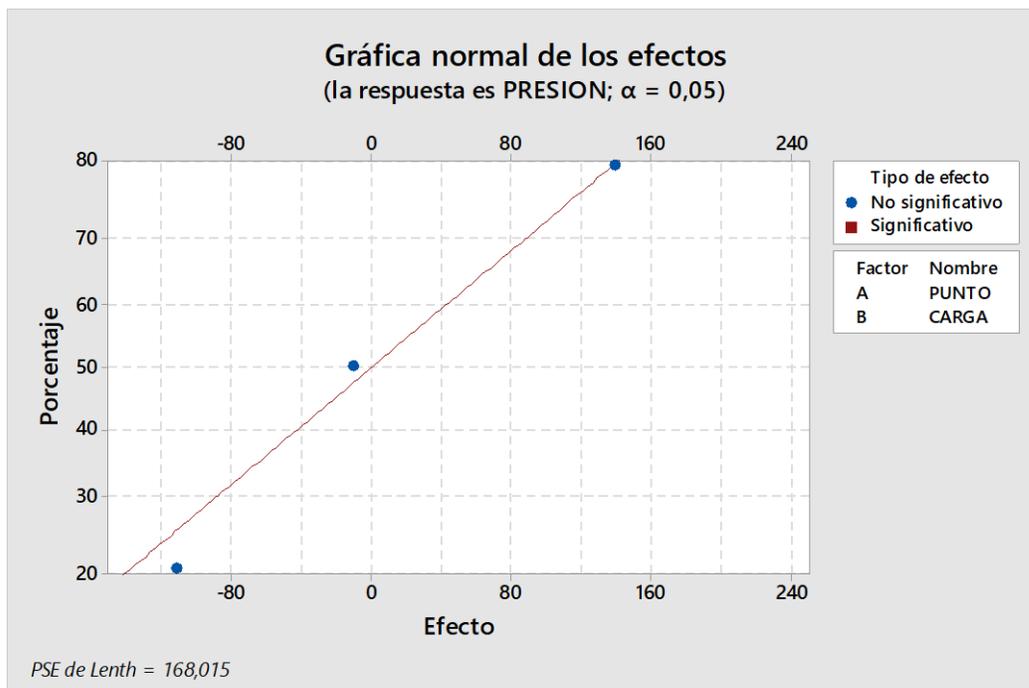
Posterior a tabular la información en el software, se genera un primer gráfico de cubos (Figura 25) la cual afirma que el mejor punto de ubicación del motor a diseñar es después del distribuidor a una carga del 100% de la planta esto debido a que en este punto la presión es mayor. Es decir que confirma la hipótesis que se planteada inicialmente

Figura 25. Gráfica de cubos (medias de los datos) para presión.

Fuente: Minitab® con datos propios.

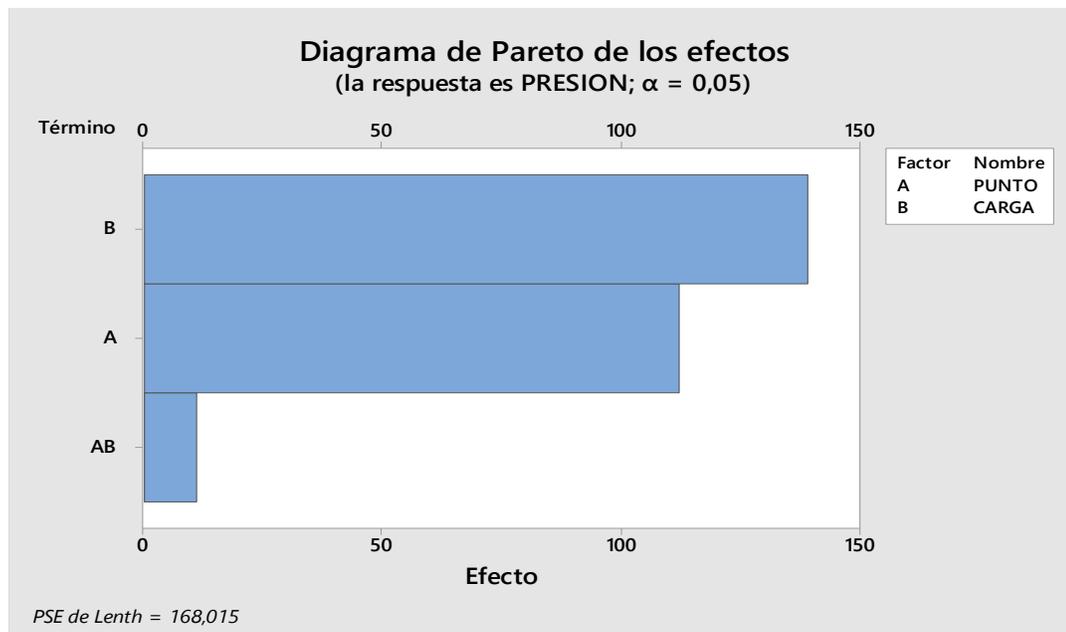
Adicionalmente en la Figura 26 se evalúa el desfase que existe en el valor de presión en cada uno de los puntos comparado con un valor estándar calculado de tal manera que por medio de este grafico que demuestra que el efecto de cambiar la carga o el punto a ubicar el motor no es significativo en el desarrollo de este experimento.

Figura 26. Grafica normal de los efectos.



Fuente: Minitab® con datos propios.

Por otro lado, en este software se logra realizar otro diagrama mostrado en la Figura 27 donde se evidencia el valor en porcentaje de efecto calculado en la figura anterior.

Figura 27. Diagrama de Pareto de los Efectos.

Fuente: Minitab® con datos propios.

En conclusión, para esta fase:

- Después de la realización de una práctica completa en la planta termica se plantea una primer hipótesis a evaluar estadísticamente la cual determina que la ubicación de ese motor es en una de las salidas libres del distribuidor ya que en ese punto la planta no requiere mayores modificaciones, ubicarlo después de la caldera requeriría muchas adecuaciones físicas y después del sobrecalentador tampoco es viable ubicarlo, primero porque el sobrecalentador en el momento de la práctica evidencio fallas y segundo porque la presión desde la válvula PID en adelante varía respecto a la carga requerida de la planta térmica.
- El mejor punto de ubicación es posterior al distribuidor en una de las salidas libres, debido a que en este punto es donde se logra garantizar una presión constante del vapor de agua, sin importar los ciclos de la caldera.
- El motor RADMAX es el motor que tiene más viabilidad para ser diseñado gracias a los resultados obtenidos con la matriz de Pugh.

- La mejor ubicación del motor es luego del distribuidor a una carga eléctrica de la planta al 100% de acuerdo con los resultados obtenidos en el DOE
- Si la planta estuviera funcionando en óptimas condiciones cambiar el punto de ubicación o la carga de la planta teniendo en cuenta la presión de vapor en ese punto no representaría un efecto significativo en el motor.

7.2 FASE 2: MODELAMIENTO MATEMÁTICO

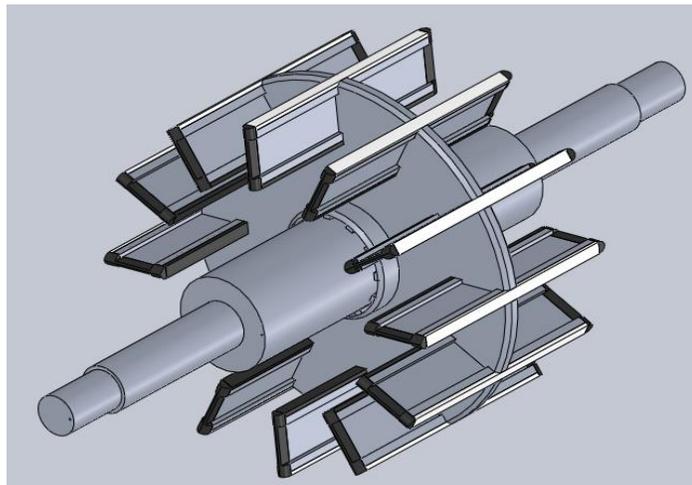
Por medio de este modelamiento matemático se busca la descripción del funcionamiento del motor con las condiciones de entrada del vapor previamente descritas en la FASE 1.

Para ello, se debe aplicar las ecuaciones de balance de fuerza y torque usando los sistemas coordenados adecuados tales como las coordenadas polares y el manejo de un lenguaje de programación en un software específico que para este caso es MATLAB® y EXCEL con el fin de determinar características fundamentales del motor Radmax a diseñar.

7.2.1 ECUACIONES GOBERNANTES

Para iniciar con la descripción del modelamiento matemático en la Figura 28, se identifica un prototipo modelado en SolidWorks®.

Figura 28. Subensamble del motor.



Fuente: Tesis de Tecnología de Cesar Caicedo- Universidad ECCI

Por lo tanto, de acuerdo a la Figura 28 es necesario que el usuario del modelo matemático suministre o defina parámetros dimensionales del motor tales como:

- Altura promedio de la cámara
- Amplitud de la forma sinusoidal de la leva
- Frecuencia del perfil sinusoidal
- Giro en radianes del motor que se va a analizar
- Cantidad de paletas que tiene el motor (debe ser entero).
- Radio externo del rotor en metros
- Radio interno del rotor en metros
- Distancia entre el eje del rotor y el eje del perfil sinusoidal
- Espesor medio del rotor
- Presión de entrada planta térmica en kilo pascales
- Momento de inercia del motor
- Torque de carga

Adicionalmente, por medio de la herramienta computacional deben poderse calcular diferentes parámetros de funcionamiento del motor dentro de los que se encuentran:

- Volúmenes máximos y mínimos al interior a lo largo de todo el giro del motor.
- Diferencias de presiones a medida que el motor presenta un desplazamiento angular a lo largo de todo el giro del motor.
- Fuerzas aplicadas en cada una de las paletas que conforman este subensamble a lo largo de todo el giro del motor.
- Torque aportado por cada una de las cámaras a lo largo de todo el giro del motor.

Dichos parámetros se calculan por medio de la aplicación de las leyes físicas y termodinámicas que describen el comportamiento del vapor al interior del motor y las

ecuaciones gobernantes que son solucionadas más adelante a través de una herramienta computacional en Matlab®.

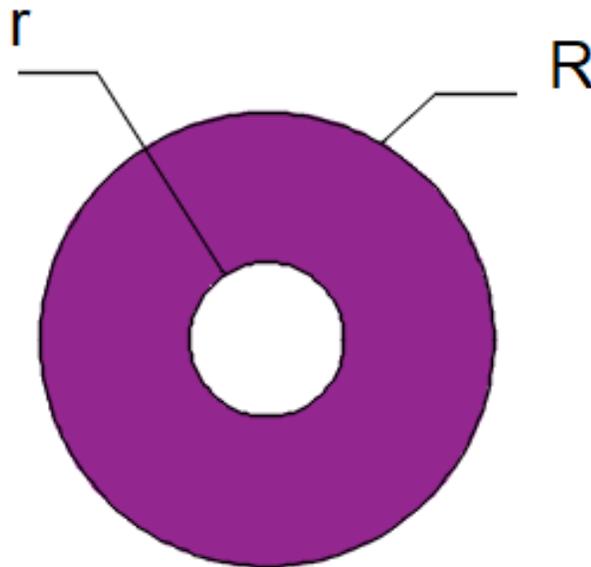
Es importante aclarar que para una mejor interpretación de las ecuaciones se debe tener en cuenta la lista de símbolos y abreviaturas que se encuentra al inicio del presente documento.

7.2.1.1 Cálculo de áreas

El área total de un toroide con radio exterior “R” y radio interior “r”, ambos constantes (Ver Figura 29), está determinada por la Ecuación 8

$$A_T = A_R - A_r \quad (8)$$

Figura 29. Área de un toroide.



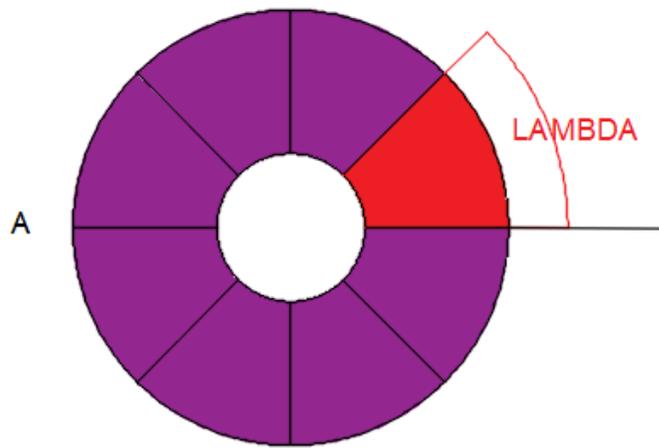
Fuente: Elaboración propia.

En donde A_T es el área total del toroide A_R es el área de la circunferencia de radio R y A_r es el área de la circunferencia de radio r. Por lo tanto, se obtiene:

$$A_T = \pi(R^2 - r^2) \quad (9)$$

Como la sección transversal del motor es un toroide que está dividido por las paletas en ángulos iguales " λ ", se divide el toroide de la Figura 29 como se muestra en la Figura 30.

Figura 30. Área de una sección toroidal.



Fuente: Elaboración propia.

Teniendo en cuenta la Figura 30, el número de divisiones, es decir, el número de paletas "N" del motor, está determinado por la Ecuación 10.

$$\lambda = \frac{2\pi}{N} \quad (10)$$

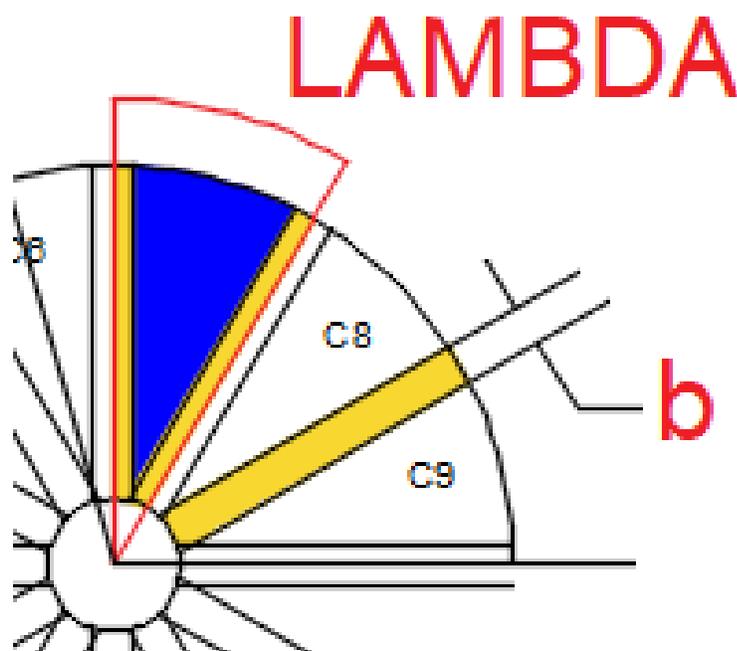
Donde N corresponde al número de paletas y de cámaras.

Así pues, el área de la sección toroidal " A_{ST} ", se expresa en la Ecuación 11

$$A_{ST} = \frac{A_T}{N} \quad (11)$$

Sin embargo, para calcular el área de la sección toroidal real demarcada en color azul en el motor (Ver Figura 31), es necesario restar el área de la paleta marcada en amarillo tomando el plano superior como referencia.

Figura 31. Área de la Sección Toroidal Real.



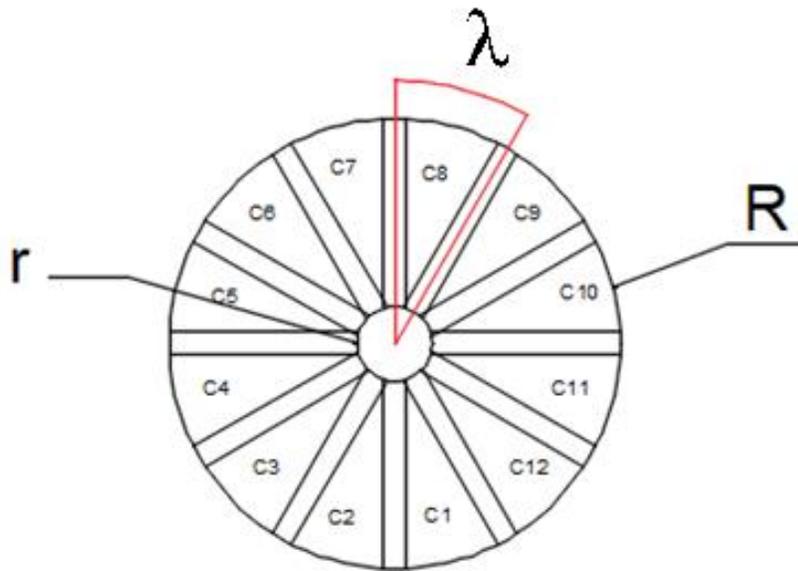
Fuente: Elaboración propia.

Esta área " A_{PS} " Se define con la Ecuación 12

$$A_{PS} = b * (R - r) \quad (12)$$

Donde b es el espesor de la paleta.

Figura 32. Áreas de las Cámaras Vistas en Planta.



Fuente: Elaboración propia.

En consecuencia, para el cálculo del área de la cámara del motor vista desde el rotor, se deben usar las Ecuaciones 11 y 12

Y reemplazando estas ecuaciones se obtiene que el área de cada cámara observando el motor en planta es calculado por la Ecuación 13:

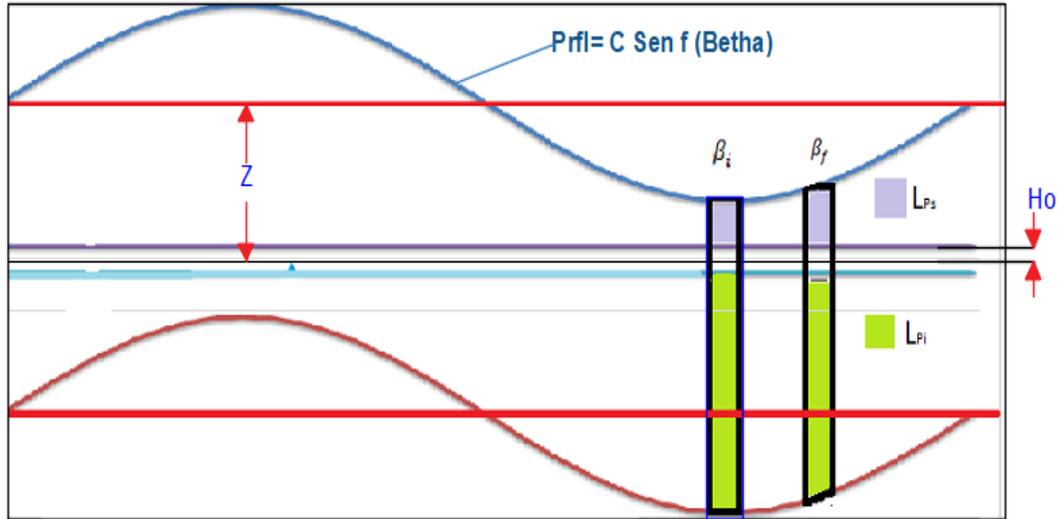
$$A_{CR} = A_{ST} - A_{PS}$$

$$A_{CR} = \frac{A_T}{N} - [b * (R - r)]$$

$$A_{CR} = \frac{[\pi(R^2 - r^2)]}{N} - [b * (R - r)] \quad (13)$$

Por otro lado, para hallar el área de la cámara vista desde el plano frontal es necesario una vista del desarrollo del perfil de la leva, como se muestra en la Figura 33.

Figura 33. Perfil Sinusoidal del Rotor con $f=1$.



Fuente: Elaboración propia.

De este modo, la Figura 33 representa el perfil sinusoidal con amplitud C de cada una de las levas en una vista de desarrollo suponiendo para el primer prototipo una frecuencia " f " igual a uno. Dicha frecuencia del número de ciclos sinusoidales por vuelta completa del motor dentro del modelamiento es llamada con la letra " f ". Adicionalmente, la figura mencionada muestra la distancia entre el eje de simetría del rotor y la superficie de este (H_0) y la distancia entre el eje de simetría del rotor y el eje generatriz del perfil sinusoidal de la leva (Z). Cabe aclarar que el motor a diseñar es un cilindro totalmente simétrico, los valores de H_0 y Z son iguales tanto para las cámaras superiores como para las inferiores.

De acuerdo con la Figura 33, también se evidencia que existe un mismo perfil tanto para las cámaras superiores como para las inferiores pero desfasadas 180° respecto al rotor porque de otro modo el motor se trabaría o se perdería el cierre hermético del mismo

Por otro lado, en la Figura 33, se muestra cómo cambia la longitud de la paleta superior e inferior " $L_{PS}(\beta)$ " y " $L_{PI}(\beta)$ " respecto al plano central en función del recorrido angular β . Dichas longitudes están descritas por las Ecuaciones 14 y 15

respectivamente, teniendo en cuenta que la longitud total de la paleta si permanece constante en todo el recorrido del motor:

$$L_{PS}(\beta) = [Z - H_0 + (C \sin f\beta)] \quad (14)$$

$$L_{PI}(\beta) = [Z - H_0 - (C \sin f\beta)] \quad (15)$$

Donde C es la amplitud de la función sinusoidal y no puede ser mayor a la diferencia de $Z-H_0$.

Es decir que para cualquier desplazamiento angular el recorrido estará determinado por la Ecuación 16.

$$\Delta\beta = \beta_f - \beta_i \quad (16)$$

Esto para cualquier valor de β conocido, además utilizando el concepto de integración definida para calcular el área bajo la curva sinusoidal definida por A_{CF} para las cámaras superiores se tiene que:

$$\begin{aligned} A_{CFS}(\beta) &= \int_{\beta_i}^{\beta_f} L_{PS}(\beta) d\beta \\ A_{CFS}(\beta) &= \int_{\beta_i}^{\beta_f} \{Z - H_0 + (C \sin f\beta)\} d\beta \\ A_{CFS}(\beta) &= \frac{C\{\cos f\beta_i - \cos f\beta_f\}}{f} + \{(Z - H_0)(\beta_f - \beta_i)\} \end{aligned} \quad (17)$$

Y para las cámaras inferiores:

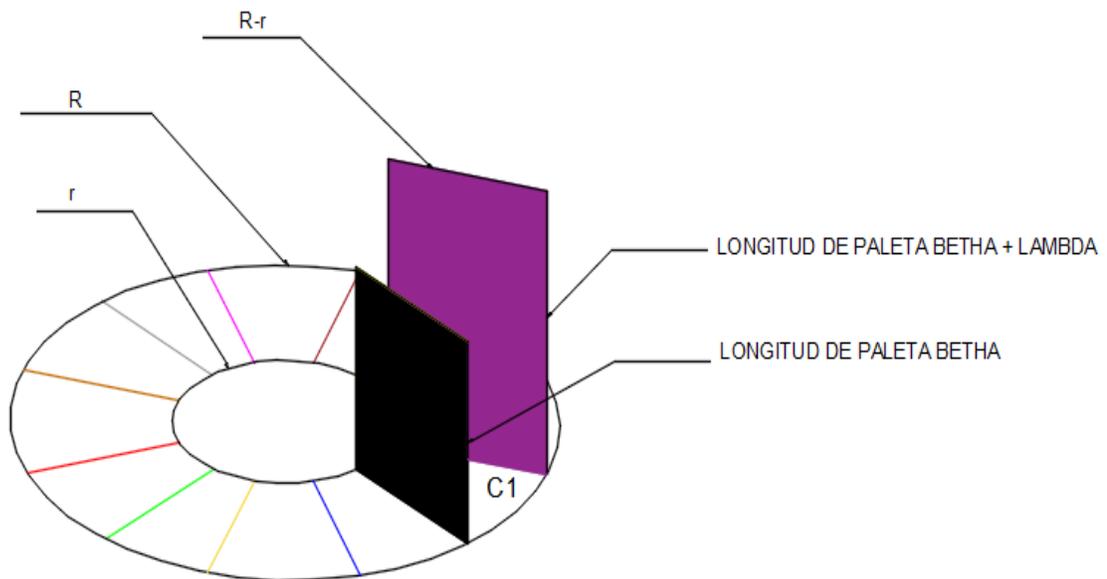
$$A_{CFI}(\beta) = \int_{\beta_i}^{\beta_f} L_{PI}(\beta) d\beta$$

$$A_{CFI}(\beta) = \int_{\beta_i}^{\beta_f} \{Z - H_0 - (C \sin f\beta)\} d\beta$$

$$A_{CFI}(\beta) = \frac{C\{\cos f\beta_f - \cos f\beta_i\}}{f} + \{(Z - H_0)(\beta_f - \beta_i)\} \quad (18)$$

Por otro lado, es necesario calcular el área de la sección transversal de la paleta en cada cámara que interactúa directamente con el vapor. Por ejemplo, en la Figura 34 se evidencia que el área de la paleta de color negro, llamada β , y el área de la paleta siguiente de color morado, llamada $\beta+\lambda$, son diferentes debido a que la longitud de las paletas varía de acuerdo con la posición angular donde se encuentren.

Figura 34. Áreas de las Paletas.



Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con lo anterior, el área de cada paleta depende del ángulo β , la frecuencia del perfil sinusoidal (f), la amplitud del perfil sinusoidal (C), medio espesor del rotor (H_0) y la diferencia entre los radios ($R-r$) del motor como se muestra en la Ecuación 19 para una cámara superior:

$$A_{PS}(\beta) = [R - r][L_{PS}(\beta)]$$

$$A_{PS}(\beta) = [R - r][Z - H_0 + (C \sin f \beta)] \quad (19)$$

Y en la Ecuación 20 para una cámara inferior:

$$A_{PI}(\beta) = [R - r][L_{PI}(\beta)]$$

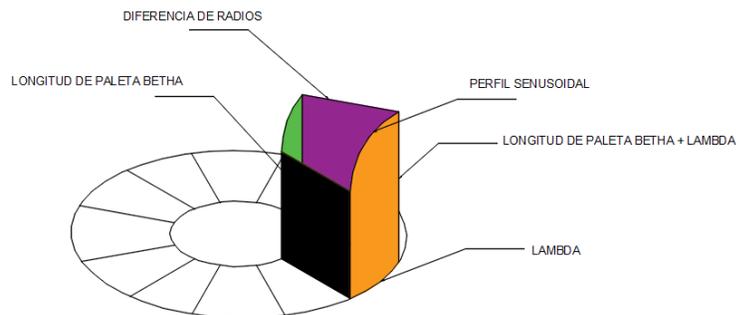
$$A_{PI}(\beta) = [R - r][Z - H_0 - (C \sin f \beta)] \quad (20)$$

Es importante aclarar, que estas áreas calculadas por medio de las Ecuaciones 19 y 20 sirven para el cálculo de las fuerzas aplicadas a cada paleta en cada una de las cámaras debido a la presión de vapor contenida en el espacio entre las paletas λ

7.2.1.2 Calculo volumétrico cada una de las cámaras

Con el fin de calcular la presión en las cámaras del motor es necesario determinar el volumen de cada cámara. Por ejemplo, en la Figura 35 se evidencia que el volumen de la cámara está delimitado por el área de la paleta β (color negro), el área de la paleta $\beta + \alpha$ (color morado), y el área bajo la curva sinusoidal sobre el radio mayor R (color naranja) y el radio menor r (color verde).

Figura 35. Volumen de cada cámara.



Fuente: Elaboración propia.

Por lo anterior, el volumen de una cámara superior describe la forma de una cuña en la cual el cálculo del volumen es complejo de determinar. Matemáticamente, este volumen debe ser implementado mediante las integrales apropiadas en el sistema de referencia cilíndrico.

En este caso, se aproxima a una prolucción prismática de igual longitud de arco, razón por la cual el volumen de esa cuña está aproximadamente determinado por la Ecuación 21:

$$V_{CS}(\beta) = [R - r] * A_{CFS}(\beta)$$

$$V_{CS} = [R - r] * \left[\frac{C\{\cos f\beta_i - \cos f\beta_f\}}{f} + \{(Z - H_0)(\beta_f - \beta_i)\} \right] \quad (21)$$

Y para una cámara inferior por la Ecuación 22:

$$V_{CI}(\beta) = [R - r] * A_{CFI}(\beta)$$

$$V_{CI}(\beta) = [R - r] * \left[\frac{C\{\cos f\beta_f - \cos f\beta_i\}}{f} + \{(Z - H_0)(\beta_f - \beta_i)\} \right] \quad (22)$$

Adicionalmente, por medio de la Ecuación 21 y la Ecuación 22 es posible calcular el volumen máximo y mínimo del motor, con el fin de determinar la relación de compresión. Así pues, la relación de compresión está determinada por la Ecuación 27

$$\Omega = \frac{V(MAX)}{V(MIN)} \quad (23)$$

7.2.1.3 Presión ejercida en cada una de las paletas

La ley de Boyle (conocida también como de Boyle y Mariotte) es un modelo para describir el comportamiento de un gas ideal. Razón por la cual, se considera que el

vapor se va a comportar dentro del motor como un gas ideal. Lo cual significa que la presión de un gas en un recipiente cerrado es inversamente proporcional al volumen del recipiente, cuando la temperatura es constante.

Matemáticamente, la presión está definida por la Ecuación 24:

$$P * V = K \quad (24)$$

Es decir que, si se pasa de un estado 1 que tiene un volumen de gas V_1 y una presión P_1 , luego se pasa a un estado 2 con una presión P_2 , el volumen de gas variará hasta un nuevo valor V_2 , y se cumplirá:

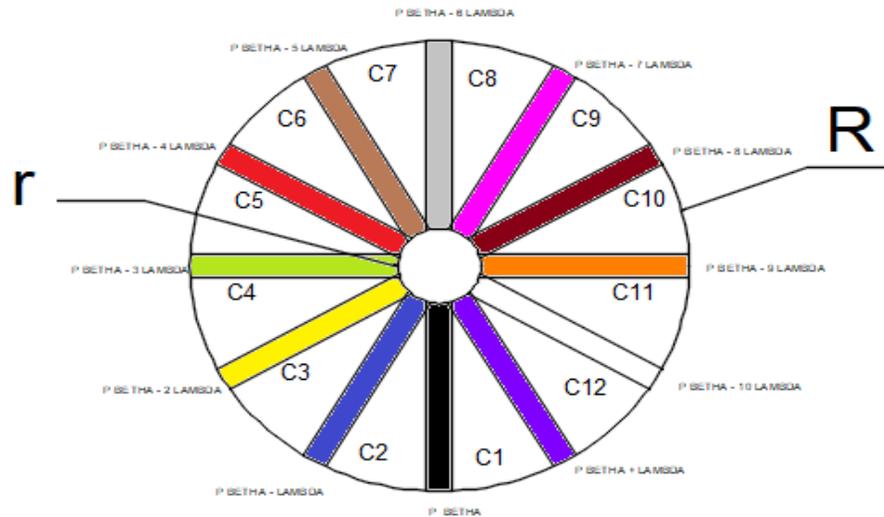
$$P_1 * V_1 = P_2 * V_2 \quad (25)$$

Que es otra manera de expresar la ley de Boyle siempre y cuando la temperatura entre el estado 1 y 2 sea constante, es decir que el proceso sea isotérmico. Cabe resaltar que en futuras investigaciones se puede tener presente algún otro modelo que describa mejor el comportamiento del estado del vapor.

En consecuencia, para conocer la magnitud de la fuerza ejercida en cada una de las paletas, es necesario calcular primero la presión ejercida sobre ellas, a partir de los valores de volumen calculados en la sección anterior, así como la presión de entrada conocida.

Para el análisis de la presión, se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones teniendo en cuenta a la Figura 36

Figura 36. Ubicación de cada una de las paletas en el Rotor.



Fuente: Elaboración propia.

- Se analiza la paleta β
- Se tienen en cuenta N cantidad de paletas
- Se desprecia el volumen inicial de aire dentro de cada cámara
- Se inicia con el análisis del comportamiento del motor, en dos vueltas con una leva de perfil sinusoidal con una frecuencia de dicho perfil denominada "f"
- Las lumbreras de admisión de vapor se ubican en el valor mínimo del perfil sinusoidal.
- Las lumbreras de escape de vapor se ubican en el valor máximo del perfil sinusoidal.
- Entre el escape y la admisión no se considera proceso de compresión del vapor residual que quede en la cámara.

Para el cálculo de las presiones en este prototipo inicial se va a considerar que el fluido a estudiar (Vapor de agua) es un gas ideal, y por tal razón, aplicando la Ley de Boyle, se tiene la Ecuación 26 en las cámaras superiores

$$P_{CS}(\beta) = \frac{P_{CS}(\beta - \Delta\beta)V_{CS}(\beta - \Delta\beta)}{V_{CS}(\beta)} \quad (26)$$

Y para las cámaras inferiores la presión es definida por la Ecuación 27:

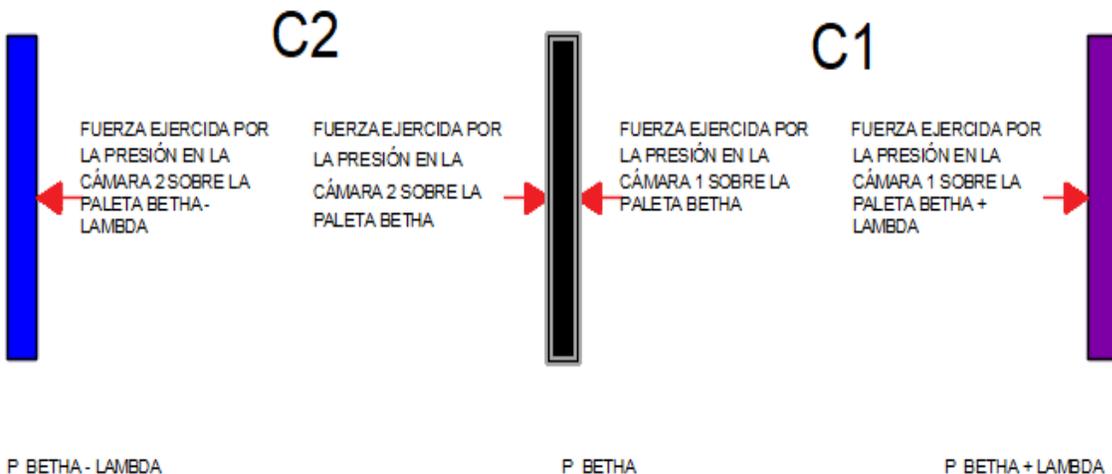
$$P_{CI}(\beta) = \frac{P_{CI}(\beta - \Delta\beta)V_{CI}(\beta - \Delta\beta)}{V_{CI}(\beta)} \quad (27)$$

7.2.1.4 Fuerza ejercida en cada una de las paletas

A partir de los resultados obtenidos en las secciones anteriores, es posible calcular la fuerza ejercida en cada una de las paletas y así determinar el torque ejercido por el motor.

Partiendo del ejemplo de la Figura 36, se hace el análisis de fuerzas que se aprecia en la Figura 37, en la cual se observa que la presión de la planta térmica que ingresa al motor en la cámara 2 ejerce una fuerza en las paletas β y $\beta - \lambda$. Así mismo, la presión en la cámara 1 ejerce una fuerza sobre la paleta β que se opone a la fuerza ejercida en la misma paleta por la presión en la cámara 2.

Figura 37. Fuerzas aplicadas sobre la Paleta Betha., la siguiente y la anterior.



Fuente: Elaboración propia.

Aplicando que la fuerza es directamente proporcional a presión, la fuerza en cada paleta para cualquier β se calcula por medio de la Ecuación 28 para las cámaras superiores:

$$F_{PSN}(\beta) = A_{PSN}(\beta)[P_{CSN}(\beta) - P_{CSN-1}(\beta)] \quad (28)$$

Y para las cámaras inferiores por la Ecuación 29

$$F_{PIN}(\beta) = A_{PIN}(\beta)[P_{CIN}(\beta) - P_{CIN-1}(\beta)] \quad (29)$$

En donde el subíndice N corresponde al número de la cámara que está analizando, A_{PIN} es el área de la paleta inferior en la cámara N y A_{PSN} es el área de la paleta superior en la cámara N.

7.2.1.5 Torque ejercido en cada una de las paletas

Cuando se aplica una fuerza en algún punto de un cuerpo rígido, dicho cuerpo tiende a realizar un movimiento de rotación en torno a algún eje. Ahora bien, la propiedad de la fuerza aplicada para hacer girar al cuerpo se mide con una magnitud física que se denomina torque o momento de la fuerza. Entonces, se llama torque o momento de una fuerza a la capacidad de dicha fuerza para producir un giro o rotación alrededor de un punto.

Entonces, considerando estos dos elementos, intensidad de la fuerza y distancia de aplicación desde su eje, el momento de una fuerza es, matemáticamente, igual al producto de la intensidad de la fuerza por la distancia desde el punto de aplicación de la fuerza hasta el eje de giro.

Expresada matemáticamente como se muestra en la Ecuación 30

$$\tau = F * d \quad (30)$$

Donde:

τ = Torque

F = Fuerza aplicada

d = Distancia al eje de giro

El torque se expresa en unidades de fuerza-distancia, se mide comúnmente en Newton metro (Nm).

Como se ha visto anteriormente, se analizaron las fuerzas ejercidas sobre cada una de las paletas y las superficies involucradas en el funcionamiento del motor. Ahora con dichos resultados es posible calcular el torque que aporta cada paleta en determinada posición angular.

Reemplazando en la Ecuación 30 los valores calculados, se obtiene que el torque en cada una de las paletas en determinada posición angular está determinado por la Ecuación 31 para las cámaras superiores:

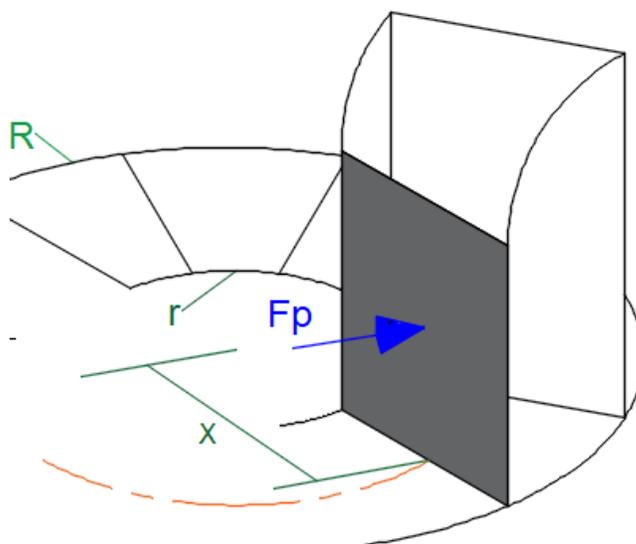
$$\tau_{PSN}(\beta) = F_{PSN}(\beta) * X \quad (31)$$

Y por la Ecuación 32 para las cámaras inferiores:

$$\tau_{PIN}(\beta) = F_{PIN}(\beta) * X \quad (32)$$

Donde X es la distancia del eje del motor al punto de aplicación de la fuerza en cada paleta como se ve en la Figura 38.

Figura 38. Fuerza resultante ejercida en una paleta.



Fuente: Elaboración propia.

Así pues, la distancia X está determinada por la Ecuación 33:

$$X = r + \left[\frac{(R-r)}{2} \right] \quad (33)$$

Por lo anterior el torque para las paletas en las cámaras superiores se expresa como lo muestra la Ecuación 34

$$\tau_{PSN}(\beta) = F_{PSN}(\beta) * \frac{(r+R)}{2} \quad (34)$$

Y para las paletas en las cámaras inferiores como lo muestra la Ecuación 35

$$\tau_{PIN}(\beta) = F_{PIN}(\beta) * \frac{(r+R)}{2} \quad (35)$$

Por otro lado, con las ecuaciones anteriores (Ecuación 34 y Ecuación 35), se puede hallar el torque total del motor para un ángulo determinado, sumando los torques que aporta cada paleta. Este torque total está definido por la Ecuación 36:

$$\tau_t(\beta) = \sum_{n=1}^N \tau_{PSn}(\beta) + \sum_{n=1}^N \tau_{PIn}(\beta) \quad (36)$$

7.2.1.6 Torque de carga

Como se puede apreciar en la Ecuación 36, el torque generado crece constantemente en función del desplazamiento angular β , tendiendo a infinito, lo cual no es cierto porque en la vida real existe un torque de carga nominal que se opone al movimiento y se da por la fricción entre los componentes, fluido a trabajar, desgaste de las piezas, imperfecciones de fabricación de los componentes, entre otras. Por esta razón es necesario contrarrestar el torque total calculado en la Ecuación 36 con ese torque carga nominal.

Así pues, para representar el torque de carga, se asume que existe un rodamiento o cojinete con el fin de mostrar un comportamiento del motor más cercano a la realidad. Dicho torque de carga está definido por una constante de amortiguación del cojinete multiplicada por la velocidad angular del motor. En consecuencia, el torque de carga está descrito por la Ecuación 37.

$$\tau_B = B * \omega(\beta) \quad (37)$$

7.2.1.7 Momento de inercia del motor

El momento de inercia del motor es uno de factores que influyen en la aceleración angular, siendo esta última una de las variables de respuesta del modelo a diseñar, por lo cual es necesario calcular dicha oposición al movimiento.

De este modo, para calcular el valor del momento de inercia se considera que el subensamble mostrado en la Figura 28 es el único que se opone al movimiento, que

los valores a tener en cuenta se encuentran en el informe generado por el software SolidWorks® y dichos valores están tabulados en la Tabla 7 así:

Tabla 7. Propiedades físicas del Subensamble.

PROPIEDAD FÍSICA	VALOR
MASA	35,414 Kg
MOMENTO DE INERCIA EN X	0,5 Kg * m ²
MOMENTO DE INERCIA EN Y	0.015 Kg * m ²
MOMENTO DE INERCIA EN Z	0.015 Kg * m ²

Fuente: Elaboración propia.

Como todo el motor gira con respecto al eje z, el valor a tener en cuenta de la Tabla 7 en esta sección es:

$$I_{CM} = 0.015 \text{ Kg} * m^2 \quad (38)$$

Cabe aclarar, que el punto donde es aplicado ese momento de inercia es el centro de masa, que para el subensamble mostrado en la Figura 28 como no es una geometría regular por medio del informe generado en SolidWorks® es posible también determinar las coordenadas donde está ubicado dicho momento de inercia dependiendo de las dimensiones del motor diseñado, teniendo en cuenta que el cálculo para la presente investigación se realiza mediante la suposición de unos parámetros dimensionales establecidas a priori para el primer prototipo; pero en un modelado detallado se deberá calcular geoméricamente dicho valor del momento de inercia usando únicamente los parámetros geométricos de entrada del motor.

7.2.1.8 Aceleración angular del motor

La aceleración angular se expresa en radianes sobre segundo al cuadrado (rad/s²). Tiene carácter vectorial y su dirección es la del eje de rotación con el mismo sentido de la velocidad angular. Por lo tanto, si la velocidad angular crece, la

aceleración angular será positiva, mientras que si la velocidad angular disminuye, la aceleración será negativa. La aceleración angular está determinada por la Ecuación 39 [82] y se denota con la letra griega α :

$$\alpha = \frac{\Delta\omega}{\Delta t} \text{ en dirección del eje} \quad (39)$$

Así pues, la aceleración angular es una de las variables de respuesta del modelo que se diseña, debido a que permite identificar el comportamiento del motor en movimiento. Dicha variable se calcula despejando la Ecuación 40 que representa un balance de torques. Luego, se reemplaza el torque de carga calculado por la Ecuación 37, obteniendo la Ecuación 41:

$$\tau_t(\beta) - \tau_B = \alpha_m(\beta) * I_{CM} \quad (40)$$

$$\alpha_m(\beta) = \frac{\tau_t(\beta) - [B * \omega(\beta)]}{I_{CM}} \quad (41)$$

En consecuencia, es importante resaltar que dicha Ecuación 40, es la ecuación dinámica más relevante dentro del modelamiento matemático del motor, porque representa la relación proporcional entre las fuerzas que aportan y las que se oponen al giro del motor con la aceleración angular, teniendo como constante de proporcionalidad el momento de inercia de dicho motor.

7.2.1.9 Velocidad angular del motor

En el movimiento circular, se denomina velocidad angular a la magnitud que caracteriza la rapidez con que varía el ángulo barrido por la línea que une la partícula que gira con el centro de rotación.

Se denota comúnmente con la letra griega omega (ω), y puede expresarse en función del número de vueltas o revoluciones que el cuerpo realice en la unidad de tiempo, por lo que a veces se da en revoluciones por minuto (RPM) o por segundo

(RPS).[83]. También puede expresarse como el cambio de la velocidad angular respecto al tiempo como se evidencia en la Ecuación 42

$$\alpha = \frac{d\omega}{dt} \quad (42)$$

Dicha velocidad se puede hallar dando solución a la ecuación diferencial de primer orden (Ecuación 43), obtenida a partir de reemplazar la Ecuación 37 y la Ecuación 42 en la Ecuación 40 como se ve a continuación:

$$\begin{aligned} \tau_t(\beta) - [B * \omega(\beta)] &= \frac{d\omega}{dt} * I_{CM} \\ \frac{\tau_t(\beta)}{I_{CM}} - \frac{[B * \omega(\beta)]}{I_{CM}} &= \frac{d\omega}{dt} \\ \frac{1}{I_{CM}} \tau_t(\beta) - \frac{B}{I_{CM}} \omega(\beta) &= \frac{d\omega}{dt} \end{aligned} \quad (43)$$

Adicionalmente, dentro del modelamiento de un motor, sin importar la tipología diseñada es importante calcular la velocidad angular en el eje de salida debido a que por medio de esta variable es posible determinar la potencia entregada por el motor.

Por lo tanto, para dar solución a la ecuación diferencial (Ecuación 43) se recurre al método numérico de Runge-Kutta de cuarto orden, el cual genera una solución aproximada de esa ecuación.

Los métodos de Runge-Kutta (RK), son un conjunto de métodos numéricos (implícitos y explícitos) para la aproximación de soluciones de ecuaciones diferenciales ordinarias, concretamente, del problema de valor inicial.[37]

El método Runge-Kutta de cuarto orden, es referenciado como «RK4» o como «el método Runge-Kutta», el cual es usado en la solución de la ecuación diferencial generada.[37]. Este método, define un problema de valor inicial como se muestra en la Ecuación 44:

$$y'(t) = f(x, y), \quad y(x_0) = y_0$$

$$\omega'(\beta) = \left(\frac{Tt(\beta)}{I_{cm}} \right) - \left[\left(\frac{B}{I_{cm}} \right) * w(\beta) \right] \quad \omega(1) = 0 \quad (44)$$

Entonces el método RK4 para este problema particular está dado por la Ecuación 45 que es la solución numérica aproximada de la ecuación diferencial Ecuación 44:

$$y_{n+1} = y_i + \frac{1}{6}h(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)$$

$$w_{(n+1)} = w_i + \frac{1}{6}\Delta\beta (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \quad (45)$$

Donde

$$k_1 = \omega(\beta_i, \omega_i) \quad (46)$$

$$k_2 = \omega\left(\beta_i + \frac{1}{2}\Delta\beta, \omega_i + \frac{1}{2}k_1\Delta\beta\right) \quad (47)$$

$$k_3 = \omega\left(\beta_i + \frac{1}{2}\Delta\beta, \omega_i + \frac{1}{2}k_2\Delta\beta\right) \quad (48)$$

$$k_4 = \omega(\beta_i + \Delta\beta, \omega_i + k_3\Delta\beta) \quad (49)$$

Así, el siguiente valor $\omega_{(n+1)}$ es determinado por el presente valor (ω_n) más el producto del tamaño del intervalo ($\Delta\beta$) por una pendiente estimada. La pendiente es un promedio ponderado de pendientes, donde k_1 es la pendiente al principio del intervalo, k_2 es la pendiente en el punto medio del intervalo, usando k_1 para determinar el valor de ω en el punto $\beta_n + \frac{\Delta\beta}{2}$. Luego, k_3 es otra vez la pendiente del punto medio, pero ahora usando k_2 para determinar el valor de ω ; k_4 es la pendiente al final del intervalo, con el valor de ω determinado por k_3 . Promediando las cuatro pendientes, se le asigna mayor peso a las pendientes en el punto medio:

En consecuencia, la solución aproximada de la ecuación diferencial de la velocidad angular (Ecuación 44) se reemplaza en la Ecuación 41 y se determina la aceleración angular del motor.

7.2.1.10 Potencia entregada por el motor

Cuando se estudia el movimiento desde el punto de vista energético, basado en el concepto de trabajo mecánico, no se tiene en cuenta el factor tiempo. Razón por la cual, para el estudio de las máquinas, se contextualiza el concepto de potencia en Física, que define la potencia como el desarrollo del máximo trabajo en el menor tiempo posible y está descrita por la Ecuación 50:

$$\dot{\omega} = \frac{w}{t} \quad (50)$$

Donde:

$\dot{\omega}$: Potencia desarrollada por la fuerza que realiza el trabajo. Su unidad de medida en el Sistema Internacional es el Vatio (W).

W: Trabajo. Su unidad de medida en el Sistema Internacional es el Julio (J).

t: Tiempo durante el cual se desarrolla el trabajo. Su unidad de medida en el Sistema Internacional es el segundo (s).

En consecuencia, en términos de movimiento circular esa Potencia está determinada por la Ecuación 51 [84].

$$\dot{\omega} = \tau * \omega \quad (51)$$

Así mismo, es importante determinar la potencia entregada por el motor porque de esa forma es posible identificar el uso o disposición final que va a tener.

De esta manera, la potencia entregada por el motor está definida por la Ecuación 52:

$$\dot{\omega}_m(\beta) = \tau_t(\beta) * \omega(\beta) \quad (52)$$

Donde $\tau_t(\beta)$ es el torque total del motor y $\omega(\beta)$ es la velocidad angular del mismo.

De este modo, quedan generadas todas las ecuaciones gobernantes que son solucionadas a través de un programa desarrollado en Matlab® y que se explica en el siguiente numeral.

7.2.2 PROGRAMACIÓN EN MATLAB®

Para programar la herramienta computacional de acuerdo a las ecuaciones gobernantes en Matlab (Ver Anexo B), en primera instancia, se limpian las ventanas de comandos y la memoria de variables para evitar errores. Luego, el usuario final tiene la opción de trabajar con unos valores predeterminados o de ingresar sus propios valores, tal como se evidencia en la Figura 39.

Figura 39. Encabezado y respuesta software generado.

```

Command Window
BIENVENIDO AL SOFTWARE DE MODELAMIENTO DE UN MOTOR RADMAX POR EXPANSION VOLUMÉTRICA
Para iniciar seleccione 1 si quiere usar valores predefinidos o 2 para usar sus propios valores
1
Giro en grados del motor: 720
Frecuencia del perfil sinusoidal: 1
Número de paletas: 12
Radio externo del motor (m): 0.2250
Radio interno del motor (m): 0.1450
Distancia entre el eje del motor y el eje del perfil sinusoidal (m): 0.1500
Medio espesor del rotor (m): 0.0100
Amplitud de la forma sinusoidal del la leva: 0.050
Presión de la planta(kPa): 744.66
Momento de Inercia (kg*m^2): 0.0150
Constante de amortiguación: 0.050
Velocidad angular del motor: 22.31 rad/s
Potencia entregada por el motor: 28.35 W

INICIO DE GRAFICACIÓN DE RESULTADOS\n
Para graficar solo las respuestas totales ingrese 1
Para graficar volúmenes, presiones, fuerzas y torques por cámara/paleta ingrese 2
Para graficar presiones y fuerzas en solo dos cámaras/paletas ingrese 3
Si desea graficar todo ingrese 4
1
fx >> |

```

Fuente: Matlab® con programación y datos propios.

Si el usuario decide trabajar con los valores por defecto, estos serán mostrados en la ventana de comandos. En caso contrario, no se mostrarán los valores ingresados por el usuario. Los valores que deben ser ingresados por el usuario son los siguientes:

- Giro en grados del motor que se va a analizar (Ngra).
- Cantidad de paletas que tiene el motor que debe ser entero (Npal).
- Radio externo del rotor en metros (R).
- Radio interno del rotor en metros (r).
- Distancia entre eje rotor y borde de la leva (z).
- Distancia del eje del rotor a la superficie (ho).
- Amplitud de la forma sinusoidal de la leva (A).
- Presión de entrada planta térmica en Pascales (Ppt).
- Constante de amortiguación por cojinete (B)

De tal manera que Matlab® calcula otras características dimensionales del motor a partir de la información anterior, con el fin de generar los parámetros geométricos finales del motor que se muestran a continuación:

- Angulo de separación entre cada paleta en grados (Lambda).
- Giro en radianes del motor que se va a analizar (Nrad).
- Diferencia de radios (Rr).
- Altura promedio de la cámara (hz).
- Diferencia de entre ángulo y ángulo (Dbeta).
- Ángulos posibles contra los cuales se grafican las demás variables (beta)
- Descripción del perfil de la leva (Prfl).
- Matriz de 1 fila por el número de columnas correspondiente al número de ángulos estudiados (Ngra) para graficar en grados.

Luego, se definen las siguientes variables y se inicializan en cero: para ser trabajadas más adelante. En consecuencia, las matrices creadas son:

- Longitud de la paleta con respecto al plano central.
- Presiones de cámaras superiores.
- Presiones de cámaras inferiores.
- Fuerza aplicada a las paletas superiores.
- Fuerza aplicada a las paletas inferiores.

- Torque generado en las paletas superiores.
- Torque generado en las paletas inferiores.
- Torque generado por el motor.
- Aceleración angular generada por el motor.
- Velocidad angular generada por el motor.
- Potencia entregada por el motor.

Luego, se crea una matriz para representar la posición angular efectiva que percibe cada cámara/paleta dentro del recorrido que hace el motor. Para dicho fin, se asigna una fila completa para cada paleta/cámara dentro de la matriz teta. A continuación, se sobrescribe el vector beta y se convierte en una matriz igual pero en radianes.

Después se ejecuta el cálculo del área de la cámara superior vista de frente y el área de la cámara inferior vista de frente, de acuerdo con las Ecuaciones 17 y 18, y se almacenan en las variables Acfs y Acfi, respectivamente.

Posteriormente, se calcula el volumen de las cámaras superiores e inferiores siguiendo las Ecuaciones 21 y 22, respectivamente, para todos los ángulos de rotación.

Luego, se asignan las presiones de planta en cámaras superiores donde haya máximos (para las cámaras inferiores) y mínimos (para las cámaras superiores) en los valores de la variable Pfrl.

Después, se usa la ley de Boyle (Ecuaciones 26 y 27) para asignar las presiones en cada cámara solo mientras el volumen de esta se incremente porque se asume que en el punto máximo de volumen está ubicado el escape y a partir de aquí hasta la admisión se desprecia la presión dentro de la cámara. Este procedimiento es ejecutado tanto para las cámaras superiores como para las inferiores.

Luego, para el cálculo de las fuerzas aplicadas a cada paleta es necesario hallar el valor del área de cada una de estas paletas mediante las Ecuaciones 19 y 20.

Para el cálculo de las fuerzas en las paletas superiores e inferiores se tiene en cuenta las Ecuaciones 28 y 29 restando las presiones entre cámaras adyacentes (por ejemplo, fila dos menos fila uno de la variable Pcs) en un ángulo determinado y multiplicando por el área de la paleta en ese mismo ángulo. Esto con el fin de calcular el torque aplicado a cada paleta en función del desplazamiento angular ocurrido y de

esa manera, determinar el torque total entregado por el motor de acuerdo con la Ecuación 36.

Así pues, como ya se tiene el torque aplicado tanto en las paletas superiores como en las inferiores, se realiza una suma de las matrices calculadas para obtener el torque en el motor.

Posteriormente, por medio del método Runge–Kutta de cuarto orden se da solución a la ecuación diferencial (Ecuación 45) para determinar la velocidad angular con la que gira el motor diseñado. También se calcula la velocidad promedio de la matriz resultante para mostrarla en terminal.

Luego, después de haber calculado la velocidad angular del motor se reemplaza el valor obtenido en la Ecuación 41 y en la Ecuación 52 para calcular la aceleración angular y la potencia entregada por el motor, respectivamente. También se calcula la potencia promedio de la matriz resultante para mostrarla en terminal. De tal manera que con esos valores calculados el motor diseñado queda completamente modelado matemáticamente.

Posteriormente, al usuario final se le brindan 4 opciones para graficar los resultados obtenidos en el modelo:

- OPCIÓN 1: graficar sólo las respuestas totales.
- OPCIÓN 2: graficar volúmenes, presiones, fuerzas y torques por cámara/paleta.
- OPCIÓN 3: graficar presiones y fuerzas en solo dos cámaras/paletas.
- OPCIÓN 4: graficar todas las anteriores.

Cabe aclarar que para la herramienta computacional entregue las respuestas mostradas a continuación en las Figuras 40, 41, 42, y 43 fue necesario suponer parámetros dimensionales del motor y de operación de la planta termica de la Universidad y de acuerdo a modelos similares fabricados por Radmax Technologies Company. Dichos parámetros dimensionales del motor y de operación de la planta son:

- $N_{gra} = 720$; (Giro en grados del motor que se va a analizar).
- $f = 1$; (frecuencia del perfil sinusoidal).

- $N_{pal} = 12$; (Cantidad de paletas que tiene el motor. Debe ser entero).
- $R = 0.225$; (Radio externo del rotor en metros).
- $r = 0.145$; (Radio interno del rotor en metros).
- $z = 0.150$; (Distancia entre el eje del rotor y el eje del perfil sinusoidal).
- $h_0 = 0.01$; (Medio espesor del rotor).
- $C = 0.05$; (Amplitud de la forma sinusoidal de la leva).
- $P_{pt} = 744.66$; (Presión de entrada planta térmica en kilo pascales).
- $I_{cm} = 0.015$; (Momento de inercia del motor en $kg \cdot m^2$).
- $B = 0.05$; (Constante de amortiguación).

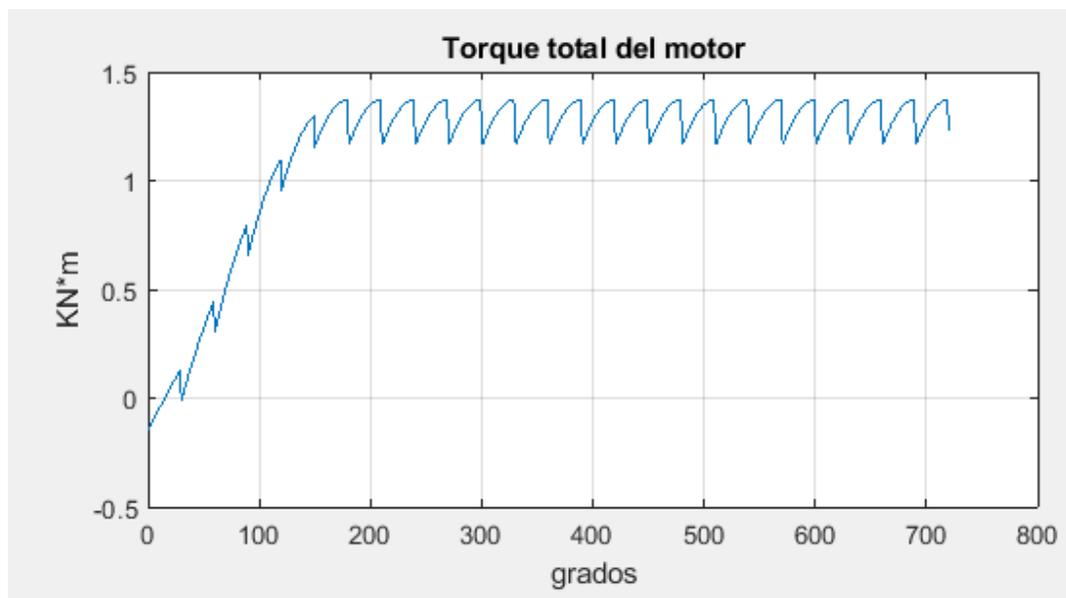
Los parámetros de respuesta calculados y mostrados de forma gráfica para su mejor interpretación por el software diseñado son:

7.2.2.1 Respuestas totales

Las respuestas totales del modelo son:

- Torque generado por el motor en función del desplazamiento angular Beta (Ver Figura 40):

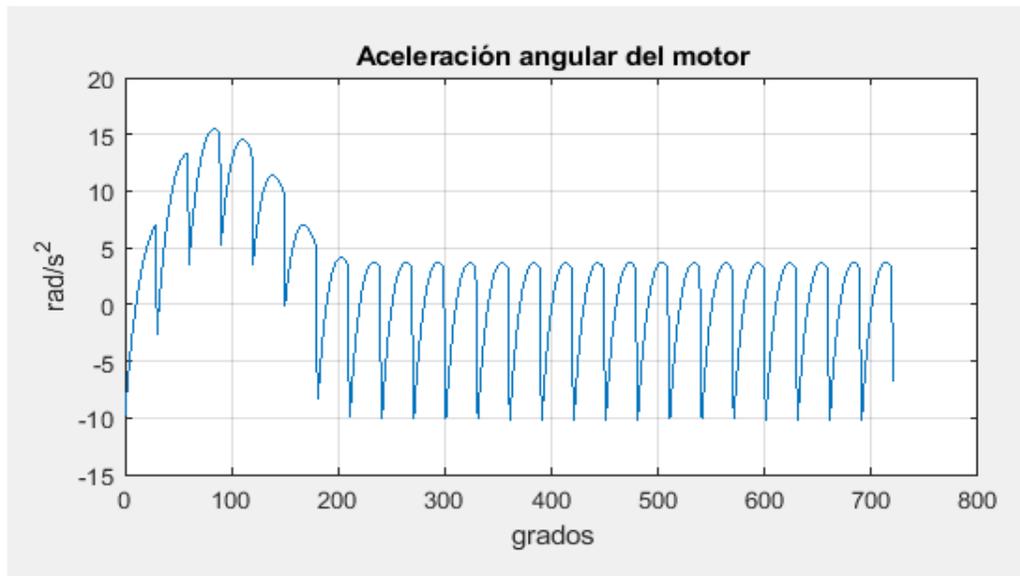
Figura 40. Torque generado en el motor.



Fuente: Matlab® con programación y datos propios.

- Aceleración angular del motor en función del desplazamiento angular Beta (Ver Figura 41):

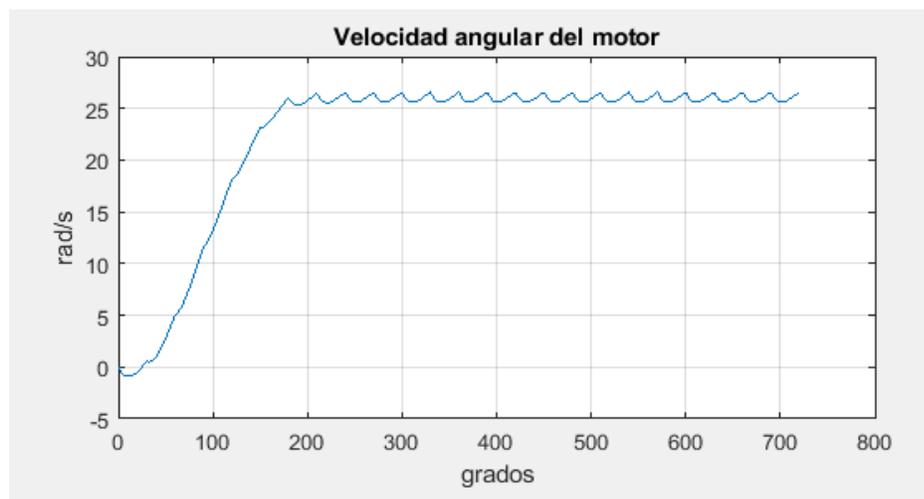
Figura 41. Aceleración angular del motor.



Fuente: Matlab® con programación y datos propios.

- Velocidad angular del motor en función del desplazamiento angular Beta (Ver Figura 42):

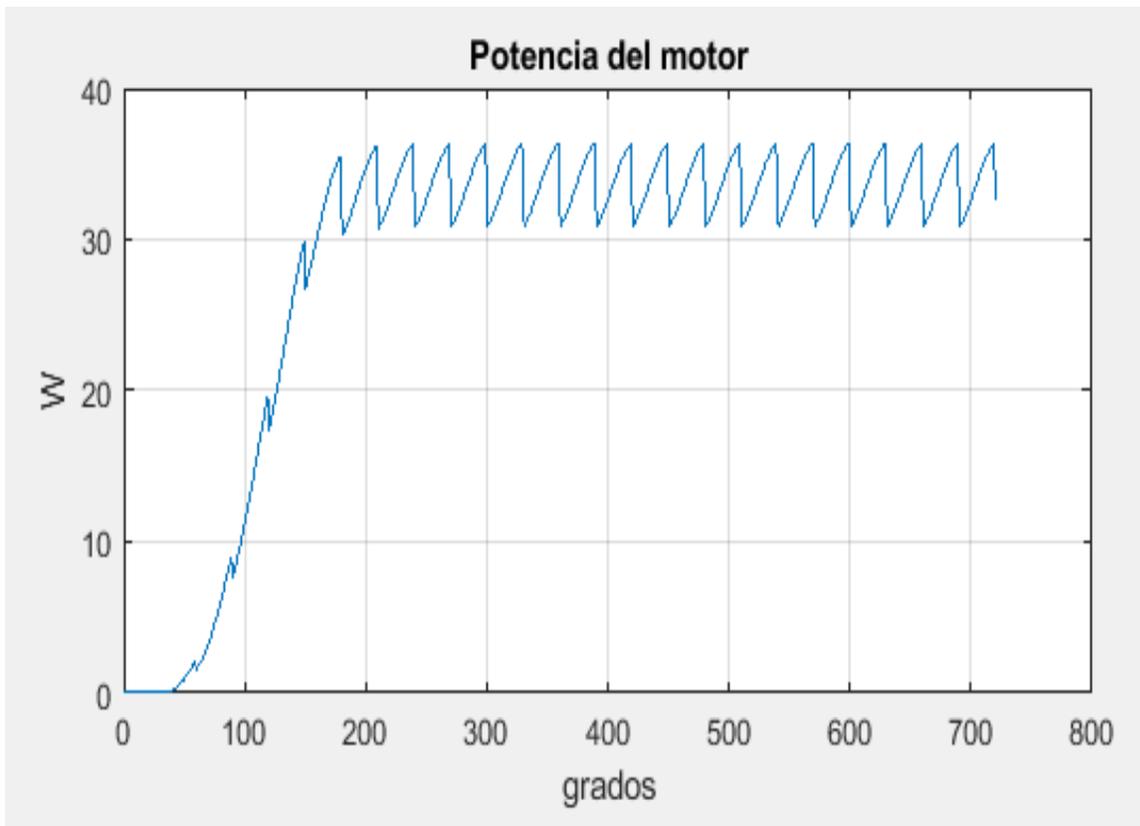
Figura 42. Velocidad angular del motor.



Fuente: Matlab® con programación y datos propios.

- Potencia entregada del motor en función del desplazamiento angular Beta (Ver Figura 43):

Figura 43. Potencia generada por el motor.



Fuente: Matlab® con programación y datos propios.

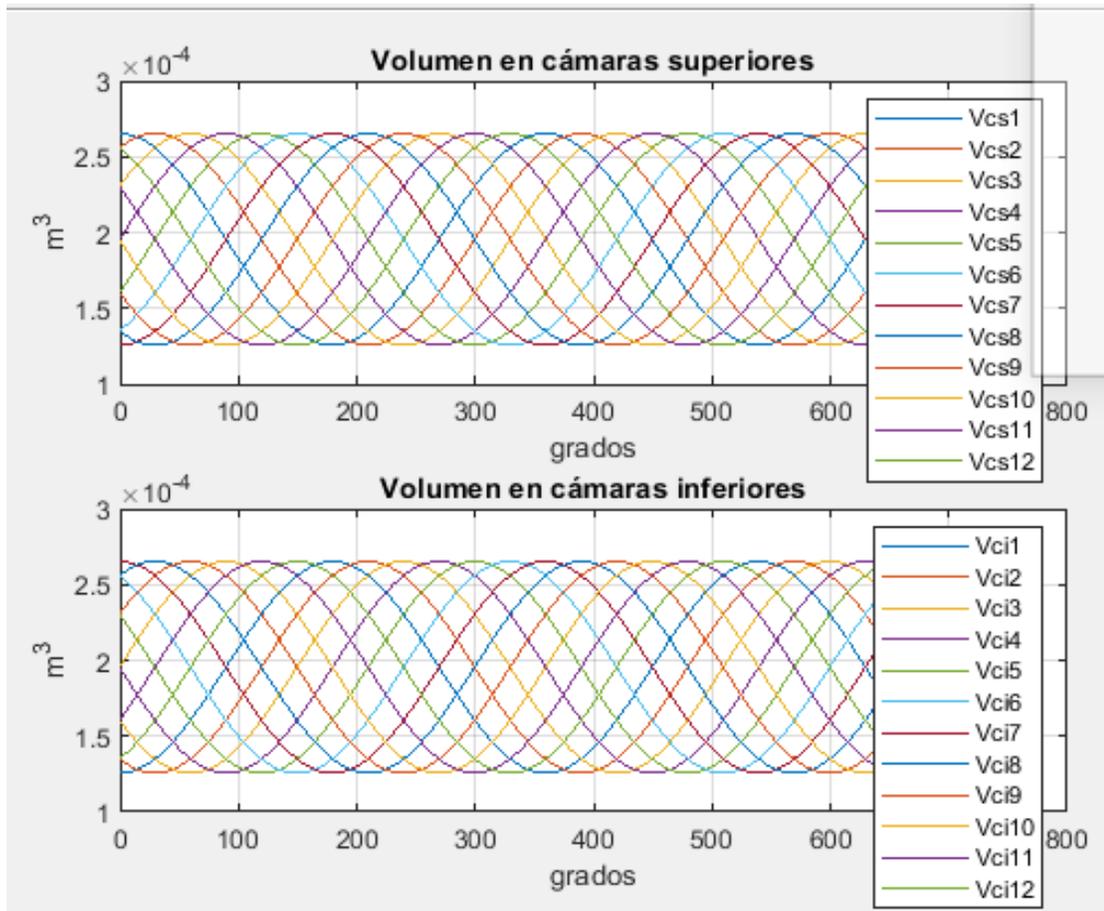
Como se observa en la Figura 40, el giro de este motor es provocado por un torque total del motor: este hace que dicha maquina arranque con una aceleración ascendente como se muestra en la Figura 41 y a medida que continua girando el motor, dicha aceleración tiende a 0, mientras que la velocidad angular se incrementa y se estabiliza en un valor cercano a los 22.31 rad/seg, como lo muestra la Figura 42. En consecuencia, esa velocidad angular provoca que el motor entregue una potencia de 28.35 W en promedio, como se evidencia en la Figura 43.

7.2.2.2 Volúmenes, presiones, fuerzas y torques por cámara/paleta

Adicionalmente, para identificar el comportamiento al interior del motor se generan otras graficas que describen el comportamiento de cada variable al interior del motor mientras este gira.

La primera de esta serie de graficas es la figura del volumen de cada cámara en función del desplazamiento angular Beta (Ver Figura 44). Dentro de esta grafica se evidencia el cambio periódico del espacio dentro de cada cámara (representada con una línea de color diferente) a lo largo de 2 vueltas del motor.

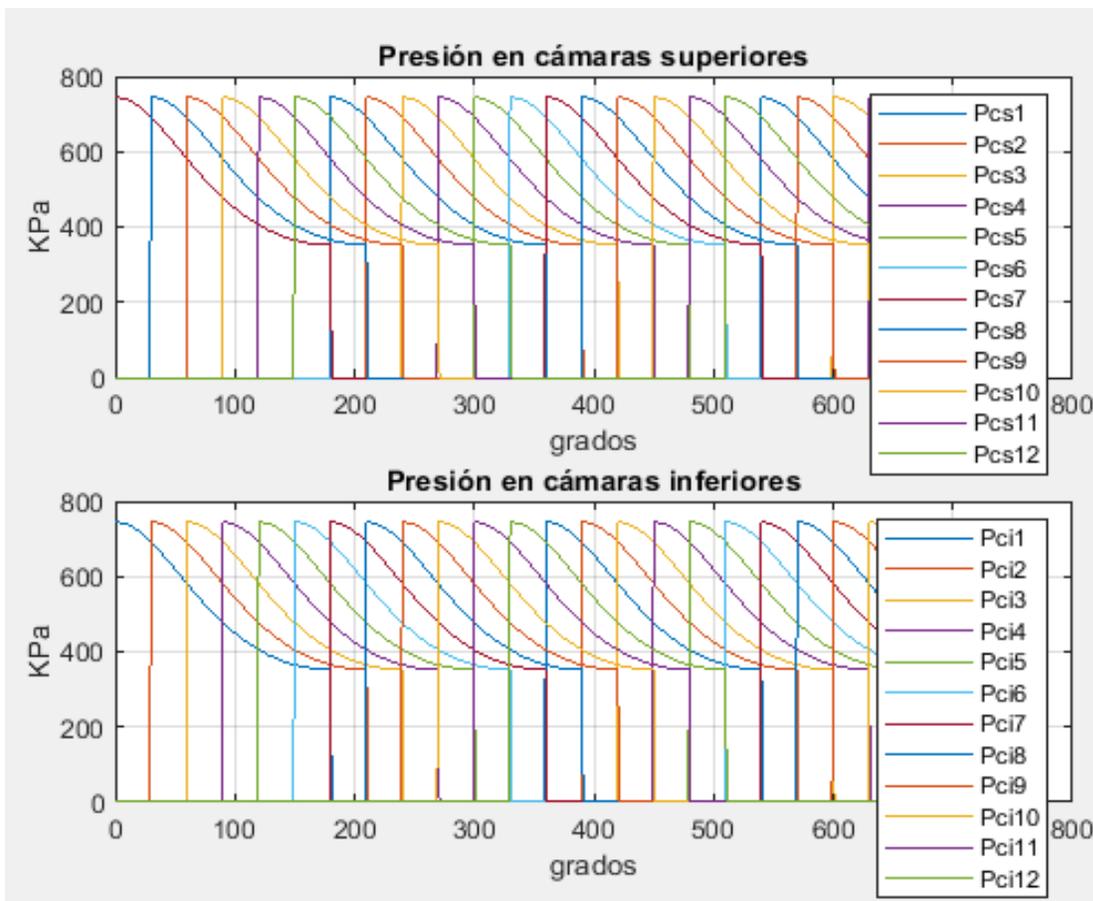
Figura 44. Volumen de cada cámara.



Fuente: Matlab® con programación y datos propios.

Por otro lado, la gráfica siguiente es la Figura 45 que corresponde a las presiones en cada cámara en función del desplazamiento angular Beta. En esta grafica se observa la ubicación angular de cada una de las lumbreras de admisión en los picos de cada línea dibujada para cada cámara (representada con una línea de color diferente), tanto para cámaras superiores como para cámaras inferiores. Cabe resaltar que los comportamientos para las cámaras superiores e inferiores son los mismos de aquí en adelante, debido a que el desplazamiento es simétrico respecto al eje del rotor. Para el caso del cálculo de la presión, después de que la cámara pasa la lumbrera de escape se asume una presión de valor cero, despreciando el contenido de aire o vapor que haya quedado en la cámara.

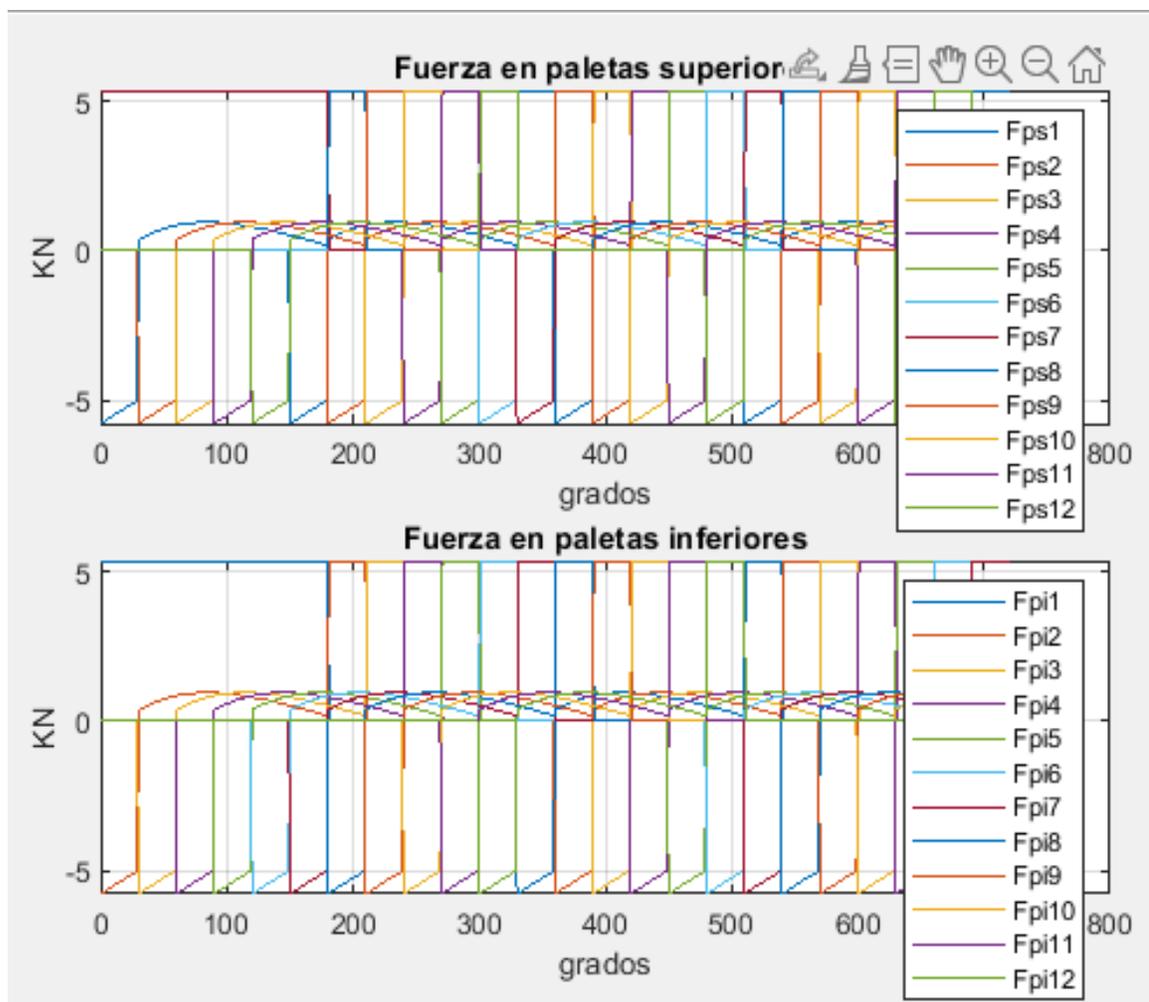
Figura 45. Presión en cada cámara.



Fuente: Matlab® con programación y datos propios.

Luego, se continúa graficando la Fuerza en cada una de las paletas en función del desplazamiento angular Beta (Ver Figura 46). Con esta gráfica se representa como varían las fuerzas en cada paleta específicamente en los puntos donde las presiones de las cámaras se traslapan. Es importante resaltar que existen fuerzas negativas en estas gráficas debido a que en estos puntos es cuando la presión en la cámara estudiada se considera con un valor de cero y la presión de la cámara posterior tiene vapor recién admitido, con una presión máxima.

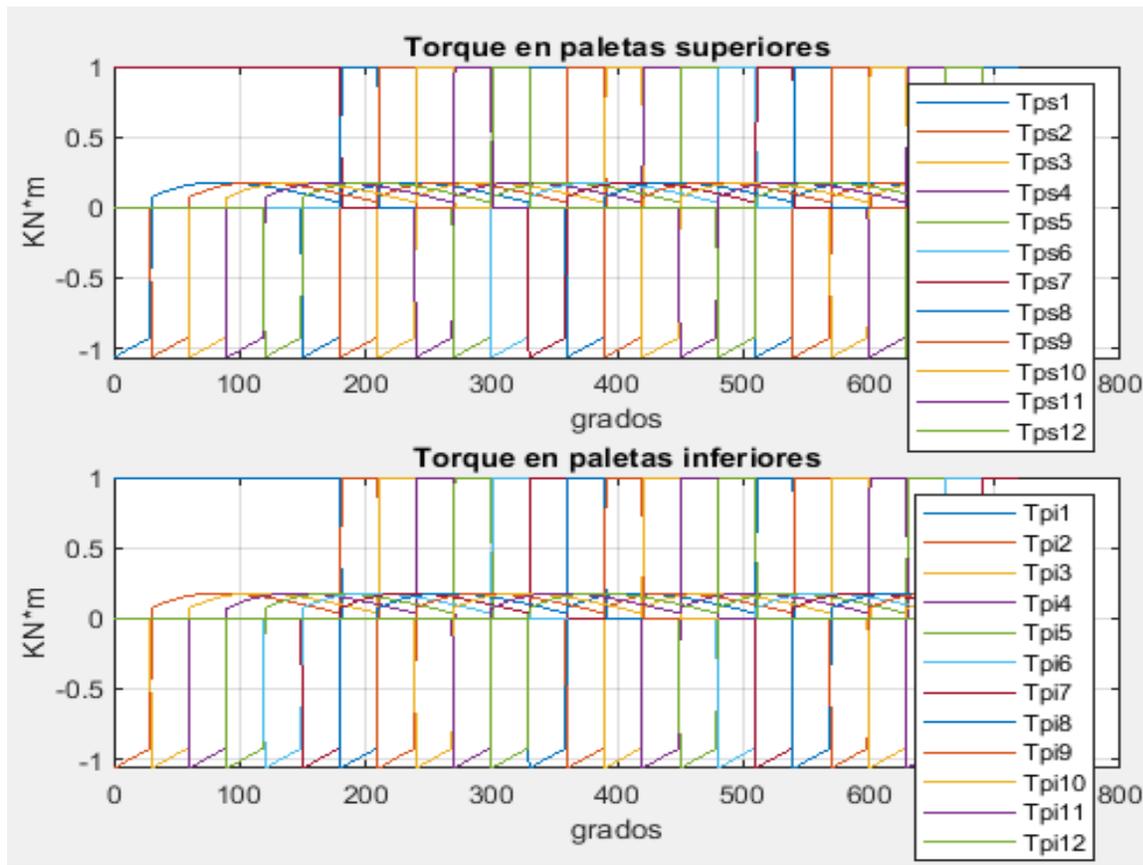
Figura 46. Fuerza en cada paleta.



Fuente: Matlab® con programación y datos propios.

Así pues, la siguiente grafica generada es el torque en cada una de las paletas en función del desplazamiento angular Beta (Ver Figura 47). En esta gráfica se observa que el torque que aporta cada paleta cambia de la misma forma en la que cambian las fuerzas, como consecuencia de que el torque y la fuerza son directamente proporcionales.

Figura 47. Torque en cada paleta.

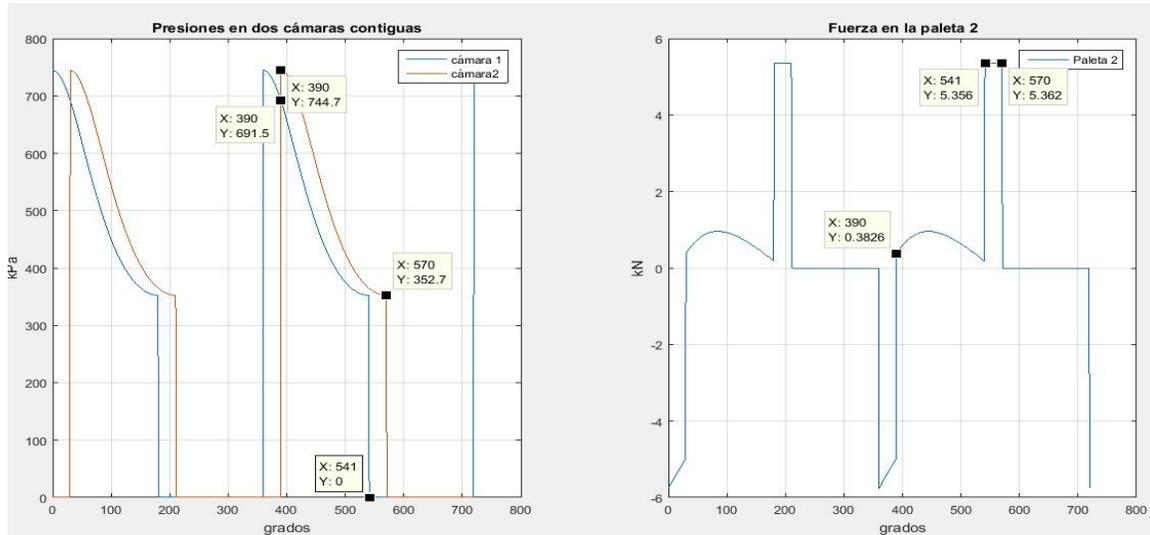


Fuente: Matlab® con programación y datos propios.

7.2.2.3 Presiones y fuerzas en solo dos cámaras/paletas

En consecuencia, para interpretar mejor el comportamiento de la presión y de fuerza en cada una de las cámaras y las paletas, se realiza una gráfica aparte en el Matlab® mostrada en la Figura 48.

Figura 48. Análisis de presiones en las cámaras 1 y 2 Vs fuerzas aplicadas en la paleta 2



Fuente: Matlab® con programación y datos propios.

En la Figura 48, se evidencia en el costado izquierdo, cómo es el comportamiento de la presión del vapor cuando la cámara 1 pasa por la lumbrera de admisión y como 30 grados después la cámara 2 inicia también a ganar volumen, generando así una pérdida de presión tanto en la cámara 1 como en la cámara 2.

En la imagen de la derecha, que la fuerza sobre la paleta 2 es negativa cuando solo existe vapor en la cámara 1 y gradualmente se vuelve positiva en la medida que se va llenando la cámara 2, alcanzando sus valores pico cuando la presión del vapor en la cámara 1 tiende a 0

Así mismo con esta Figura 48 se evidencia que en el momento de hacer una sumatoria total de las fuerzas aplicadas a todas las paletas tanto superiores como inferiores, esa fuerza es positiva y es la que genera el torque necesario para que el motor gire.

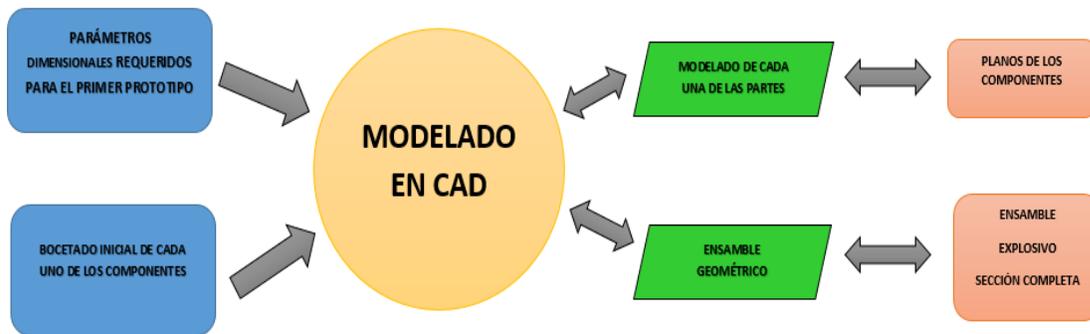
Entonces, con esta Figura 48 se valida que el modelo matemático y su solución computacional da un comportamiento físico del motor de expansión de vapor y también se usa para calcular la respuesta de torque entregado según unos parámetros específicos de operación.

7.3 FASE 3: MODELADO Y SIMULACIÓN CAD

En este capítulo se describe el proceso desarrollado en el acompañamiento al estudiante de tecnología, para diseñar y modelar en un software CAD el motor Radmax calculado en el capítulo anterior, garantizando que cada uno de sus componentes cumpla con las características y requerimientos generados a partir del modelo realizado. Dicho modelado es el objetivo principal de la tesis de grado del estudiante para optar al título de tecnólogo en mecánica automotriz.

Por otro lado, para que el proceso de modelado sea exitoso se debe seguir una secuencia lógica, que se muestra en la Figura.49

Figura 49. Proceso de modelado en CAD.



Fuente: Elaboración propia.

En la primera etapa de dicha secuencia se encuentra la entrada de datos que incluye los siguientes bloques:

- Lista de exigencias: son los requerimientos del prototipo a modelar generados a partir del software programado en la fase anterior.

- Datos de entrada: Corresponden a una serie de parámetros dimensionales y técnicos del motor junto con las características técnicas de los componentes adicionales a tener en cuenta para el ensamble del mismo, dentro de las cuales se encuentran ajustes, tolerancias, acabados superficiales, tipos de rodamientos a utilizar, entre otras

Luego con la información anterior, el estudiante genera un modelado en SolidWorks® que se divide en dos partes:

- Modelado de cada uno de los componentes del motor para entregar los planos de cada una de las piezas, acotados de acuerdo a las normas técnicas colombianas emitidas por el ICONTEC.[27]
- Ensamble del motor para entregar los planos en explosivo donde se evidencia la secuencia de armado de dicha máquina.

7.3.1 PARTES DEL PROTOTIPO

De acuerdo con la tipología seleccionada, el motor está compuesto por unas piezas que son clasificadas en: piezas completamente diseñadas y piezas estandarizadas, las cuales son seleccionadas de tal manera que se acoplen perfectamente a los modelos CAD sin intervenir en el óptimo funcionamiento del motor:

Las Piezas completamente diseñadas en SolidWorks® (Ver Anexo C) son:

- Rotor.
- Paletas.
- Levas.
- Empaques.
- Carcaza.
- Eje.

Y las piezas estandarizadas son:

- Rodamientos.
- Tornillos de sujeción.

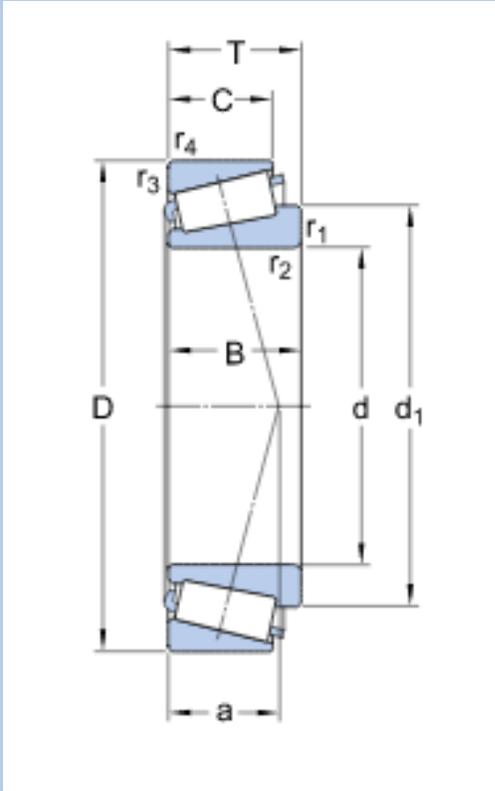
7.3.2 EXIGENCIAS PARA MODELADO CAD

Como la finalidad de la presente fase es dar información para poder realizar el modelado en SolidWorks®, se tuvieron en cuenta los marcos de referencia y las fases 1 y 2 del presente documento, para brindarle las siguientes recomendaciones al tecnólogo en formación:

- La leva superior e inferior son iguales enfrentadas la una con la otra y desfasadas radialmente 180°.
- Las levas tienen un perfil sinusoidal que posee una constante de amplitud C.
- La tubería empleada para la admisión y el escape es de ½ in con rosca NPT [110].
- La admisión y el escape deben ser ubicados de tal forma que el caudal de vapor generado en la planta térmica ingrese de forma perpendicular a cada una de las paletas.
- Se debe disminuir al máximo el coeficiente de rozamiento dentro de las cámaras entre la carcasa, rotor, paletas y ejes, asignando en cada uno de los componentes superficies con una rugosidad lo más pequeña posible [33].
- Los procesos de mecanizado a emplear en la fabricación deben garantizar las condiciones de rugosidad mínimos son el rectificado o el mecanizado por arranque de viruta en condiciones de súper acabado, es decir, que el límite de rugosidad sea de 0.025 µm.
- Como el motor debe resistir altas temperaturas es necesario aplicar a cada uno de los componentes una aleación de aluminio 7075 en el modelado CAD para la simulación [29].
- Para la unión de los diferentes componentes se utilizan espárragos M10 x 1,25x 160 mm de largo con tuerca y calidad grado 8.
- El material para el modelado y fabricación de los empaques es NEOPRENO. [111].
- Incluir en los planos entregados las siguientes tolerancias:

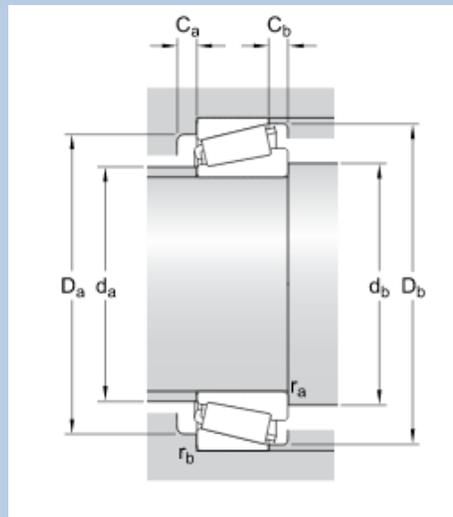
- De forma y posición, según lo requieran.
- Dimensionales lineales de ± 0.004 mm.
- Angulares de $\pm 0.004^\circ$.
- Seleccionar el rodamiento de rodillos cónicos, Ref. T7FC060 marca SKF (Ver Tabla 8), debido a que este tipo de rodamientos soportan cargas axiales y radiales del motor. Sin embargo, en el motor seleccionado no deben existir cargas axiales, pero en caso de que ocurra una desalineación o desbalanceo, dicho rodamiento evita que el motor se dañe.

Tabla 8. Dimensiones rodamiento SKF seleccionado.

SERIE	T7FC060-SKF
	
DIMENSIONES	
d	60 mm
D	125 mm

T	37 mm
d_1	97.2 mm
B	33.5 mm
C	26
$r_{1,2}$	Min 0.3 mm
$r_{3,4}$	Min 0.3 mm
a	40.982 mm

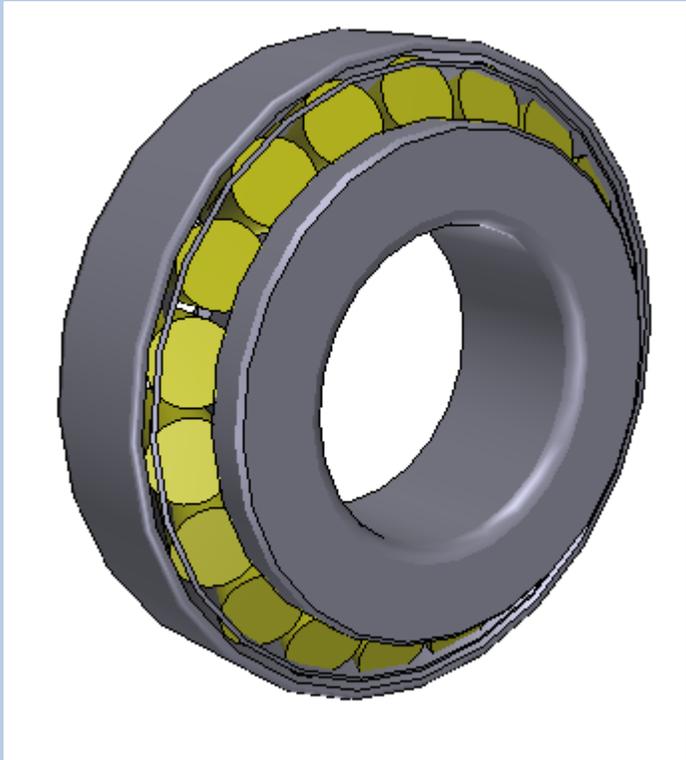
DIMENSIONES DE LOS RESALTES



d_a	Max 72 mm
d_b	Min 72.5 mm
D_a	Min 94 mm
D_a	Max 113.5 mm
D_b	Min 119 mm
C_a	Min 4 mm
C_b	Min 11 mm
R_a	Max 3 mm
R_b	Max 3 mm

DATOS DEL CALCULO

Capacidad de carga dinámica básica	190 KN
Capacidad de carga estática básica	204 KN

Carga límite de fatiga	24.5 KN
Velocidad de referencia	4000 RPM
Velocidad limite	5300 RPM
Factor de cálculo (e)	0.83
Factor de cálculo(Y)	0.72
Factor de cálculo(Y ₀)	0.4
MASA	
	
Rodamiento de masa	2.07 Kg

Fuente: Ficha técnica producto SKF. [85]

7.3.3 DATOS DIMENSIONALES DEL PROTOTIPO

Con el fin de iniciar con el bocetado y simulación del motor en el software SOLIDWORKS® fueron suministrados los bocetos y la Tabla 9 de datos que contemplan las dimensiones del prototipo del motor a diseñar.

Tabla 9. Dimensiones Prototipo Inicial.

DENOMINACIÓN	SIGNIFICADO	UNIDAD DE MEDIDA	VALOR
D	Diámetro mayor del rotor	mm	450,00
d	Diámetro del eje	mm	290,00
R	Radio mayor	mm	225,00
r	Radio menor	mm	145,00
C	Constante amplitud		1/20
	Distancia entre el eje de simetría y la superficie del rotor	mm	10,00
Z	Distancia entre el eje de simetría y el eje del perfil del rotor	mm	150,00
ρ	Densidad del aluminio	Kg/m ³	2,700
U	Altura total del cilindro	mm	300,00

Fuente: Elaboración propia

7.3.4 PLANOS DE PIEZAS DISEÑADAS

Para la presentación de los planos de cada uno de los componentes, ensambles y despieces el estudiante se guía de la norma técnica colombiana de acotado [41], con el fin de cumplir con los estándares nacionales.

Adicionalmente, dichos planos (Ver Anexo C) son la base para evaluar en la siguiente fase la viabilidad de fabricar este motor, con las máquinas instaladas en los laboratorios de mecanizado de la Universidad.

Luego, se construye un prototipado en CAD de cada uno de los componentes del motor, generando así un conjunto de diez (10) planos anexos al presente documento para que en futuras investigaciones se logre construir este prototipo modelado. Los diez (10) planos de cada una de las piezas generados y que se encuentran en el Anexo C son:

- Leva (Ver Figura 55)

- Paletas (Ver Figura 56)
- Rotor (Ver Figura 57)
- Carcaza (Ver Figura 58)
- Tapa carcaza (Ver Figura 59)
- Sello carcaza (Ver Figura 60)
- Empaque lateral (Ver Figura 61)
- Empaque superior (Ver Figura 62)
- Empaque inferior (Ver Figura 63)
- Eje (Ver Figura 64)

Por otro lado, para un mejor entendimiento del ensamble del motor se incluyen también en el Anexo C los siguientes planos:

- Un plano en explosivo (Ver Figura 53)
- Un plano del motor ensamblado (Ver Figura 54)
- Un plano de una sección completa del motor ensamblado, para identificar cada una de las piezas internas acopladas (Ver Figura 52)

7.4 FASE 4: VIABILIDAD PARA LA FABRICACIÓN

En la presente fase se presenta el estudio de viabilidad para fabricar el primer prototipo de un motor Radmax que opera bajo las condiciones del vapor entregado por la planta térmica de la Universidad ECCI.

7.4.1 SITUACIÓN ACTUAL PARA FABRICACIÓN DEL PROTOTIPO CON LAS MÁQUINAS DE LA ECCI

Actualmente la Universidad cuenta con unas máquinas convencionales ubicadas en el laboratorio de mecanizados e identificadas como se muestra en las Tabla10. (Si se desea consultar más información técnica de los equipos remitirse a la página del fabricante de las maquinas llamado VEDIAL).

Tabla 10. Inventario maquinas ECCI.

MAQUINA	Referencias	Marca
Tornos paralelos	CM6241	VEDIAL
Fresadoras Universales	ZX6350ZB	VEDIAL
Taladros de columna	TALADRO INDUSTRIAL	VEDIAL
Taladros fresadores	mb4p – mb4pv	VEDIAL
Centro de mecanizado	V-30	Leadwell

Fuente: Elaboración propia.

Sin embargo, después de revisar las características dimensionales y de operación de las maquinas mencionadas en la Tabla 18, se determina que no es posible realizar el premeconizado de todas las partes del motor debido a que las máquinas existentes son para fines académicos y no brindan los recorridos necesarios

para la sujeción del material ni para el proceso de mecanizado a realizar. Por lo anterior, es necesario contar con maquinaria convencional más robusta y de tecnología más avanzada. Por ejemplo, la fabricación de las levas con la maquinaria existente es imposible de realizar debido a la complejidad de la forma y al tamaño de las mismas.

Por otro lado, las piezas de fabricación más sencilla y de menor tamaño (paletas, tornillos, empaques, entre otras) se podrían fabricar en la Universidad. No obstante, es recomendable realizar la fabricación de todas las piezas en un mismo lugar para garantizar un ensamble final óptimo.

En consecuencia, se recomienda realizar el premecanizado con una institución o empresa que sí tenga la maquinaria idónea.

A pesar de lo anterior, sí es posible realizar el mecanizado final de cada uno de los componentes del motor diseñado en las máquinas de Control Numérico Computarizado (C.N.C.) de la Universidad, debido a los recorridos en cada uno de los ejes y las condiciones de rugosidad generadas, siempre y cuando se tengan en cuenta las siguientes recomendaciones:

- Para garantizar un buen mecanizado de las partes del motor, es necesario hacer un estudio detallado de las herramientas de corte y de las condiciones de operación de la máquina en el proceso, debido a que estas características son indispensables para obtener las condiciones de rugosidad y de acabado superficial que requieren todas las piezas del motor.
- Luego de tener todos los componentes del motor fabricados, es necesario garantizar el sellado de cada uno de los componentes en el momento de ensamblar el motor porque si algún elemento queda desajustado, se presentarían pérdidas por fugas. Para garantizar dicho sellado se recomienda hacer una selección detallada del material de los empaques y del proceso de lubricación de los componentes del motor en operación.

Por último, para la fabricación es necesario tener en cuenta las recomendaciones del numeral 7.3 que corresponde al desarrollo de la fase 3 del presente proyecto.

7.4.2 PROCESO DE FABRICACIÓN GENERALIZADO

Teniendo en cuenta lo explicado en el numeral anterior (7.4.1) se sugiere seguir el procedimiento establecido a continuación:

1. Seleccionar el proveedor adecuado que garantice las propiedades químicas y físicas del duraluminio.
2. En caso de que el numeral 1 no sea posible, se deben generar los moldes para mandar a fundir el material, garantizando un excedente de aproximadamente el 30% para los montajes necesarios en los procesos de mecanizado.
3. Seleccionar el proveedor que haga la fundición y que garantice las propiedades físicas y químicas de la aleación para generar el material en bruto de cada una de las piezas del motor. Adicional a esto se debe garantizar la mínima porosidad en cada uno de los elementos que se fundan para evitar fugas al interior del motor.
4. Realizar un proceso de premeconizado de cada uno de los componentes en maquinaria convencional disminuyendo el exceso de material de un 30% a un 5%.
5. Seleccionar insertos para trabajar en el centro de mecanizado respecto a la rugosidad requerida en cada uno de los componentes del motor.
6. Seleccionar las condiciones de corte que garanticen el acabado superficial requerido.
7. Seleccionar el refrigerante a emplear durante el mecanizado.
8. Garantizar perpendicularidades, paralelismos y concentricidades en los montajes realizados en el centro de mecanizado.
9. Generar el modelado y la simulación en un software CAM, con el fin de encontrar fallas imprevistas en el proceso de mecanizado antes de ejecutarlo en un contexto real.
10. Corregir fallas encontradas en la simulación.
11. Generar el lenguaje de programación ISO y las hojas de proceso para fabricar cada una de las piezas del motor.
12. Mecanizar las piezas del motor.
13. Controlar constantemente las características dimensionales de las piezas respecto a los planos.

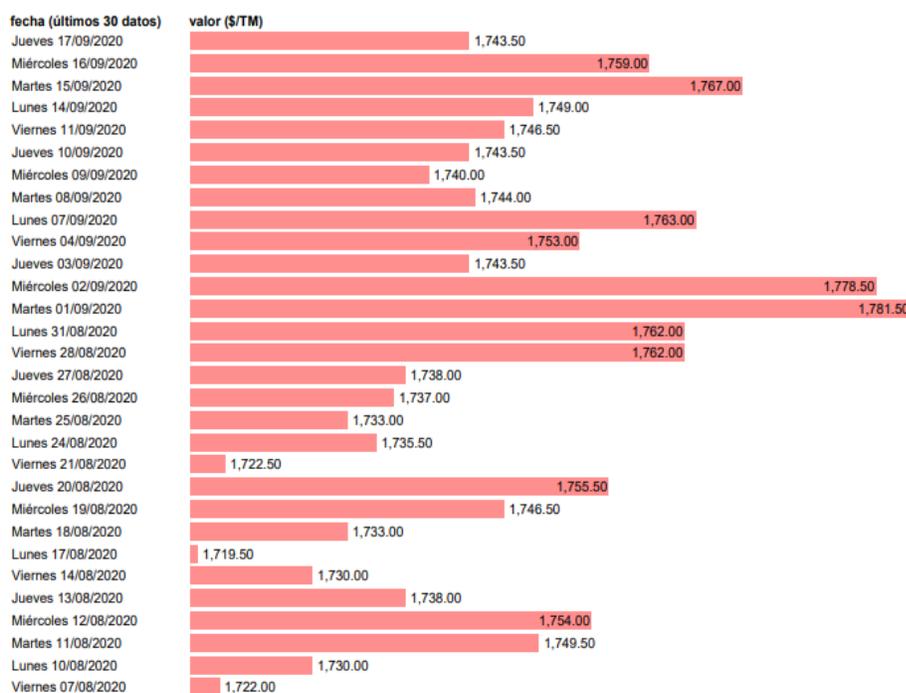
14. Seleccionar los accesorios estandarizados de ensamble como rodamientos, tornillos y empaques.
15. Ensamblar el motor.

7.4.3 COSTOS DE FABRICACIÓN

Inicialmente se toma el valor de la masa del ensamble que entrega el informe del modelo en CAD del prototipo del motor generado en SolidWorks®, el cual es de 195,615 Kg.

Adicionalmente, de acuerdo con precio por kilogramo de aluminio en la bolsa, tomado el 19 de septiembre del 2020[86] se determina que el costo es de 1,4735 dólares / Kg, como se muestra en la Figura 50. Por lo tanto, el precio por kilogramo de aluminio en pesos colombianos, es de COP\$6.495 usando una TRM de COP\$3.725,37 [87] (TRM del 19 de septiembre del 2020).

Figura 50. Precio de aluminio en dólares por tonelada.



Fuente: Indicadores económicos Internacionales [86]

En consecuencia, en la Tabla 11 se estima un costo aproximado del material para la fabricación del motor Radmax de la siguiente manera:

Tabla 11. Costo aproximado materiales.

ÍTEM	MASA MOTOR (Kg)	30% DE INCREMENTO PARA MECANIZADO	MASA TOTAL (Kg)	PRECIO POR KILOGRAMO DE ALUMINIO	PRECIO
1	195.6152	58.68	254.293	COP\$6495.18	COP\$1.651.679
SUBTOTAL					COP\$1.651.679
IVA 19%					COP\$ 313.819
TOTAL					COP\$1.965.498

Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, se estima un tiempo aproximado de 3 semanas para la fabricación de todos los elementos del motor, trabajando 2 personas en turnos de 8 horas de lunes a viernes, con un salario de COP\$2.000.000 mensual más prestaciones sociales, lo que implica el siguiente gasto por mano de obra (Ver Tabla 12):

Tabla 12. Costo aproximado mano de obra.

CANTIDAD DE PERSONAS	SALARIO MENSUAL POR PERSONA	SALARIO POR HORA POR PERSONA	HORAS LABORADAS POR PERSONA	SALARIO POR PERSONA	SUBTOTAL MANO DE OBRA
2	COP\$2.000.000	COP\$8.333	120	COP\$999.960	COP\$1.999.920
CARGA PRESTACIONAL 60%					COP\$1.199.952
TOTAL MANO DE OBRA					COP\$3.199.872

Fuente: Elaboración propia.

De otro modo, el costo por hora de una máquina convencional de mecanizado es aproximadamente COP\$45.000 y de una máquina de control numérico computarizado COP\$70.000. Así, para determinar los costos de maquinaria, se plantea un proceso de mecanizado total de 120 horas las cuales serían distribuidas de la siguiente manera, 30 horas de torno convencional, 30 horas de fresadora convencional ambas para generar el premecanizado de las piezas y 60 horas de C.N.C para generar el acabado final de cada una de las piezas que componen el motor. Es decir que los costos aproximados por maquinaria se encuentran discriminados en la Tabla 13 así:

Tabla 13. Costo aproximado maquinaria y equipos.

MAQUINA	VALOR HORA MAQUINA	HORAS POR MAQUINA	SUBTOTAL MAQUINA
TORNO	COP\$45.000	30	COP\$1.350.000
FRESADORA	COP\$45.000	30	COP\$1.350.000
CENTRO DE MECANIZADO	COP\$70.000	60	COP\$4.200.000
SUBTOTAL MAQUINAS			COP\$6.900.000
IVA 19%			COP\$1.311.000
TOTAL MAQUINAS			COP\$8.211.000

Fuente: Elaboración propia.

Adicionalmente, es necesario contar aproximadamente con un 10% del subtotal global (suma de los totales de las Tablas 11, 12 y 13), que será utilizado en el momento de ensamblar el motor, para la adquisición de tornillería empaques y demás elementos que se requieran.

En resumen, en la Tabla 14 se contempla que para la fabricación se debe tener un presupuesto estimado de COP \$15.800.000 aproximadamente incluyendo costos de materiales, mano de obra, maquinaria equipos, puesta en marcha, pruebas imprevistos, administración, supervisión y parafiscales.

Tabla 14. Presupuesto estimado.

DESCRIPCIÓN	TOTAL POR ÍTEM
MATERIALES	COP\$1.965.498
MANO DE OBRA	COP\$3.199.872
MAQUINARIA	COP\$8.211.000
SUBTOTAL	COP\$13.376.370
ADICIONALES DE ENSAMBLE 10%	COP\$1.337.637
ADMINISTRACIÓN Y SUPERVISIÓN 3%	COP\$401.291
PRUEBAS Y PUESTA A PUNTO 5%	COP\$668.818
TOTAL	COP\$15.784.116

Fuente: Elaboración propia.

7.4.4 VALOR AGREGADO DE LLEVAR A CABO LA FABRICACIÓN DEL DISEÑO PROPUESTO

La fabricación y puesta en marcha del motor diseñado en este proyecto de investigación presenta los siguientes valores agregados:

1. La tipología de motores Radmax ha sido desarrollada en Canadá para un motor de combustión interna por la cual, si este dispositivo es fabricado para que funcione por expansión volumétrica, sería una aplicación que aporte al estudio de este tipo de motores.
2. Los estudiantes de la Universidad tendrían la posibilidad de realizar prácticas en la planta térmica con otro tipo de máquinas térmicas generando energía en forma de trabajo y no únicamente a través de la turbina como se realiza actualmente.
3. Posibilidad de generar nuevos proyectos de investigación en diferentes programas de pregrado, especializaciones, maestrías y futuros doctorados de la Universidad con el fin de fortalecer la investigación en la misma.

8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1 CONCLUSIONES

- Para caracterizar el proceso de funcionamiento de la planta térmica ECCI-1 se realizó una práctica en dicha planta para verificar el valor de presión en cada uno de los puntos posibles de ubicación del motor (posterior a la caldera, salida libre del distribuidor, y luego del sobrecalentador). Se aplicó la matriz de Pugh para seleccionar el motor que se modifica y funciona por expansión de vapor. Posteriormente, se realizó un DOE para determinar el mejor punto de ubicación de dicho motor seleccionado. En consecuencia, el motor RADMAX fue el motor de mayor viabilidad para ser diseñado. Así mismo, el mejor punto de ubicación fue el que se localizó en una de las salidas libres del distribuidor, debido a que en este punto es donde se logra garantizar una presión constante del vapor de agua, sin importar los ciclos de la caldera. Esta ubicación no requiere mayores modificaciones en la planta térmica. Adicionalmente, es importante tener en cuenta que en el momento que se realizaron las prácticas algunos datos fueron calculados, o sugeridos por el mal funcionamiento y la falta de mantenimiento que presentaba la planta, por lo tanto en el momento de poner a prueba el modelo generado en la presente investigación.
- Se desarrolló una herramienta computacional que muestra el comportamiento de las variables de salida del motor (torque entregado, aceleración angular, velocidad angular y potencia entregada). Se consideró al vapor suministrado por la planta como un gas ideal, ubicando las lumbreras de admisión y escape en el punto máximo y mínimo del perfil sinusoidal de la leva (debido a que en esos puntos es donde se obtienen los volúmenes máximos y mínimos respectivamente). Razón por la cual, se utilizó la ley de Boyle para describir el comportamiento del vapor al interior del motor. Por otro lado, se generó una ecuación dinámica (Ecuación 40) que describe la relación proporcional entre las

fuerzas que aportan y las que se oponen al giro del motor con la aceleración angular, teniendo como constante de proporcionalidad el momento de inercia de dicho motor. Este modelo, soluciona mediante el método matemático de Runge-Kutta implementado en Matlab®. En consecuencia, con la ejecución de esta fase se hace entrega de una herramienta computacional que resuelve el modelo matemático para el funcionamiento dinámico de un motor.

- A partir de los datos obtenidos en la herramienta computacional, se construyó un prototipado en SolidWorks® de cada uno de los componentes del motor, de tal manera que con la ejecución de esta fase se hace entrega de un conjunto de trece (13) planos anexos al presente documento, que son la base para evaluar la viabilidad de fabricar este motor con las maquinas instaladas en los laboratorios de mecanizado de la Universidad.
- Se tuvieron en cuenta materiales, mano de obra, alquileres de maquinaria y adicionales para ensamble final, con el fin de evaluar la viabilidad de fabricación del modelo generado con las máquinas herramientas instaladas en el laboratorio de mecanizado convencional y de control numérico computarizado de la sede P y K respectivamente de la Universidad ECCI. Se estimó un costo de COP\$15.800.000 aproximadamente.

8.2 RECOMENDACIONES

En este apartado se presentan una serie de aspectos que se podrían tener en cuenta para emprender en un futuro nuevas investigaciones similares a esta, para fortalecerla o para aplicar los resultados de la presente a nivel académico.

Las recomendaciones son:

1. Para profundizar en el estudio de este tipo de motores acoplados a plantas térmicas similares a la de la Universidad, se pueden realizar los siguientes proyectos:
 - Fabricar un prototipo físico.
 - Generar un proceso detallado para la fabricación en máquinas convencionales y de C.N.C.

- Realizar un análisis por elementos finitos del motor en funcionamiento.
 - Elaborar un listado de modificaciones y accesorios en la planta térmica para acoplar el motor diseñado.
 - Construir una interfaz gráfica de usuario para el software desarrollado en Matlab®.
 - Desarrollar cálculos de variables termodinámicas al interior del motor en funcionamiento.
 - Es necesario realizar una práctica en la planta en óptimas condiciones con el fin de ir contrarrestando la información calculada contra los datos reales con la planta en óptimas condiciones.
2. Para futuras investigaciones se pueden tener en cuenta modelos termodinámicos diferentes con el fin de determinar un comportamiento más cercano a la realidad del fluido a estudiar (vapor), tales como:
 - Ecuación Virial.
 - Ecuación de Van der Waals.
 - Ecuación de Redlich-Kwong.
 - Ecuación de Berthelot.
 - Ecuación del Factor de Compresibilidad.
 3. Se puede incluir un método de optimización en acoplamiento con el modelo computacional gestado en esta tesis para poder obtener la respuesta dimensional más adecuada según las restricciones del diseño.
 4. Se recomienda aumentar la frecuencia del perfil sinusoidal en la leva con el fin de aprovechar al máximo el giro del motor.
 5. La rugosidad en el acabado de cada una de las piezas debe ser de $0.025 \mu\text{m}$, con el fin de reducir al máximo el coeficiente de rozamiento entre la carcasa, el rotor, las paletas y el eje.
 6. Se deben usar rodamientos de rodillos cónicos con el fin de proteger el motor en el momento que se generen cargas axiales por desalineación o desbalanceo.
 7. El pre mecanizado de todas las piezas del motor no se pueden realizar con las máquinas convencionales de la universidad, debido a que estas máquinas son

para uso académico y para construir el motor se requieren maquinas con mejores características técnicas y una mejor tecnología. No obstante, el acabado de todas las piezas sí se puede realizar en el centro de mecanizado de la universidad.

9 ANEXOS

ANEXO A. PROTOCOLO PLANTA TÉRMICA.

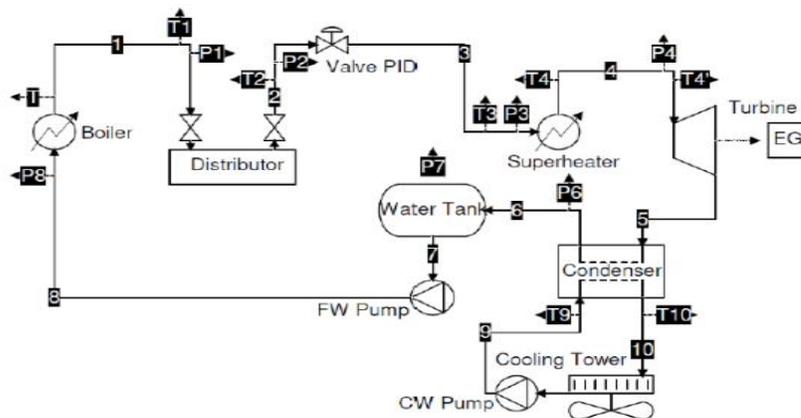
El protocolo [8] al que se hace referencia en apartados anteriores describe el paso a paso del qué hacer durante cada practica para que la información se acerque lo más posible a la realidad y es el siguiente:

Parámetros de operación

En primera instancia se determinan todos los parámetros a medir durante la operación de la planta térmica [72] , las variables medidas por el PLC (Controlador lógico programable) [73] y las variables medidas por la instrumentación análoga [74] teniendo en cuenta la Figura 30.

Protocolo de puesta en marcha de la planta térmica

Figura 51. Instrumentación análoga en la planta.



Fuente: Protocolo practicas planta térmica ECCI-1 Ingeniero Daniel Gómez.[8]

A continuación, se describe el paso a paso para poner en marcha la planta térmica teniendo en cuenta la Figura 51 que muestra la ubicación de cada uno de los componentes en la planta térmica de la universidad suministrada por el fabricante de la planta que es la empresa INGENIUM S.A.[12] (Ver Figuras 21 y 22).

- ✓ Verificar que el tanque predosificador de combustible tenga mínimo 6 litros.
- ✓ Si no lo tiene, abrir válvula de suministro de combustible en el tanque de Diésel
- ✓ Una vez alcance el volumen requerido para la puesta a punto, cerrar válvula de admisión.
- ✓ Verificar el nivel de agua en el tanque de condensados.
- ✓ Si NO hay suficiente nivel, abrir la válvula del acueducto, y abrir las válvulas de entrada al tanque.
- ✓ Alimentar la línea de aire comprimido para la Válvula PID.
- ✓ Verificar que la presión de operación de la caldera esté ajustada dentro del rango 100-120 psig.
- ✓ Comprobar que las válvulas de entrada y salida del distribuidor estén cerradas.
- ✓ Verificar que la válvula de purga en la caldera esté totalmente cerrada.
- ✓ Hacer lo mismo con las válvulas de purga situadas en puntos estratégicos de la planta.
- ✓ Verificar que la válvula de admisión de agua de alimentación a la caldera esté completamente abierta.
- ✓ Hacer lo mismo con la válvula de descarga del tanque predosificador de combustible.
- ✓ Dar energía al panel eléctrico de la planta.
- ✓ Si los breakers del tablero están abajo, subir los de los siguientes componentes: Torre, sobre calentador (si se va a usar), intercambiadores (si se van a usar), fuente de 110V y caldera.
- ✓ Oprimir botón de encendido de la planta en el tablero principal.
- ✓ En el tablero de la caldera, girar interruptor del quemador y bomba en AUTOMÁTICO. El quemador se encenderá.
- ✓ Si no hay suficiente nivel de agua en la caldera, la bomba también lo hará.
- ✓ Si la práctica incluye sobre calentador, abrir el tablero y graduar el termostato a 200°C. luego ENCENDER.

- ✓ Una vez la caldera alcance los 30 psig, hacer una purga de agua hasta que la bomba se encienda automáticamente.
- ✓ Una vez alcance los 60 psig, abrimos la válvula de descarga lentamente para dejar ir vapor y así caliente las tuberías. Lo hacemos por 1 minuto. Luego cerrar la válvula.
- ✓ Cuando alcance la presión de operación, el quemador se apagará automáticamente. FIN de la puesta a punto.
- ✓ Verificar el nivel del tanque predosificador. LLENAR nuevamente.
- ✓ Abrir en su totalidad la válvula de descarga de vapor.
- ✓ Abrir lentamente la válvula de admisión al distribuidor de vapor.
- ✓ Abrir lentamente la válvula de descarga que da hacia la generación de potencia.
- ✓ En la Válvula PID, verificar en el costado derecho que la presión de la línea de aire comprimido esté entre 30-40 psi.
- ✓ Si no alcanza dicha presión, dar la orden al encargado del laboratorio para que eleve la presión del compresor.
- ✓ En el tablero de la torre de enfriamiento, ENCENDER. Se escucha que el ventilador y bomba entran en operación.
- ✓ En el tablero principal, oprimir el botón de la turbina, y ajustar a 1500 rpm el set point.
- ✓ Revisar que el pistoncillo de la válvula PID empiece a oscilar (movimiento vertical en vaivén).
- ✓ Si no logra ajustar las RPM, verificar nuevamente la presión de la línea de aire comprimido.
- ✓ Si sigue sin ajustar, como última opción hacer palanca en el pistoncillo de la válvula PID, para vencer su inercia.
- ✓ Donde ajustamos las RPM de la turbina, oprimimos la opción "GRÁFICA", para ver el diagrama de control Set Point Vs. Tiempo.
- ✓ Esperamos hasta que estabilice la velocidad de la turbina. En la gráfica debe verse una línea amarilla horizontal con leves fluctuaciones, igualando la línea verde del Set Point.
- ✓ Repetir el proceso para 3000, 4500 y 6000rpm.

- ✓ Una vez estabilice a 6000rpm (revoluciones de operación para obtener 3600rpm en el generador eléctrico), en el banco de carga (bombillos), encender 1 bombillo (200 W) en la primera columna de izquierda a derecha. Se escucha como la turbina baja sus revoluciones.
- ✓ Después de que estabilice nuevamente a 6000 rpm, en el tablero principal podemos observar a la izquierda, el voltaje, intensidad y frecuencia de generación de energía eléctrica.
- ✓ Si la frecuencia es mayor o igual a los 60 Hz. Nos indica que podemos seguir generando.
- ✓ Si la frecuencia es menor a los 60 Hz, revisar las rpm del generador. Si estas se encuentran por debajo de las 3600 rpm, es porque las rpm de la turbina también se cayeron. CAUSA: ausencia de vapor en la línea y/o baja presión. SOLUCIÓN: Esperar a que la caldera alcance la presión de operación.
- ✓ Si al llegar a la carga 5 (5 x 200 W C/U = 1 kW de potencia nominal) la frecuencia sigue estable, nos indica que esta será la condición de carga para realizar el protocolo de pruebas.
- ✓ Si la frecuencia no se estabiliza, disminuir una carga y realizar el protocolo de pruebas a esta condición.
- ✓ Cuando el quemador esté cerca de apagarse, llenar nuevamente el predosificador de combustible.

Protocolo de pruebas

A continuación se describe el protocolo de pruebas que debe seguirse en cada una de las practicas teniendo en cuenta que la carga eléctrica requerida en la planta debe ser constante, no aumentar ni disminuir hasta que se haya cumplido por completo el protocolo de pruebas. Para el desarrollo de este protocolo se mencionan dos ciclos.[8]

- El ciclo de vapor:

Se habla de ciclo de vapor cuando se hace referencia a las variables monitoreadas en los componentes principales de la planta, es decir desde el distribuidor hasta antes de la turbina.

- Ciclo de caldera:

Cuando se hace referencia al ciclo de la caldera se habla de las variables correspondientes al encendido o apagado de la caldera, es decir desde el suministro de combustible diésel hasta la salida de la caldera.

Habiendo quedado claro los ciclos de vapor y de caldera el protocolo en cada uno de estos ciclos es:

- *Ciclo de vapor (tablero principal):*
 - ✓ Registrar temperatura ambiente del recinto.
 - ✓ Sincronizar cronómetros desde 0.
 - ✓ Una persona da la señal cuando se apague (OFF) el quemador. Iniciar cronómetros.
 - ✓ Deben estar sincronizados.
 - ✓ Registrar los parámetros monitoreados en el tablero principal.
 - ✓ Dar señal cuando se encienda (ON) el quemador, tomar el tiempo transcurrido.
 - ✓ Registrar los parámetros monitoreados en el tablero principal.
 - ✓ Dar señal cuando se apague (OFF) el quemador, tomar el tiempo transcurrido.
 - ✓ Registrar los parámetros monitoreados en el tablero principal.
 - ✓ Repetir los ciclos durante 1 hora seguida.

NOTA: Si la práctica es con sobrecalentamiento de vapor, abrir el tablero del sobrecalentador eléctrico, y con pinza amperimétrica, registrar el voltaje y la intensidad en cada una de las fases.

- *Ciclo de caldera (análogo):*
 - ✓ Sincronizar cronómetros desde 0.
 - ✓ Una persona da la señal cuando se apague (OFF) el quemador. Iniciar cronómetros. Deben estar sincronizados.
 - ✓ Registrar volumen de combustible que queda en el predosificador.
 - ✓ Dar señal cuando se encienda (ON) el quemador, tomar el tiempo transcurrido.

- ✓ Registrar volumen de combustible inicial (debe ser el mismo que la lectura anterior).
- ✓ Dar señal cuando se apague (OFF) el quemador, tomar el tiempo transcurrido.
- ✓ Registrar volumen de combustible final.
- ✓ Repetir los ciclos durante 1 hora seguida.

NOTA: No dejar que el volumen del combustible sea menor o igual a los 3 litros (el aforo del predosificador tiene un error).

- *Ciclo de vapor (instrumentación análoga):*

Tal como se observa en la Figura 49 que muestra la ubicación de la instrumentación análoga colocada en algunos puntos estratégicos de la planta:

- ✓ Sincronizar cronómetros desde 0.
- ✓ Una persona da la señal cuando se apague (OFF) el quemador. Iniciar cronómetros. Deben estar sincronizados.
- ✓ Registrar lecturas de la instrumentación.
- ✓ Dar señal cuando se encienda (ON) el quemador, tomar el tiempo transcurrido.
- ✓ Registrar lecturas de la instrumentación.
- ✓ Dar señal cuando se apague (OFF) el quemador, tomar el tiempo transcurrido.
- ✓ Registrar lecturas de la instrumentación.
- ✓ Repetir los ciclos durante 1 hora seguida.

NOTA: Los instrumentos P6, P7, P8, T9 y T10, NO se han instalado en la planta, por el momento.

- ✓ Si la práctica es con sobrecalentamiento de vapor, abrir el tablero del sobrecalentador eléctrico, y con pinza amperimétrica, registrar el voltaje y la intensidad en cada una de las fases.
- ✓ Tener en cuenta que, con la instrumentación análoga instalada, NO hay manera de conocer el flujo másico de vapor en la línea, ni el caudal de agua de enfriamiento que circula por el condensador.

- *Aumentar carga (bombillo 6 y superiores)*
 - ✓ Si la frecuencia se estabiliza (condición de carga actual ESTABLE), seguir con el protocolo de pruebas.
 - ✓ Repetir el protocolo de pruebas para cargas superiores.
 - ✓ Si la frecuencia NO estabiliza (condición de carga actual INESTABLE), realizar el protocolo de pruebas y anotar la observación.
 - ✓ NO aumentar la carga si la condición de carga actual es INESTABLE.

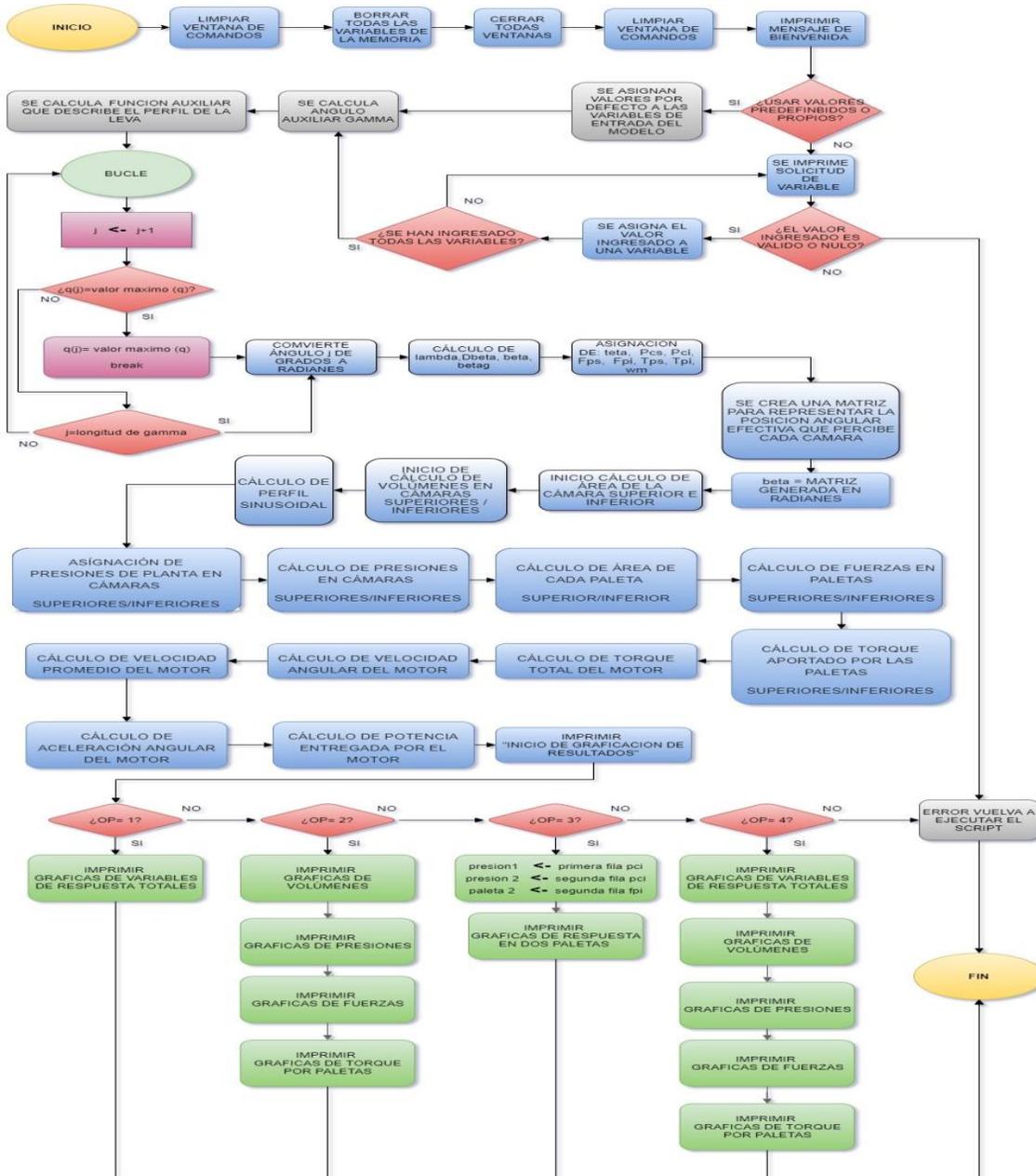
Posteriormente, para la recolección de información son usadas unas plantillas generadas [71] que tienen el propósito de estandarizar el proceso de cada practica y cumplir con el protocolo mencionado para que los datos recolectados estén organizados y sean confiables. Estas plantillas serán mostradas en el desarrollo del siguiente numeral.

Así, la información recolectada en el presente documento corresponde a las prácticas realizadas en el 2017 [71] cumpliendo al 100% el protocolo establecido, las cuales sirven para que más adelante sean tomadas como referencia para la caracterización y el DOE [88] que determinen la mejor ubicación del motor.

ANEXO B. PROGRAMACIÓN EN MATLAB

El código de programación empleado para generar la herramienta computacional se representa a través del siguiente diagrama de flujo:

Figura 52. Diagrama de flujo del código



Fuente: Elaboración propia

Y el código de programación en Matlab® es:

MODELAMIENTO DE UN MOTOR DE VAPOR DE EXPANSIÓN VOLUMÉTRICA

UNIVERSIDAD ECCI

AUTOR: ALCIDES LOPEZ CAMELO

VERSIÓN: 2.2 - 2020/12/02

REVISIÓN: 1.1

CONSIDERACIONES DEL PROGRAMA:

Debido a que el motor se compone de varias cámaras (inferiores y superiores) y varias paletas para las cuales se calculan volumen, presión y fuerza, respecto a un ángulo, se optó por almacenar esos datos en matrices. Así pues, el número de filas de las variables mencionadas representa el número de paletas/cámara y las columnas son el ángulo en el que se hizo el cálculo. Adicionalmente el ángulo de referencia de cálculo "beta" inicia en $\ln 1$, puesto que es el punto de la primera inyección de la cámara inferior, pero el ángulo de referencia para graficar "betag" es el giro del motor. Por ejemplo, si quiero saber qué valor de volumen tiene la cámara superior No. 2 en el ángulo 45, debería mirar la variable en el índice de fila 2(cámara 2) y el índice de columna $135(90^\circ+45^\circ)$, es decir $V_{cs}(2,135)$

```
clc
```

```
clear all
```

```
close all
```

```
disp('BIENVENIDO AL SOFTWARE DE MODELAMIENTO DE UN MOTOR RADMAX POR  
EXPANSION VOLUMÉTRICA')
```

```
op = input('Para iniciar seleccione 1 si quiere usar valores predefinidos o 2 para usar sus  
propios valores\n');
```

```
switch op
```

```
case 1
```

```
    Ngra = 720; %Giro en grados del motor que se va a analizar
```

```
    f = 1; %frecuencia del perfil sinusoidal
```

```
    Nrad = deg2rad(Ngra); %Giro en radianes del motor que se va a analizar
```

```
    Npal = 12; %cantidad de paletas que tiene el motor. Debe ser entero
```

```
    R = 0.225; %Radio externo del rotor en metros
```

```
    r = 0.145; %Radio interno del rotor en metros
```

```
    Rr = R - r; %diferencia de radios
```

```
    z = 0.150; %distancia entre el eje del rotor y el eje del perfil sinusoidal
```

```
    h0 = 0.01; %medio espesor del rotor
```

```
    hz = z - h0; %altura promedio de la cámara
```

```
    C = 0.05; %Amplitud de la forma sinusoidal de la leva
```

```
    Ppt = 744.66; %presión de entrada planta térmica en kilopascales
```

```
    lcm = 0.015; %momento de inercia del motor en kg*m^2
```

```
    B = 0.05; %Constante de amortiguamiento.
```

```
    fprintf('Giro en grados del motor: %d\n',Ngra)
```

```
    fprintf('Frecuencia del perfil sinusoidal: %d\n', f)
```

```
    fprintf('Número de paletas: %d\n',Npal)
```

```
    fprintf('Radio externo del motor (m): %3.4f\n',R)
```

```
    fprintf('Radio interno del motor (m): %3.4f\n', r)
```

```
    fprintf('Distancia entre el eje del motor y el eje del perfil sinusoidal (m): %3.4f\n',z)
```

```
    fprintf('Medio espesor del rotor (m): %3.4f\n',h0)
```

```
    fprintf('Amplitud de la forma sinusoidal del la leva: %3.3f\n',C)
```

```
    fprintf('Presión de la planta(kPa): %6.2f\n',Ppt)
```

```
    fprintf('Momento de Inercia (kg*m^2): %6.4f\n',lcm)
```

```

fprintf('Constante de amortiguación: %1.3f\n',B)

otherwise

Ngra = input('Ingrese Giro en grados del motor que se va a analizar\n');
f = input('Ingrese frecuencia del perfil sinusoidal\n');
Nrad = degtorad(Ngra); %Giro en radianes del motor que se va a analizar
Npal = input('Ingrese cantidad de paletas que tiene el motor. Debe ser entero\n');
R = input('Ingrese Radio externo del rotor en metros\n');
r = input('Ingrese Radio interno del rotor en metros\n');
Rr = R - r; %diferencia de radios
z = input('Ingrese distancia entre el eje del rotor y el eje del perfil sinusoidal\n');
h0 = input('Ingrese medio espesor del rotor en metros\n');
hz = z - h0; %altura promedio de la cámara
C = input('Ingrese Amplitud de la forma sinusoidal de la leva\n');
Ppt = input('Ingrese presión de entrada planta térmica en kilopascales\n');
lcm = input('Ingrese momento de inercia del motor en kg*m^2\n');
B = input('Constante de amortiguación\n');

end

gamma = 0:(2*pi/360):2*pi; %variable de ángulo auxiliar para calcular la posición de la
primera inyección

q = C*sin(f*gamma); %función auxiliar que describe el perfil de la leva para calcular la
posición de la primera inyección

for j = 1 : length(gamma) %rutina para encontrar la posición angular del valor máximo de
la función sinusoidal

    if q(j) == max(q)

```

break %comando para detener la ejecución del for cuando se encuentra el valor máximo de q

else

end

end

j = j-1; %valor de la posición angular del valor máximo de la función q

In1 = degtorad(j); %convierte el ángulo donde se encuentra la primera inyección de grados a radianes

lambda = 360/Npal; %ángulo de separación entre cada paleta en grados

Dbeta = 2*pi/360; %diferencia de entre ángulo y ángulo, en este caso equivale a un grado.

beta = In1 : Dbeta : (Nrad + In1); %áintervalo que va desde la admisión inicial hasta la posición final + el desfase entre el 0 y la posición inicial, con una resolución Dbeta.

betag = 0:Ngra; %Matriz de 1 x Ngra para graficar en grados e indicar el giro del motor.

%definición de variables

teta = zeros(Npal,length(beta)); %variable auxiliar para calcular la posición angular para cada cámara/paleta

Pcs = zeros(Npal,length(beta)); %Matriz de Npal x length(beta) llena de ceros para almacenar presiones de cámaras superiores

Pci = zeros(Npal,length(beta)); %Matriz de Npal x length(beta) llena de ceros para almacenar presiones de cámaras inferiores

Fps = zeros(Npal,length(beta)); %Matriz de Npal x length(beta) llena de ceros para almacenar Fuerzas de cámaras superiores

Fpi = zeros(Npal,length(beta)); %Matriz de Npal x length(beta) llena de ceros para almacenar Fuerzas de cámaras inferiores

Tps = zeros(Npal,length(beta)); %Matriz de Npal x length(beta) llena de ceros para almacenar torque de paletas superiores

Tpi = zeros(Npal,length(beta)); %Matriz de Npal x length(beta) llena de ceros para almacenar torque de paletas inferiores

```
wm = zeros(1,length(beta)); %Matriz de 1 x length(beta) para almacenar valores de la
velocidad angular
```

```
%Inicio de posiciones angulares percibidas por las cámaras.
```

```
%Se crea una matriz para representar la posición angular efectiva que
```

```
%percibe cada cámara/paleta dentro del recorrido que hace el motor. Para
```

```
%dicho fin, se asignó una fila completa para cada paleta/cámara dentro de la
```

```
%matriz teta.
```

```
for i = 1 : Npal
```

```
    for j = 1 : length(beta)
```

```
        if i == 1 %para la primera fila, el recorrido es igual a beta
```

```
            teta(i,j) = radtodeg(beta(j));
```

```
        elseif lambda*(i-1) <= radtodeg(ln1) %las siguientes filas están desfasadas lambda
grados
```

```
            teta(i,j) = radtodeg(beta(j)) - (lambda * ( i - 1 ) );
```

```
        else %las siguientes filas están desfasadas lambda grados y se ajusta para evitar
ángulos negativos.
```

```
            teta(i,j) = (radtodeg(beta(j)) - (lambda) * ( i-1 ) ) + 360;
```

```
        end
```

```
    end
```

```
end
```

```
beta = degtorad(teta); %se sobrescribe el vector beta y se convierte en una matriz igual a
teta pero en radianes.
```

```
%Fin de posiciones angulares percibidas por las cámaras.
```

```
%Inicio cálculo de área de la cámara, vista de frente en metros cuadrados
```

```
Acfs = ( ( C*( cos(f*beta) - cos(f*beta + f*Dbeta) ) ) / f ) + hz * Dbeta; %área de la cámara
en la cámara superior
```

```
Acfi = ( ( C*( cos(f*beta + f*Dbeta) - cos(f*beta) ) ) / f ) + hz * Dbeta; %área de la cámara  
en la cámara inferior
```

```
%Fin cálculo de área de la cámara, vista de frente en metros cuadrados
```

```
%Inicio de cálculo de volúmenes en cámaras superiores en metros cúbicos
```

```
Vcs = Acfs * Rr;
```

```
%Fin de cálculo de volúmenes en cámaras superiores
```

```
%Inicio de cálculo de volúmenes en cámaras inferiores en metros cúbicos
```

```
Vci = Acfi * Rr;
```

```
%Fin de cálculo de volúmenes en cámaras inferiores
```

```
%Inicio de cálculo de perfil sinusoidal
```

```
Prfl = C*sin(f*beta); %describe el perfil de la leva para encontrar fácilmente máximos y  
mínimos para la asignación de presiones de la Ppt.
```

```
%Fin de cálculo de perfil sinusoidal
```

```
%Inicio de Asignación de presiones de planta en cámaras superiores en kilopascales
```

```
for i = 1 : Npal
```

```
    for j = 1: length(beta)
```

```
        if Prfl(i,j) == min(min(Prfl))
```

```
            Pcs(i,j) = Ppt; %asigna la presión igual a la presión de la planta donde encuentre  
un mínimo en la forma de la leva
```

```
        end
```

```
    end
```

```
end
```

```
%Fin de Asignación de presiones de planta en cámaras superiores
```

```

%Inicio de asignación de presiones de planta en cámaras inferiores en kilopascales
for i = 1 : Npal
    for j = 1: length(beta)
        if Prfl(i,j) == max(max(Prfl))
            Pci(i,j) = Ppt; %asigna la presión igual a la presión de la planta donde encuentre
            un máximo en la forma de la leva
        end
    end
end

%Fin de asignación de presiones de planta en cámaras inferiores

%Inicio cálculo de presiones en cámaras superiores en kilopascales

%Se tiene como condición que la presión en la posición evaluada sea diferente a la de la
Ppt y que el volumen siempre sea creciente y
%diferente de cero.
for i = 1 : Npal
    for j = 2 : length(beta)
        if Pcs(i,j) ~= Ppt && Vcs(i,j) > 0 && Vcs(i,j) >= Vcs(i,j-1)
            Pcs(i,j) = ( Pcs(i,j - 1) * Vcs(i,j - 1) ) / Vcs(i,j);
        end
    end
end

%Fin cálculo de presiones en cámaras superiores

%Inicio cálculo de presiones en cámaras inferiores en kilopascales

```

%Se tiene como condición que la presión en la posición evaluada sea diferente a la de la Ppt y que el volumen siempre sea creciente y

%diferente de cero.

for i = 1 : Npal

for j = 2 : length(beta)

if Pci(i,j) ~= Ppt && Vci(i,j) > 0 && Vci(i,j) >= Vci(i,j-1)

Pci(i,j) = (Pci(i,j - 1) * Vci(i,j - 1)) / Vci(i,j);

end

end

end

%Fin cálculo de presiones en cámaras inferiores

%Inicio cálculo de área de cada paleta en metros cuadrados para poder calcular fuerzas

Aps = Rr * (hz + C * sin(f*beta)); %área de la paleta en la cámara superior

Api = Rr * (hz - C * sin(f*beta)); %área de la paleta en la cámara inferior

%Fin cálculo de área de cada paleta

%Inicio cálculo de fuerzas en paletas superiores en kilonewton

for i = 1 : Npal

for j = 1 : length(beta)

if i == 1

Fps(i,j) = Aps(i,j) * (Pcs(i,j) - Pcs(Npal,j)); %presión de cámara 1 menos última cámara por Ap1

else

Fps(i,j) = Aps(i,j) * (Pcs(i,j) - Pcs(i - 1,j)); %presión de cámara actual menos la presión de la cámara anterior por Ap actual

end

```
end
end
%Fin cálculo de fuerzas en paletas superiores

%Inicio cálculo de fuerzas en paletas inferiores en kilonewton
for i = 1 : Npal
    for j = 1 : length(beta)
        if i == 1
            Fpi(1,j) = Api(1,j) * ( Pci(1,j) - Pci(Npal,j) ); %presión de cámara 1 menos última
            cámara por Ap1
        else
            Fpi(i,j) = Api(i,j) * ( Pci(i,j) - Pci(i - 1,j) ); %presión de cámara actual menos la presión
            de la cámara anterior por Ap actual
        end
    end
end
end
%Fin cálculo de fuerzas en paletas inferiores

%Inicio cálculo de torque aportado por las paletas superiores del motor kilonewton por
metro
for i = 1 : Npal
    for j = 1 : length(beta)
        Tps(i,j) = Fps(i,j) * ((r+R)/2);
    end
end
end
%Fin cálculo de torque aportado por las paletas superiores del motor
```

%Inicio cálculo de torque aportado por las paletas inferiores del motor en kilonewton por metro

for i = 1 : Npal

for j = 1 : length(beta)

Tpi(i,j) = Fpi(i,j) * ((r+R)/2);

end

end

%Fin cálculo de torque aportado por las paletas inferiores del motor

%Inicio cálculo del torque total del motor en kilonewton por metro

Tt = sum(Tps) + sum(Tpi);

%Fin cálculo del torque total del motor

%Inicio cálculo de la velocidad angular del motor en radianes por segundo

%%La función a evaluar es $(Tt/lcm) - ((B/lcm)*wm)$

%%Ngra es el número de pasos

%%Dbeta es el tamaño del paso

%%El intervalo para la evaluación de la integral es betag

%%ero y se inicializa ael valor inicial de la función wm es cl principio del programa

for i=1:length(beta)-1 %rutina para el cálculo de la solución por RungeKutta

k1 = (Tt(i)/lcm) - ((B/lcm)*wm(i));

k2 = (Tt(i)/lcm) - ((B/lcm)*wm(i)) + 0.5*k1*Dbeta;

k3 = (Tt(i)/lcm) - ((B/lcm)*wm(i)) + 0.5*k2*Dbeta;

k4 = (Tt(i)/lcm) - ((B/lcm)*wm(i)) + k3*Dbeta;

wm(i+1) = wm(i) + ((k1+2*k2+2*k3+k4)/6) *Dbeta; %ecuación principal

end

```

wmp = mean(wm); %Velocidad angular del motor.

fprintf('Velocidad angular del motor: %3.2f rad/s\n',wmp); %Muestra potencia promedio del
motor en ventana de comandos.

%Fin cálculo de la velocidad angular del motor

%Inicio cálculo de la aceleración angular del motor en radianes por segundo al cuadrado

Aa = ( Tt-(B*wm) ) / lcm;

%Fin cálculo de la aceleración angular del motor

%Inicio cálculo de la potencia del motor en watts

W = Tt .* wm;

Wp = mean(W); %Potencia promedio del motor.

fprintf('Potencia entregada por el motor: %3.2f W\n\n',Wp); %Muestra potencia promedio
del motor en ventana de comandos.

%Fin cálculo de la potencia del motor

%INICIO DE GRAFICACIÓN DE RESULTADOS%

disp('INICIO DE GRAFICACIÓN DE RESULTADOS')

op1 = input('Para graficar solo las respuestas totales ingrese 1\n Para graficar volúmenes,
presiones, fuerzas y torques por cámara/paleta ingrese 2\n Para graficar presiones y
fuerzas en solo dos cámaras/paletas ingrese 3\n Si desea graficar todo ingrese 4\n');

switch op1

    case 1 %respuestas totales

        %Inicio gráficas de variables de respuesta totales

        fig1 = figure('name','Variables de respuesta totales');

        ax1 = subplot(2,2,1);

```

```
plot(ax1,betag,Tt)
title('Torque total del motor')
xlabel('grados')
ylabel('KN*m')
grid on
ax2 = subplot(2,2,2);
plot(ax2,betag,Aa)
title('Aceleración angular del motor')
xlabel('grados')
ylabel('rad/s^2')
grid on
ax3 = subplot(2,2,3);
plot(ax3,betag,wm)
title('Velocidad angular del motor')
xlabel('grados')
ylabel('rad/s')
grid on
ax4 = subplot(2,2,4);
plot(ax4,betag,W)
title('Potencia del motor')
xlabel('grados')
ylabel('W')
grid on
%Fin gráficas de variables de respuesta totales
```

case 2 % respuestas en cámaras/paletas

```
%Inicio gráficas de volúmenes

fig2 = figure('name','Volúmenes');

ax1 = subplot(2,1,1); % top subplot

plot(ax1,betag,Vcs)

legend('Vcs1','Vcs2','Vcs3','Vcs4','Vcs5','Vcs6','Vcs7','Vcs8','Vcs9','Vcs10','Vcs11','Vcs12')
%le asigna a cada línea trazada una leyenda

title('Volumen en cámaras superiores')

xlabel('grados')

ylabel('m^3')

grid on

ax2 = subplot(2,1,2); % middle subplot

plot(ax2,betag,Vci)

legend('Vci1','Vci2','Vci3','Vci4','Vci5','Vci6','Vci7','Vci8','Vci9','Vci10','Vci11','Vci12')
%le asigna a cada línea trazada una leyenda

title('Volumen en cámaras inferiores')

xlabel('grados')

ylabel('m^3')

grid on

%Fin gráficas de volúmenes

%Inicio gráficas de presiones

fig3 = figure('name','Presiones');

ax1 = subplot(2,1,1); % top subplot

plot(ax1,betag,Pcs)

legend('Pcs1','Pcs2','Pcs3','Pcs4','Pcs5','Pcs6','Pcs7','Pcs8','Pcs9','Pcs10','Pcs11','Pcs12')
%le asigna a cada línea trazada una leyenda
```

```
title('Presión en cámaras superiores')
xlabel('grados')
ylabel('KPa')
grid on
ax2 = subplot(2,1,2); % middle subplot
plot(ax2,betag,Pci)
legend('Pci1','Pci2','Pci3','Pci4','Pci5','Pci6','Pci7','Pci8','Pci9','Pci10','Pci11','Pci12')
%le asigna a cada línea trazada una leyenda

title('Presión en cámaras inferiores')
xlabel('grados')
ylabel('KPa')
grid on
%Fin gráficas de presiones

%Inicio gráficas de fuerzas
fig4 = figure('name','Fuerzas');
ax1 = subplot(2,1,1); % top subplot
plot(ax1,betag,Fps)

legend('Fps1','Fps2','Fps3','Fps4','Fps5','Fps6','Fps7','Fps8','Fps9','Fps10','Fps11','Fps12')
%le asigna a cada línea trazada una leyenda

title('Fuerza en paletas superiores')
xlabel('grados')
ylabel('KN')
grid on
ax2 = subplot(2,1,2); % middle subplot
plot(ax2,betag,Fpi)
```

```
    legend('Fpi1','Fpi2','Fpi3','Fpi4','Fpi5','Fpi6','Fpi7','Fpi8','Fpi9','Fpi10','Fpi11','Fpi12')
%le asigna a cada línea trazada una leyenda

    title('Fuerza en paletas inferiores')

    xlabel('grados')

    ylabel('KN')

    grid on

    %Fin gráficas de fuerzas

    %Inicio gráficas de torque por paleta

    fig5 = figure('name','Torque por paleta');

    ax1 = subplot(2,1,1); % top subplot

    plot(ax1,betag,Tps)

legend('Tps1','Tps2','Tps3','Tps4','Tps5','Tps6','Tps7','Tps8','Tps9','Tps10','Tps11','Tps12')
%le asigna a cada línea trazada una leyenda

    title('Torque en paletas superiores')

    xlabel('grados')

    ylabel('KN*m')

    grid on

    ax2 = subplot(2,1,2); % middle subplot

    plot(ax2,betag,Tpi)

    legend('Tpi1','Tpi2','Tpi3','Tpi4','Tpi5','Tpi6','Tpi7','Tpi8','Tpi9','Tpi10','Tpi11','Tpi12')
%le asigna a cada línea trazada una leyenda

    title('Torque en paletas inferiores')

    xlabel('grados')

    ylabel('KN*m')

    grid on
```

```
%Fin gráficas de torque por paleta
```

```
case 3 % respuesta en solo dos paletas/cámaras
```

```
%Inicio subcódigo para graficar comportamiento en dos paletas
```

```
presion1 = zeros(1,length(betag));
```

```
presion2 = zeros(1,length(betag));
```

```
paleta2 = zeros(1,length(betag));
```

```
for i = 1:length(betag) %rutina para crear los vectores de las gráficas a mostrar
```

```
    presion1(i) = Pci(1,i);
```

```
    presion2(i)= Pci(2,i);
```

```
    paleta2(i) = Fpi(2,i);
```

```
end
```

```
fig6 = figure('name','Presiones/fuerzas en dos cámaras contiguas');
```

```
ax1 = subplot(1,2,1);
```

```
plot(ax1,betag,presion1,betag,presion2);
```

```
legend('cámara 1','cámara2')
```

```
title('Presiones en dos cámaras contiguas')
```

```
xlabel('grados')
```

```
ylabel('kPa')
```

```
grid on
```

```
ax2 = subplot(1,2,2); %
```

```
plot(ax2,betag,paleta2);
```

```
legend('Paleta 2')
```

```
title('Fuerza en la paleta 2')
```

```
xlabel('grados')
```

```
ylabel('kN')

grid on

%Fin subcódigo para graficar comportamiento en dos paletas

case 4 % todas las graficas

%Inicio gráficas de variables de respuesta totales

fig1 = figure('name','Variables de respuesta totales');

ax1 = subplot(2,2,1);

plot(ax1,betag,Tt)

title('Torque total del motor')

xlabel('grados')

ylabel('KN*m')

grid on

ax2 = subplot(2,2,2);

plot(ax2,betag,Aa)

title('Aceleración angular del motor')

xlabel('grados')

ylabel('rad/s^2')

grid on

ax3 = subplot(2,2,3);

plot(ax3,betag,wm)

title('Velocidad angular del motor')

xlabel('grados')

ylabel('rad/s')

grid on

ax4 = subplot(2,2,4);
```

```
plot(ax4,betag,W)
title('Potencia del motor')
xlabel('grados')
ylabel('W')
grid on
%Fin gráficas de variables de respuesta totales
```

```
%Inicio gráficas de volúmenes
fig2 = figure('name','Volúmenes');
ax1 = subplot(2,1,1); % top subplot
plot(ax1,betag,Vcs)
```

```
legend('Vcs1','Vcs2','Vcs3','Vcs4','Vcs5','Vcs6','Vcs7','Vcs8','Vcs9','Vcs10','Vcs11','Vcs12')
%le asigna a cada línea trazada una leyenda
```

```
title('Volumen en cámaras superiores')
xlabel('grados')
ylabel('m^3')
grid on
ax2 = subplot(2,1,2); % middle subplot
plot(ax2,betag,Vci)
```

```
legend('Vci1','Vci2','Vci3','Vci4','Vci5','Vci6','Vci7','Vci8','Vci9','Vci10','Vci11','Vci12')
%le asigna a cada línea trazada una leyenda
```

```
title('Volumen en cámaras inferiores')
xlabel('grados')
ylabel('m^3')
grid on
%Fin gráficas de volúmenes
```

```
%Inicio gráficas de presiones

fig3 = figure('name','Presiones');

ax1 = subplot(2,1,1); % top subplot

plot(ax1,betag,Pcs)

legend('Pcs1','Pcs2','Pcs3','Pcs4','Pcs5','Pcs6','Pcs7','Pcs8','Pcs9','Pcs10','Pcs11','Pcs12')
%le asigna a cada línea trazada una leyenda

title('Presión en cámaras superiores')

xlabel('grados')

ylabel('KPa')

grid on

ax2 = subplot(2,1,2); % middle subplot

plot(ax2,betag,Pci)

legend('Pci1','Pci2','Pci3','Pci4','Pci5','Pci6','Pci7','Pci8','Pci9','Pci10','Pci11','Pci12')
%le asigna a cada línea trazada una leyenda

title('Presión en cámaras inferiores')

xlabel('grados')

ylabel('KPa')

grid on

%Fin gráficas de presiones

%Inicio gráficas de fuerzas

fig4 = figure('name','Fuerzas');

ax1 = subplot(2,1,1); % top subplot

plot(ax1,betag,Fps)
```

```
legend('Fps1','Fps2','Fps3','Fps4','Fps5','Fps6','Fps7','Fps8','Fps9','Fps10','Fps11','Fps12')
%le asigna a cada línea trazada una leyenda
```

```
title('Fuerza en paletas superiores')
```

```
xlabel('grados')
```

```
ylabel('KN')
```

```
grid on
```

```
ax2 = subplot(2,1,2); % middle subplot
```

```
plot(ax2,betag,Fpi)
```

```
legend('Fpi1','Fpi2','Fpi3','Fpi4','Fpi5','Fpi6','Fpi7','Fpi8','Fpi9','Fpi10','Fpi11','Fpi12')
%le asigna a cada línea trazada una leyenda
```

```
title('Fuerza en paletas inferiores')
```

```
xlabel('grados')
```

```
ylabel('KN')
```

```
grid on
```

```
%Fin gráficas de fuerzas
```

```
%Inicio gráficas de torque por paleta
```

```
fig5 = figure('name','Torque por paleta');
```

```
ax1 = subplot(2,1,1); % top subplot
```

```
plot(ax1,betag,Tps)
```

```
legend('Tps1','Tps2','Tps3','Tps4','Tps5','Tps6','Tps7','Tps8','Tps9','Tps10','Tps11','Tps12')
%le asigna a cada línea trazada una leyenda
```

```
title('Torque en paletas superiores')
```

```
xlabel('grados')
```

```
ylabel('KN*m')
```

```
grid on
```

```

ax2 = subplot(2,1,2); % middle subplot
plot(ax2,betag,Tpi)
legend('Tpi1','Tpi2','Tpi3','Tpi4','Tpi5','Tpi6','Tpi7','Tpi8','Tpi9','Tpi10','Tpi11','Tpi12')
%le asigna a cada línea trazada una leyenda
title('Torque en paletas inferiores')
xlabel('grados')
ylabel('KN*m')
grid on
%Fin gráficas de torque por paleta

%Inicio subcódigo para graficar comportamiento en dos paletas
presion1 = zeros(1,length(betag));
presion2 = zeros(1,length(betag));
paleta2 = zeros(1,length(betag));

for i = 1:length(betag) %rutina para crear los vectores de las gráficas a mostrar
    presion1(i) = Pci(1,i);
    presion2(i)= Pci(2,i);
    paleta2(i) = Fpi(2,i);
end
fig6 = figure('name','Presiones/fuerzas en dos cámaras contiguas');
ax1 = subplot(1,2,1);
plot(ax1,betag,presion1,betag,presion2);
legend('cámara 1','cámara2')
title('Presiones en dos cámaras contiguas')
xlabel('grados')

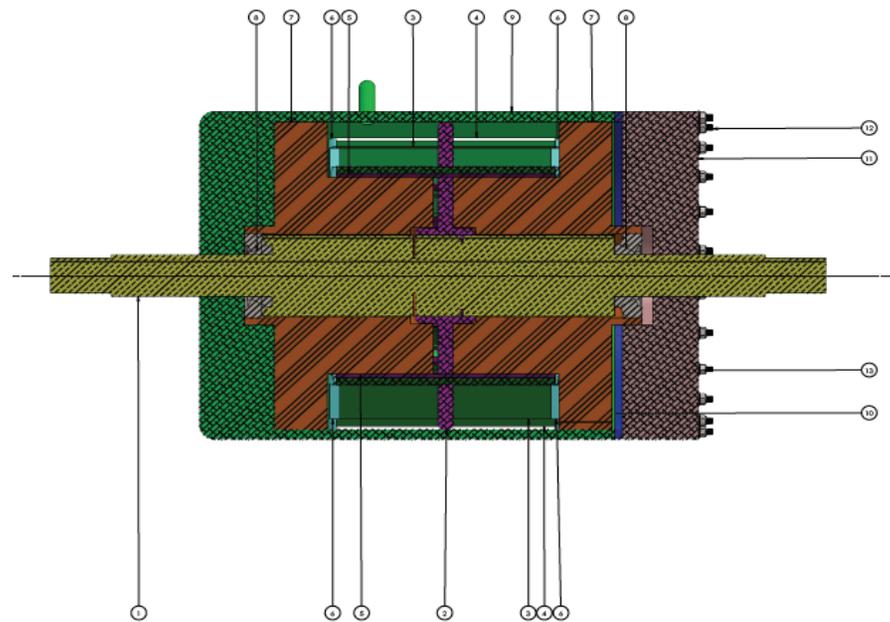
```

```
ylabel('kPa')
grid on
ax2 = subplot(1,2,2); %
plot(ax2,betag,paleta2);
legend('Paleta 2')
title('Fuerza en la paleta 2')
xlabel('grados')
ylabel('kN')
grid on
%Fin subcódigo para graficar comportamiento en dos paletas
end
```

ANEXO C. PLANOS MOTOR DISEÑADO

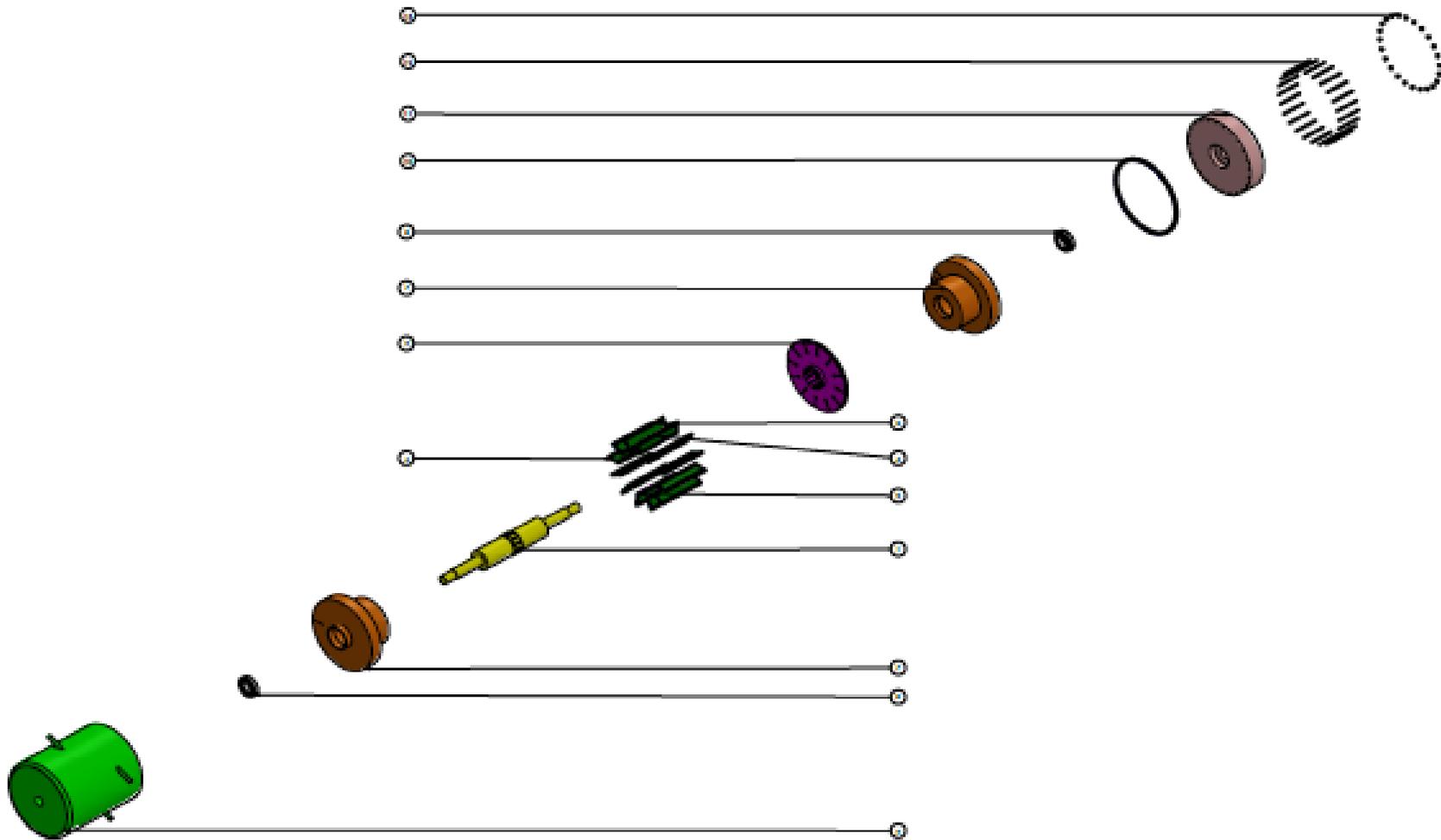
Como conclusión del trabajo de grado de Tecnología del estudiante CESAR CAICEDO los planos del primer prototipo del motor Radmax que funciona con las condiciones del vapor entregado por la planta térmica de la universidad son:

Figura 53. Simulación motor Ensamblado



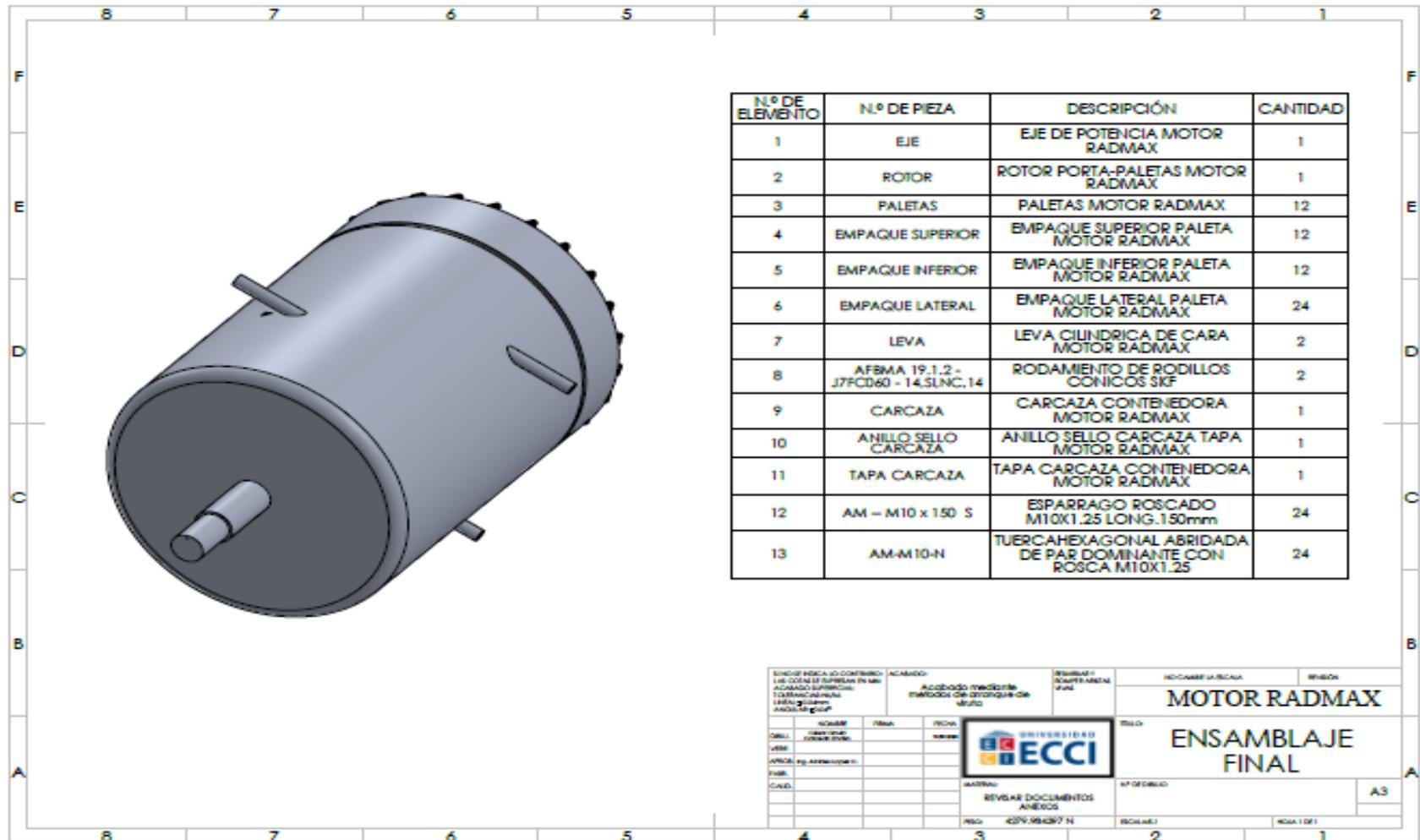
Fuente: Documento Final Tesis de Tecnología Cesar Caicedo

Figura 54. Explosivo del Motor



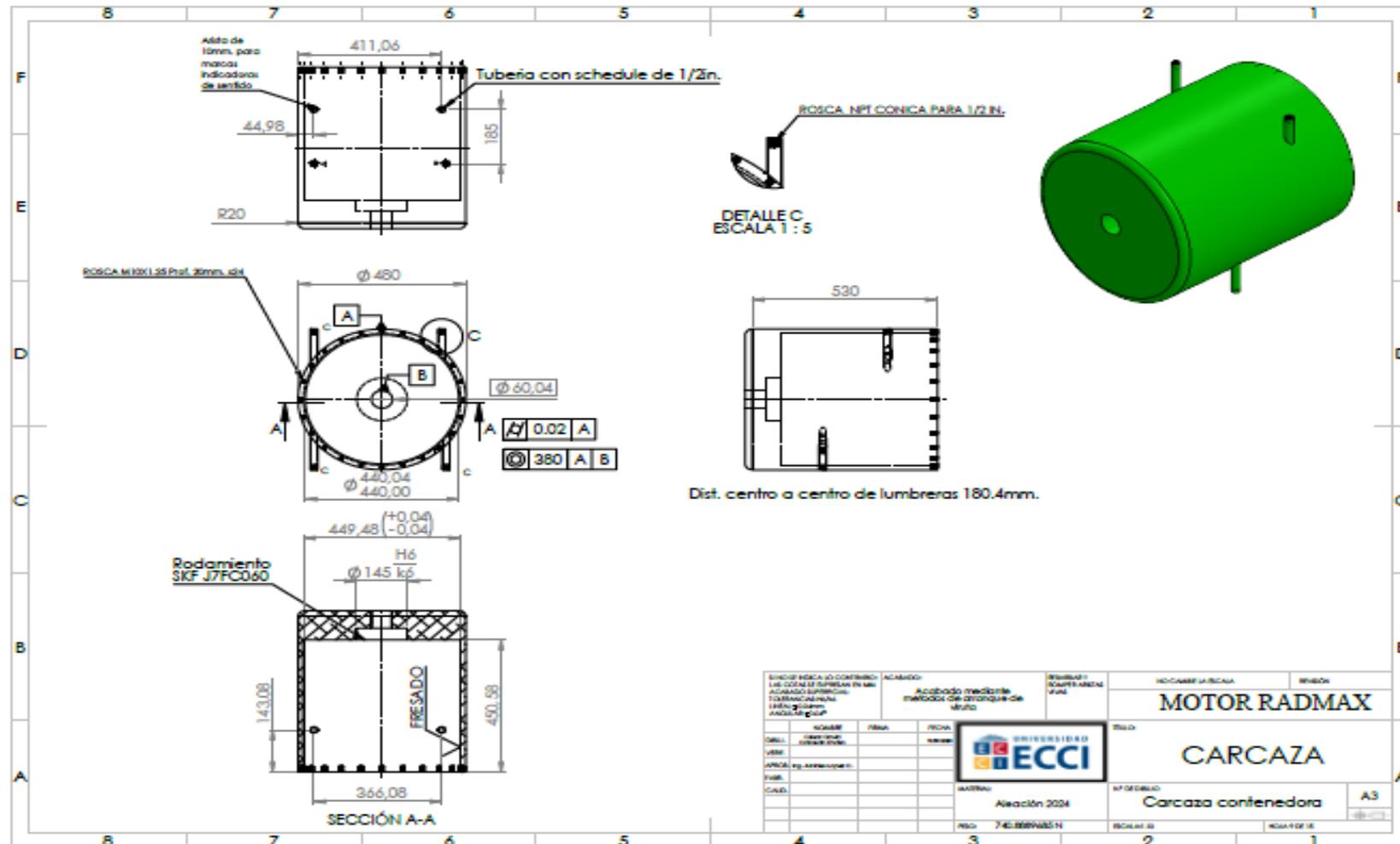
Fuente: Documento Final Tesis de Tecnología Cesar Caicedo

Figura 55. Plano Ensamble Final



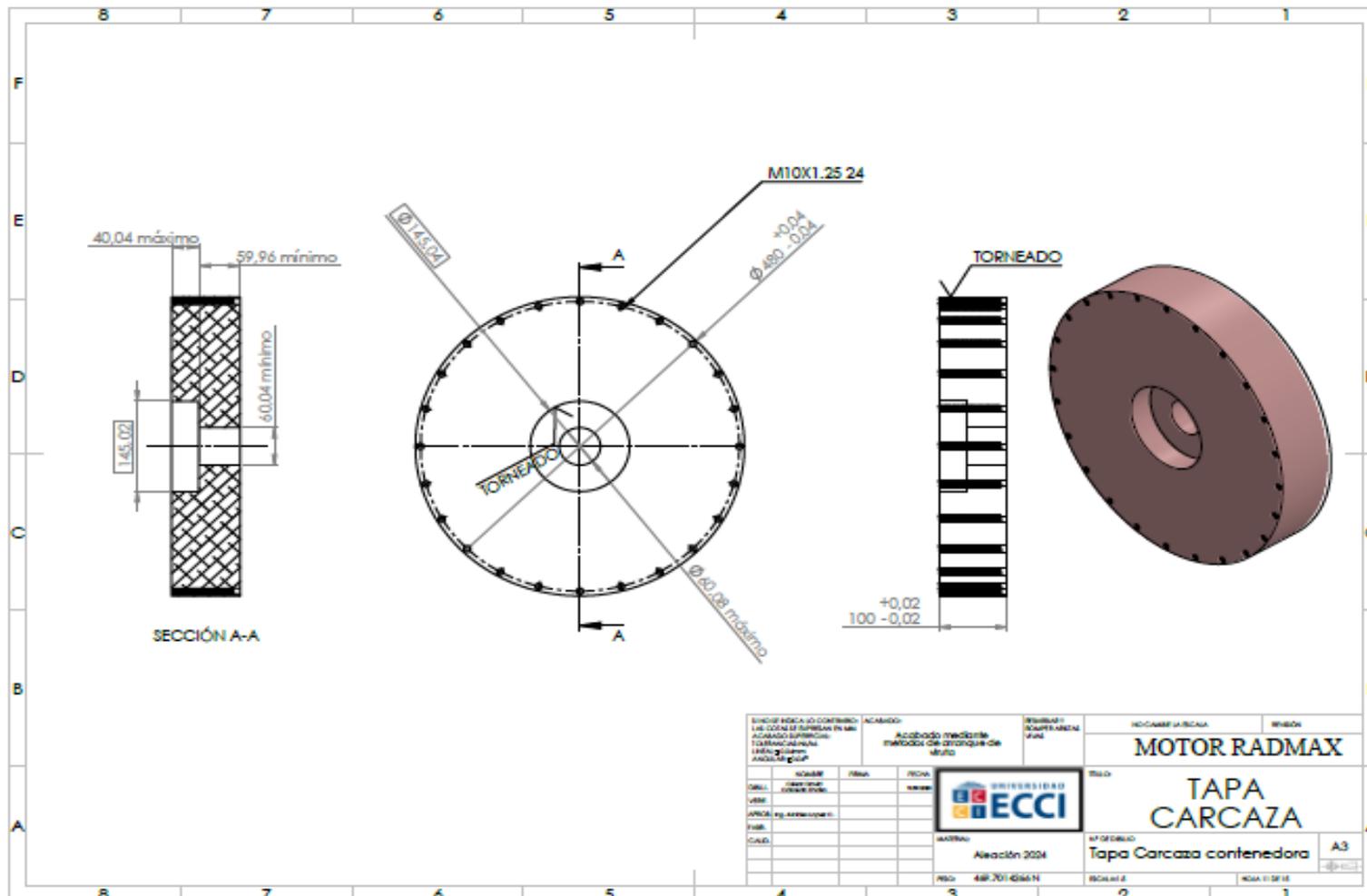
Fuente: Documento Final Tesis de Tecnología Cesar Caicedo

Figura 59. Carcaza.



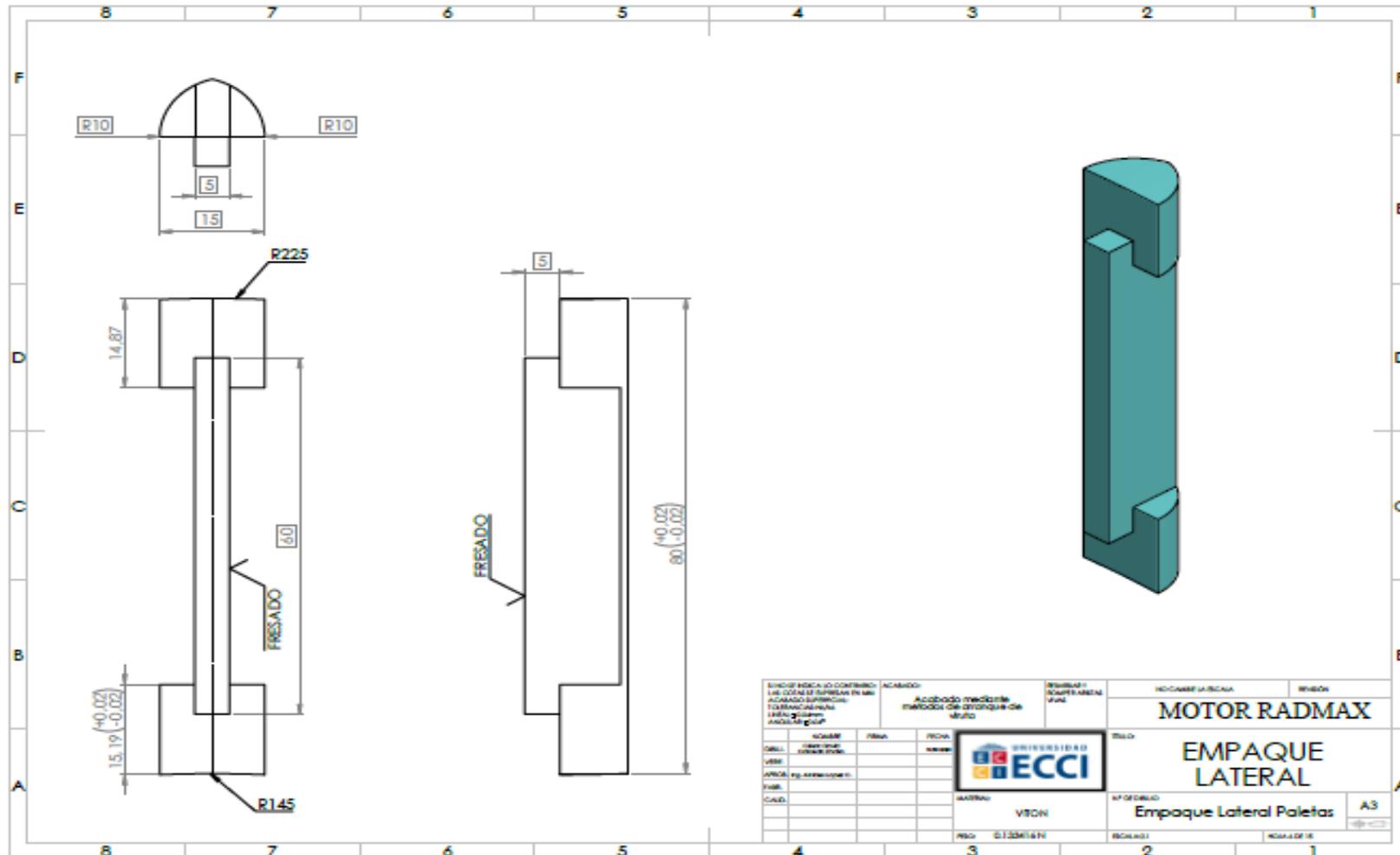
Fuente: Documento Final Tesis de Tecnología Cesar Caicedo

Figura 60. Tapa de carcaza.



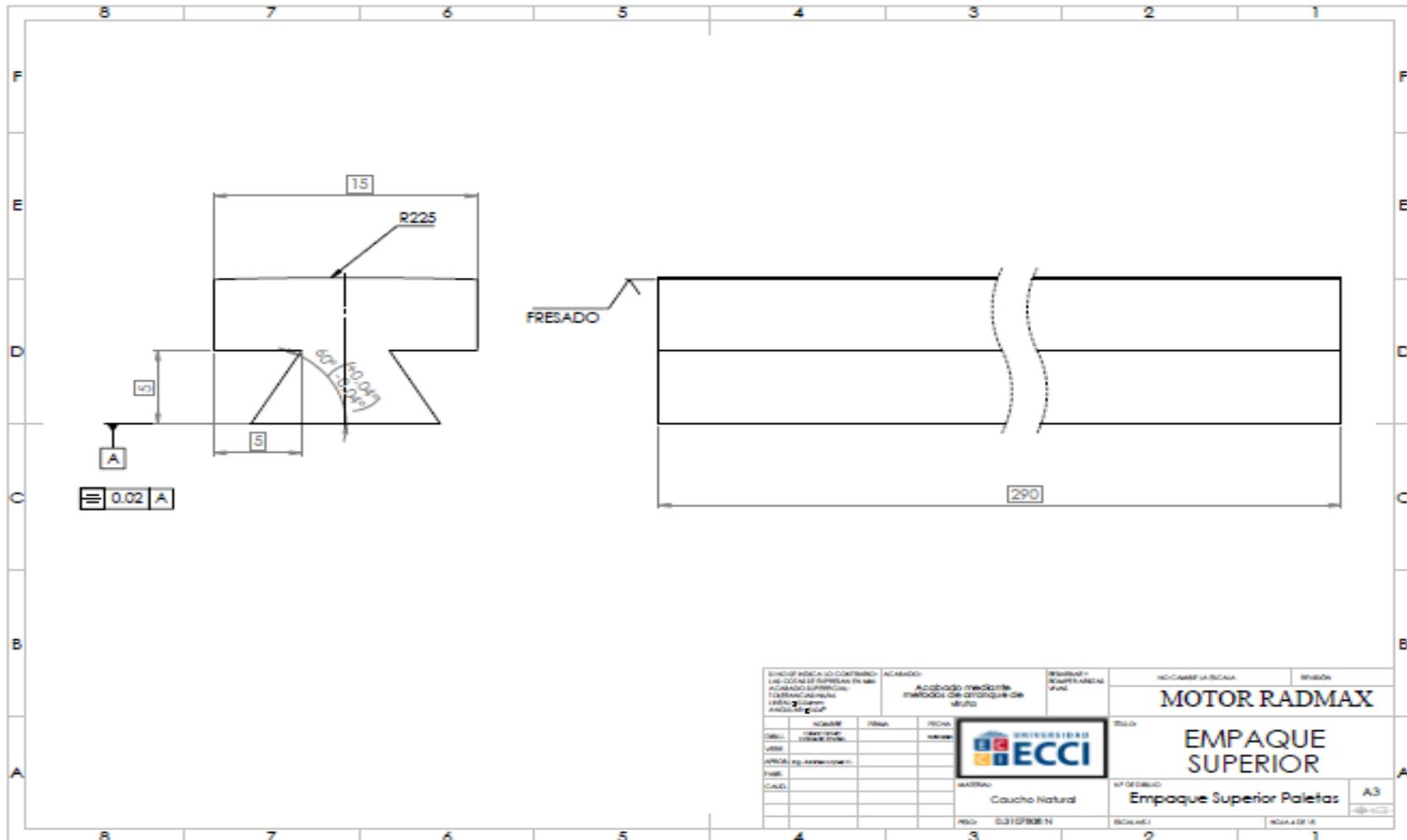
Fuente: Documento Final Tesis de Tecnología Cesar Caicedo

Figura 62. Empaque lateral.



Fuente: Documento Final Tesis de Tecnología Cesar Caicedo

Figura 63. Empaque superior.



Fuente: Documento Final Tesis de Tecnología Cesar Caicedo

10 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS Y WEB GRAFÍA

[1] «Los países que más CO2 generan del mundo - Mapas de El Orden Mundial - EOM», *El Orden Mundial - EOM*. <https://elordenmundial.com/mapas/los-paises-que-mas-co2-generan-del-mundo/> (accedido nov. 11, 2020).

[2] «POLÍTICA ENERGÉTICA – El Periódico de la Energía | El Periódico de la Energía con información diaria sobre energía eléctrica, eólica, renovable, petróleo y gas, mercados y legislación energética.» <https://elperiodicodelaenergia.com/category/politica-energetica/> (accedido nov. 15, 2020).

[3] «Análisis de Circuitos Eléctricos.: 3.3.- Fuentes de Generación Tradicional.», *Análisis de Circuitos Eléctricos*. <http://circuitoselectricosac.blogspot.com/p/33.html> (accedido nov. 13, 2020).

[4] C. Delgado y M. Planelles, «El mundo consumirá un 30% más de energía en 2040 y se aleja de cumplir el Acuerdo de París», *El País*, Madrid, nov. 14, 2017.

[5] «ACOLGEN – Asociación Colombiana de Generadores de Energía Eléctrica»,. <https://www.acolgen.org.co/> (accedido oct. 10, 2020).

[6] «ACOLGEN – Asociación Colombiana de Generadores de Energía Eléctrica»,. <https://www.acolgen.org.co/> (accedido nov. 11, 2020).

[7] E. L. R. S.A.S, «Meta de capacidad instalada de fuentes renovables no convencionales es de 1.500 MW a 2022». <https://www.larepublica.co/especiales/minas-y-energia-marzo-2019/meta-de-capacidad-instalada-de-fuentes-renovables-no-convencionales-es-de-1500-mw-a-2022-2841810> (accedido nov. 26, 2020).

- [8] Gómez Daniel, «Protocolo para ejecución de pruebas en planta termica ECCI-1».
- [9] C. Guardiola García, «Ciclo Rankine Simple (Ts)», 2011.
- [10] A. R. G. Umaña y M. Á. O. Blanco, «Análisis Del Ciclo De Vida De La Planta Térmica Didáctica De La Universidad ECCI En Las Etapas De Operación Y Mantenimiento», 2015.
- [12] INGENIUM, «Manual de operación y mantenimiento Planta termica ECCI-1». Accedido: ene. 27, 2020.
- [13] Y. A. Cengel y M. E. Boles, «Termodinámica-Cengel 7th», *México: McGraw Hill*, 2011.
- [15] W. J. Chávez Arias y J. L. Portal Jiménez, «Conversión de ciclo simple a ciclo combinado para incrementar la potencia instalada de la central térmica de aguaytía, manteniendo el consumo de gas natural», 2011.
- [16] N. H. Bada Valera y J. M. Domínguez Alba, «Conversion de la central termica de malacas de gas natural, de ciclo simple abierto de 100mw a ciclo combinado de 300mw», 2011.
- [17] S. Fuste Paredes, «Análisis termodinámico de los ciclos de rankine», B.S. thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, 2015.
- [18] R. D. A. A. José y M. D. Marta, *Motores de combustión interna*. Editorial UNED, 2015.
- [19] M. B. Farrell, «Motores Rotativos. Tipologías y combustibles alternativos.», p. 156.
- [20] B. Madke Pranita y M. D. Jaybhaye, «Application of Pugh Selection Matrix for Fuel Level Sensing Technology Selection», *Fuel*, vol. 1, p. 1.
- [21] J. N. Lucero, A. Mehdizadeh, y D. A. Sivak, «Optimal control of rotary motors», *Physical Review E*, vol. 99, n.º 1, p. 012119, 2019.
- [22] L. Shao, J. Zhao, B. Cui, C. Fang, y D. Liu, «A first-principles study of overcrowded alkene-based light-driven rotary molecular motor as a possible optical molecular switch», *Chemical Physics Letters*, vol. 678, pp. 216-221, jun. 2017, doi: 10.1016/j.cplett.2017.04.056.
- [23] «Diesel Engine | RadMax Technologies». <https://radmaxtech.com/dieselenigne> (accedido ene. 10, 2020).

- [24] M. Khani y G. Esmaeelzade, «Three-dimensional simulation of a novel rotary-piston engine in the motoring mode», *Propulsion and Power Research*, vol. 6, n.º 3, pp. 195–205, 2017.
- [25] «expander_brochure-899.pdf». Accedido: ene. 10, 2020. [En línea]. Disponible en: https://radmaxtech.com/document/news/expander_brochure-899.pdf.
- [26] S. M. Mostafavi, S. M. Hosseinalipour, y M. Delpisheh, «Thermal modeling of a novel rotary engine», *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 40, n.º 1, p. 4, 2018.
- [27] M. García Revert, «Desarrollo del prototipo virtual de un motor de combustión interna rotativo de Ciclo Híbrido de Alta Eficiencia (High Efficiency Hybrid Cycle HEHC-). Simulación dinámica y análisis por elementos finitos.», PhD Thesis, 2018.
- [28] C. Coffré y A. Tomás, «Análisis técnico económico de planta térmica de generación de energía eléctrica a partir de residuos sólidos municipales para Santiago de Chile», 2016, Accedido: nov. 11, 2020. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/142055>.
- [29] «Diseño De Plan De Mantenimiento Para El Ciclo Rankine De La Planta Termoeléctrica De La Universidad ECCI, Mediante La Aplicación De RCM».
- [31] J. C. Salazar y A. B. Zapata, «Análisis Y Diseño De Experimentos Aplicados A Estudios De Simulación», *DYNA*, vol. 76, n.º 159, pp. 249-257, jul. 2009.
- [32] F. Fardillah, A. Ruhimat, y N. Priatna, «Self regulated Learning Student Through Teaching Materials Statistik Based on Minitab Software», en *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, vol. 1477, p. 042065.
- [33] J. M. M. Flores, J. H. T. Campos, A. M. Sánchez, J. A. Z. Bustos, y J. J. M. Nolasco, «Optimización Paramétrica Multi-Objetivo De Ciclos De Potencia Rankine, Utilizando Técnicas De Diseño De Experimentos De Taguchi (Multi-Objective Parametricoptimization Of Rankine Power Cycles, Using Taguchi Experiment Design Techniques)», *Pistas Educativas*, vol. 41, n.º 134, 2019.
- [34] Y. A. Cengel, M. A. Boles, V. Campos Olguín, y M. T. Colli Serrano, *Termodinámica*. 2003.
- [35] Y. A. Grishin, V. A. Zenkin, y R. N. Khmelev, «Boundary conditions for numerical calculation of gas exchange in piston engines», *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, vol. 90, n.º 4, pp. 965–970, 2017.

- [36] H. Ling, E. Luo, y W. Dai, «A numerical simulation method and analysis of a complete thermoacoustic-Stirling engine», *Ultrasonics*, vol. 44, pp. e1511-e1514, dic. 2006, doi: 10.1016/j.ultras.2006.08.007.
- [38] «MATLAB para ingenieros.», p. 604.
- [39] G. D. Méndez Cambell, «Desarrollo de un Software para Centrales Térmicas de Ciclo Rankine con Precalentadores Abiertos, Cerrados y Recalentamiento», B.S. thesis, Quito, 2017., 2017.
- [40] D. S. SolidWorks, *SolidWorks®*. Version Solidworks 2005, Dassault Systems SA Concord, MA, 2005.
- [41] I. C. de N. T. y C. ICONTEC, *Compendio de dibujo técnico*. ICONTEC, 2004.
- [42] «Dibujo y diseño en ingeniería, 6ta Edición - Cecil Jensen.pdf». .
- [43] «NTC_Compendio_de_Dibujo_Tecnico.pdf». .
- [44] J. G. Valverde Bastidas, «Desarrollo de metodologías enfocadas a aplicaciones de ingeniería inversa para reproducir objetos mediante escaneado 3D, sistemas CAD/CAM y prototipado rápido», Master's Thesis, Quito, 2019., 2019.
- [45] R. A. Balart Gimeno, L. J. Quiles Carrillo, N. Montañés Muñoz, y T. Boronat Vitoria, «Optimización de geometría mediante estudio de diseño con SolidWorks», 2019.
- [46] S. Moreno Soriano, «Simulación y diseño del modelo de captación de energía en una planta termosolar con Solidworks», B.S. thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, 2016.
- [47] «Metodología para determinar la factibilidad de un proyecto | Echeverría Ruíz | Revista Publicando». <https://revistapublicando.org/revista/index.php/crv/article/view/836> (accedido sep. 15, 2019).
- [48] E. F. T. Rojas, «Estudio de la factibilidad y viabilidad de la creación de una empresa dedicada a la fabricación de biocombustible y productos de aseo con base en aceites usados», PhD Thesis, Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Ingeniería Mecánica ..., 2016.
- [49] J. I. Rocafuerte Tumbaco, «Creación de una microempresa de servicios de mantenimiento a motores fuera de borda en la comuna San Pedro, provincia de

Santa Elena, año 2018», B.S. thesis, La Libertad: Universidad Estatal Península de Santa Elena, 2019, 2019.

[50] J. P. Rybecky, «Análisis de viabilidad técnica, económica y financiera de proyecto de fabricación de bicicletas eléctricas», B.S. thesis, Universidad Nacional de Córdoba. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y

[51] J. M. Alonso, *Técnicas del automóvil: Motores*. 2000.

[52] F. Ortega, J. García, y M. González, «Modelo para obtener eficiencia y trabajo en un ciclo Otto», *de Cuerpos Académicos*, p. 1, 2014.

[53] «Matriz de Pugh: Ayuda a la toma de decisiones: PDCA Home». <https://www.pdcahome.com/2569/matriz-de-pugh-ayuda-a-la-toma-de-decisiones/> (accedido ene. 27, 2020).

[56] M. Diehl y W. Stroebe, «Productivity loss in brainstorming groups: Toward the solution of a riddle.», *Journal of personality and social psychology*, vol. 53, n.º 3, p. 497, 1987.

[58] E. M. M. López, «Diseño de experimentos: ANOVA», p. 42.

[59] «Formulación y evaluación de proyectos tecnológicos empresariales aplicados - Martín Hamilton Wilson - Google Libros». <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=PfpYxDclwUMC&oi=fnd&pg=PT2&dq=estudio+tecnico+economico+proyectos+planta+industrial&ots=5eGB8RE5FS&sig=bPfW4Sf2MZXjbUmMdab8Bo2E0CM#v=onepage&q&f=false> (accedido sep. 15, 2019).

[60] J. Highsmith, *Agile project management: creating innovative products*. Pearson education, 2009.

[61] R. C. Pascual y A. C. Subías, *Planificación y rentabilidad de proyectos industriales*. Marcombo, 1988.

[64] «Diseño de un experimento». <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/getting-started/designing-an-experiment/> (accedido ene. 10, 2020).

[65] F. Brunetti, *Motores de Combustão Interna-Vol. 1*. Editora Blucher, 2018.

[66] F. Payri González y J. M. Desantes Fernández, *Motores de combustión interna alternativos*. Editorial Universitat politécnica de valencia, 2011.

[68] «RadMax presentará tecnología de motor innovadora» *Spokane Journal of Business*. <https://www.spokanejournal.com/local-news/radmax-to-introduce-innovative-motor-technology/> (accedido ene. 10, 2020).

[69] «Motor Rotativo Antonio Sanchez 2013.pdf | Pistón | Engranaje», *Scribd*. <https://es.scribd.com/document/152050276/Motor-Rotativo-Antonio-Sanchez-2013-pdf> (accedido ene. 24, 2020).

[70] «La Matriz de Pugh Para La Toma de Decisiones y Otras | Matriz (Matemáticas) | Diseño». <https://es.scribd.com/document/394400029/La-Matriz-de-Pugh-Para-La-Toma-de-Decisiones-y-Otras> (accedido ene. 27, 2020).

[72] J. García y J. Antonio, «Análisis exergético y termoeconómico de un sistema de generación de energía. Estudio del caso del generador de vapor de 350 MW instalado en la central termoeléctrica "Villa de Reyes".», oct. 2015, Accedido: ene. 10, 2020. [En línea]. Disponible en: <http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/69009>.

[73] H. D. Páez-Logreira, R. Zamora-Musa, y J. Bohórquez-Pérez, «Programación de controladores lógicos (PLC) mediante ladder y Lenguaje de control estructurado (SCL) en MATLAB», *Revista Facultad de Ingeniería*, vol. 24, n.º 39, pp. 109–119, 2015.

[74] M. G. Miguel y E. M. Bolado, *Instrumentación electrónica: transductores y acondicionadores de señal*, vol. 15. Ed. Universidad de Cantabria, 2010.

[75] T. Wildi, *Maquinas Electricas Y Sistemasde Potencia*. Pearson Educación, 2006.

[76] Y. A. Çengel, *Transferencia de calor y masa: un enfoque práctico*. McGraw-Hill, 2007.

[77] M. Salinas, «Análisis Termodinámico de una central termoelectrica», Accedido: ene. 10, 2020. [En línea]. Disponible en: https://www.academia.edu/36213319/Analisis_Termodinamico_de_una_central_termoelectrica.

[79] «Clasificación de Los Diseños Experimentales | Análisis de variación | Aleatoriedad», *Scribd*. <https://es.scribd.com/document/364997920/Clasificacion-de-Los-Disenos-Experimentales> (accedido ene. 10, 2020).

[80] «Metodología para la generación y selección de alternativas.pdf». Accedido: ene. 27, 2020. [En línea]. Disponible en: <http://www.investigacion.biblioteca.uvigo.es/xmlui/bitstream/handle/11093/203/Metodologia%20para%20la%20generacion%20y%20seleccion%20de%20alternativas.pdf?sequence=1>.

[81] D. R. G. Barreto, «Introducción a MINITAB® 15», p. 52.

-
- [85] «Página de inicio de SKF | SKF». <https://www.skf.com/co> (accedido nov. 15, 2020).
- [86] «precio-aluminio.pdf». Accedido: sep. 19, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://tematicas.org/pdf/precio-aluminio.pdf>.
- [87] «Precio del Dólar Hoy en Colombia». <https://dolar.wilkinsonpc.com.co> (accedido sep. 19, 2020).
- [88] C. D. L. T. A. LAS y Q. C. LA ASIGNATURA, «Guía docente 320543-DPE-Diseño y Planificación de Experimentos».