



**UNIVERSIDAD NACIONAL
“PEDRO RUIZ GALLO”**



Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

TESIS

**Para Optar el Título Profesional de
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA**

**“Modelamiento energético de motores Diesel
Caterpillar C7.1 para determinar su consumo
específico de combustible a diferentes regímenes de
velocidad”**

Autor:

Bach. Mauricio Alejandro Herrera Herrera

Asesor:

Dr. Ing. James Skinner Celada Padilla

LAMBAYEQUE – PERÚ

2026



UNIVERSIDAD NACIONAL “PEDRO RUIZ GALLO”



Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

TESIS

**Para Optar el Título Profesional de
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA**

**“Modelamiento energético de motores Diesel
Caterpillar C7.1 para determinar su consumo
específico de combustible a diferentes
régimenes de velocidad”**

Autor:

Bach. Mauricio Alejandro Herrera Herrera

Aprobado por el Jurado Examinador:

PRESIDENTE: M.Sc. Ing. Juan Antonio Tumialan Hinostroza

SECRETARIO: Dr. Ing. Daniel Carranza Montenegro

MIEMBRO: M.Sc. Ing. Héctor Antonio Oliden Núñez

ASESOR: Dr. Ing. James Skinner Celada Padilla

Lambayeque – Perú

2026



TESIS

“Modelamiento energético de motores Diesel Caterpillar C7.1 para determinar su consumo específico de combustible a diferentes regímenes de velocidad”

CONTENIDOS

CAPITULO I: PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.

CAPITULO II: MARCO TEÓRICO.

CAPITULO III: MARCO METODOLÓGICO.

CAPITULO IV: PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN

CAPITULO V: RESULTADOS.

CAPITULO VI: ANALISIS E INTERPRETACION DE LOS RESULTADOS.

CAPITULO VII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

AUTOR: Bach. Mauricio Alejandro Herrera Herrera


M.Sc. Ing. Juan Antonio Tumialan Hinostroza
PRESIDENTE


Dr. Ing. Daniel Carranza Montenegro
SECRETARIO


M.Sc. Ing. Héctor Antonio Oviden Núñez
MIEMBRO


Dr. Ing. James Skinner Celada Padilla
ASESOR

Lambayeque – Perú

2026



ACTA DE SUSTENTACION N°0159-2026-FIME



En la ciudad de Lambayeque, siendo las 11:00 a.m. del día viernes 15 de mayo 2026. Se reunieron los miembros del jurado, designados mediante Resolución N°069-2026-D-FIME-UNPRG, de fecha 06 de mayo 2026, con la finalidad de Evaluar y Calificar la sustentación de la Tesis, conformado por los siguientes catedráticos:

- | | |
|---|------------|
| ▪ M.Sc. Ing. JUAN ANTONIO TUMIALAN HINOSTROZA | PRESIDENTE |
| ▪ Dr. Ing. DANIEL CARRANZA MONTENEGRO | SECRETARIO |
| ▪ M.Sc. Ing. HÉCTOR ANTONIO OLIDEN NÚÑEZ | MIEMBRO |
| ▪ Dr. Ing. JAMES SKINNER CELADA PADILLA | ASESOR |

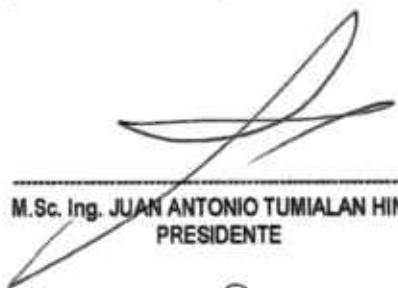
Se recibió la Tesis titulada:

"MODELAMIENTO ENERGÉTICO DE MOTORES DIESEL CATERPILLAR C7-1 PARA DETERMINAR SU CONSUMO ESPECIFICO DE COMBUSTIBLE A DIFERENTES REGIMENES DE VELOCIDAD"

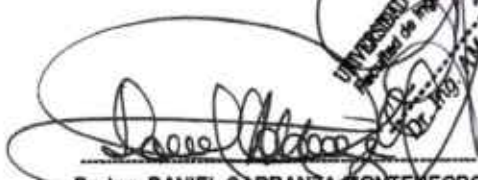
Presentada y sustentada por su autor, Bachiller: **HERRERA HERRERA MAURICIO ALEJANDRO**.

Finalizada la sustentación de la Tesis, el sustentante respondió las preguntas y observaciones de los miembros del jurado examinador, quienes procedieron a deliberar y acordaron otorgar el calificativo de **APROBADO**, Nota (**12**) en la escala vigesimal, mención **BUENA**. Quedando el sustentante apto para obtener el Título profesional de Ingeniero Mecánico Electricista, de acuerdo a la Ley Universitaria 30220 y la normatividad vigente, de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica y la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.

Siendo las **12** *en* del mismo día se da por concluido el acto académico, firmando presente acta el jurado respectivo:


M.Sc. Ing. JUAN ANTONIO TUMIALAN HINOSTROZA
PRESIDENTE


M.Sc. Ing. HÉCTOR ANTONIO OLIDEN NÚÑEZ
MIEMBRO


Dr. Ing. DANIEL CARRANZA MONTENEGRO
SECRETARIO


Dr. Ing. JAMES SKINNER CELADA PADILLA
ASESOR



CONSTANCIA DE VERIFICACIÓN DE ORIGINALIDAD

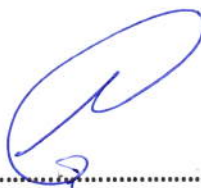
Yo, **Dr. Ing. James Skinner Celada Padilla**, usuario revisor del documento titulado:
"MODELAMIENTO ENERGETICO DE MOTORES DIESEL CATERPILLAR C7.1 PARA DETERMINAR SU CONSUMO ESPECIFICO DE CONBUSTIBLE A DIFERENTES REGIMENES DE VELOCIDAD".

Cuyo autor es, **Herrera Herrera Mauricio Alejandro**, identificado con documento de identidad **N° 70929855** declaro que la evaluación realizada por el Programa informático, ha arrojado un porcentaje de similitud de **11%**, verificable en el Resumen de Reporte automatizado de similitudes que se acompaña.

El suscrito analizó dicho reporte y concluyó que cada una de las coincidencias detectadas dentro del porcentaje de similitud permitido no constituyen plagio y que el documento cumple con la integridad científica y con las normas para el uso de citas y referencias establecidas en los protocolos respectivos.

Se cumple con adjuntar el Recibo Digital a efectos de la trazabilidad respectiva del proceso.

Lambayeque 28 de mayo del 2026



.....
DR. ING. JAMES SKINNER CELADA PADILLA

DNI: 16782335

ASESOR

Se adjunta:

*Resumen del Reporte automático de similitudes

*Recibo Digital

Modelamiento energético de motores Diesel Caterpillar C7.1 para determinar su consumo específico de combustible a diferentes regímenes de velocidad

INFORME DE ORIGINALIDAD

11%

INDICE DE SIMILITUD

10%

FUENTES DE INTERNET

4%

PUBLICACIONES

3%

TRABAJOS DEL
ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1

repositorio.utn.edu.ec

Fuente de Internet

3%

2

repositorio.unprg.edu.pe

Fuente de Internet

1%

3

hdl.handle.net

Fuente de Internet

1%

4

Rodriguez Fernandez, Jose. "Bibliographic and experimental study of the effect of biodiesel fuels on diesel performance and emissions", Proquest, 20111108

Publicación

<1%

5

revista.tecsup.edu.pe

Fuente de Internet

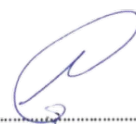
<1%

6

Luisa Fernanda Monico Muñoz. "Contribución al estudio del ruido de combustión en conceptos avanzados de combustión diesel.", Universitat Politecnica de Valencia, 2013

Publicación

<1%



DR. ING. JAMES SKINNER CELADA PADILLA

DNI: 16782335

ASESOR

7	eduardomartinezconalep183.wordpress.com	<1 %
	Fuente de Internet	
8	Submitted to Universidad Tecnologica de los Andes	<1 %
	Trabajo del estudiante	
9	dspace.ups.edu.ec	<1 %
	Fuente de Internet	
10	repositorio.autonoma.edu.pe	<1 %
	Fuente de Internet	
11	repositorio.uisek.edu.ec	<1 %
	Fuente de Internet	
12	dokumen.pub	<1 %
	Fuente de Internet	
13	repositorio.unap.edu.pe	<1 %
	Fuente de Internet	
14	Submitted to unifranz	<1 %
	Trabajo del estudiante	
15	Submitted to Universidad Pontificia Bolivariana	<1 %
	Trabajo del estudiante	
16	worldwidescience.org	<1 %
	Fuente de Internet	
17	"Analysis of combustion concepts in a poppet valve two-stroke downsized compression	<1 %

ignition engine designed for passenger car applications", 'Universitat Politecnica de Valencia'

Fuente de Internet

18

Submitted to Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo

Trabajo del estudiante

<1 %

19

www.autoavance.co

Fuente de Internet

<1 %

20

repositorio.unfv.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

21

repositorio.uteq.edu.ec

Fuente de Internet

<1 %

22

Submitted to Instituto Superior de Artes, Ciencias y Comunicación IACC

Trabajo del estudiante

<1 %

23

es.slideshare.net

Fuente de Internet

<1 %

24

qdoc.tips

Fuente de Internet

<1 %

25

repositorio.isil.pe

Fuente de Internet

<1 %

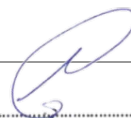
26

repositorio.uns.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

www.coches-actu.com



DR. ING. JAMES SKINNER CELADA PADILLA

DNI: 16782335

ASESOR

27

Fuente de Internet

<1 %

28

Chevarria Mar, Alvaro Rodrigo. "Efectos de la restriccion parcial del aire de admision e incremento de la temperatura de la mezcla aire-gas natural en un motor diesel funcionando en el modo diesel/gas", Pontificia Universidad Catolica del Peru - CENTRUM Catolica (Peru), 2021

Publicación

<1 %

29

Submitted to Escuela Superior Politécnica del Litoral

Trabajo del estudiante

<1 %

30

Submitted to Universidad Catolica De Cuenca

Trabajo del estudiante

<1 %

31

apirepositorio.unh.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

32

repositorio.udh.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

33

www.euskadi.net

Fuente de Internet

<1 %

34

Rogelio Cuevas-García, Isaac Bravo Nava. "Producción de combustibles renovables", Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología, 2021

Publicación

<1 %



DR. ING. JAMES SKINNER CELADA PADILLA

DNI: 16782335

ASESOR

35	fr.scribd.com	Fuente de Internet	<1 %
36	repositorio.eesppjsco.edu.pe	Fuente de Internet	<1 %
37	www.polodelconocimiento.com	Fuente de Internet	<1 %
38	fddocuments.ec	Fuente de Internet	<1 %
39	globalports.eu	Fuente de Internet	<1 %
40	novasinerugia.unach.edu.ec	Fuente de Internet	<1 %
41	Submitted to Universidad Nacional Daniel Alcides Carrion	Trabajo del estudiante	<1 %
42	Submitted to Universidad Rey Juan Carlos	Trabajo del estudiante	<1 %
43	alicia.concytec.gob.pe	Fuente de Internet	<1 %
44	www.monografias.com	Fuente de Internet	<1 %
45	1library.co	Fuente de Internet	<1 %



DR. ING. JAMES SKINNER CELADA PADILLA

DNI: 16782335

ASESOR

46	Submitted to Universidad Politecnica Salesiana del Ecuador Trabajo del estudiante	<1 %
47	dspace.sheol.uniovi.es Fuente de Internet	<1 %
48	repositorio.ute.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
49	www.asambleamadrid.es Fuente de Internet	<1 %
50	Rocío Verónica Ñáñez Tuero, Yony Farfan Robles, Elvio Tintaya Zegarra, Antonio Coronel Molina et al. "La Psicomotricidad en el desarrollo de la lectoescritura de los niños de 5 años: Fundamentos psicomotrices para el desarrollo de la lectoescritura en la infancia", Editora Cientifica Digital, 2026 Publicación	<1 %
51	Submitted to Universidad Nacional del Centro del Peru Trabajo del estudiante	<1 %
52	www.coursehero.com Fuente de Internet	<1 %

Excluir bibliografía Activo

Exclude assignment
template

Activo

Excluir coincidencias < 15 words



DR. ING. JAMES SKINNER CELADA PADILLA

DNI: 16782335

ASESOR



Recibo digital

Este recibo confirma que su trabajo ha sido recibido por **Turnitin**. A continuación podrá ver la información del recibo con respecto a su entrega.

La primera página de tus entregas se muestra abajo.

Autor de la entrega: Mauricio Alejandro Herrera Herrera
Título del ejercicio: Revision
Título de la entrega: Modelamiento energético de motores Diesel Caterpillar C7.1 p...
Nombre del archivo: INFORME_FINAL.pdf
Tamaño del archivo: 4.3M
Total páginas: 127
Total de palabras: 23,872
Total de caracteres: 144,092
Fecha de entrega: 23-abr-2026 02:14p. m. (UTC-0500)
Identificador de la entrega: 2941683530



**UNIVERSIDAD NACIONAL
"PEDRO RUIZ GALLO"**

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

TESIS ORDINARIA

TESIS

Para Optar el Título Profesional de
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

"Modelamiento energético de motores Diesel
Caterpillar C7.1 para determinar su consumo
específico de combustible a diferentes regímenes de
velocidad"

Presentado Por:
Bach. Mauricio Alejandro Herrera Herrera

Asesor:
Dr. James Skinner Celada Padilla

LAMBAYEQUE – PERÚ

2026



DR. ING. JAMES SKINNER CELADA PADILLA
DNI: 16782335
ASESOR

DEDICATORIA

Con mucha alegría y satisfacción, dedico este proyecto de tesis a Dios Padre, por siempre iluminarme y darme la fortaleza para seguir adelante en cada paso que doy.

A Meyli Huingo, quien ha sido una gran inspiración y pilar fundamental para seguir creciendo profesionalmente, por su apoyo incondicional y brindarme el amor y la confianza que tanto necesito para seguir adelante.

A mi madre Raquel, que, con su esfuerzo y sacrificio a formado mi camino guiándome siempre, velado por mi crecimiento, y me ha enseñado a siempre luchar con perseverancia en cada meta propuesta. Soy quien soy gracias a ella.

A mis hermanas Vania y Jennifer, por motivarme a cumplir mis objetivos, y estar siempre presentes en los planes que Dios nos tiene preparado.

AGRADECIMIENTO

Con gran estima y reconocimiento, extendo mi gratitud a la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, y a la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, por abrirme las puertas y ser mi casa formadora durante 5 retadores años.

Agradezco a mi asesor, el Dr. James Skinner Celada Padilla, por haberme brindado la oportunidad de recurrir a su guía y asesoramiento para el desarrollo de este proyecto de tesis.

Un enorme agradecimiento a mi familia por ser el pilar fundamental en mi crecimiento profesional, y brindarme el apoyo y fortaleza necesaria para seguir adelante.

Agradezco a Dios Padre por darme la oportunidad de dar este gran paso en mi vida profesional y poner en mi camino a aquellas personas que han sido mi soporte durante todo este valioso tiempo.

RESUMEN

El presente estudio tuvo como objetivo desarrollar el modelamiento energético del motor Diesel Caterpillar C7.1 para determinar su consumo específico de combustible en función de diferentes regímenes de velocidad operativa; donde la metodología fue de enfoque cuantitativo, tipo aplicado, nivel descriptivo y diseño experimental, utilizando como muestra 4 motores correspondientes a diferentes series, evaluados en 3 regímenes de velocidad: 1000 rpm, 1600 rpm y 2200 rpm, generando 12 condiciones de análisis; para la recolección de datos se emplearon sensores de flujo de combustible, tacómetro digital, especificaciones técnicas del fabricante y simulación computacional mediante el software ANSYS, complementado con el procesamiento en Microsoft Excel; ante esto, los resultados evidenciaron que el consumo específico de combustible presentó valores aproximados de 228 g/kWh a 1000 rpm, 214 g/kWh a 1600 rpm y 236 g/kWh a 2200 rpm, identificándose el menor consumo en el régimen intermedio de 1600 rpm; además, la eficiencia térmica alcanzó valores cercanos a 0.30, mientras que la potencia nominal del motor se mantuvo dentro del rango de 172 a 302 HP a 2200 rpm; y en conclusión, el modelamiento energético permitió determinar con precisión el consumo específico del motor Caterpillar C7.1, estableciendo que el régimen de 1600 rpm representa la condición más eficiente de operación, al registrar el menor consumo específico de combustible y un mejor aprovechamiento energético del motor.

Palabras clave: Modelamiento energético; Motor Diesel Caterpillar C7.1; Consumo específico de combustible; Regímenes de velocidad; Eficiencia térmica

ABSTRACT

The objective of this study was to develop an energy model of the Caterpillar C7.1 diesel engine to determine its specific fuel consumption at different operating speeds. The methodology employed a quantitative, applied, descriptive, and experimental design. Four engines from different series were used as a sample, evaluated at three speeds: 1000 rpm, 1600 rpm, and 2200 rpm, generating 12 analysis conditions. Data collection utilized fuel flow sensors, a digital tachometer, manufacturer's technical specifications, and computational simulation using ANSYS software, complemented by processing in Microsoft Excel. The results showed that the specific fuel consumption was approximately 228 g/kWh at 1000 rpm, 214 g/kWh at 1600 rpm, and 236 g/kWh at 2200 rpm, with the lowest consumption observed at the intermediate speed of 1600 rpm. Furthermore, the thermal efficiency reached values close to 0.30, while the nominal power of the engine remained within the range of 172 to 302 HP at 2200 rpm; and in conclusion, the energy modeling allowed to accurately determine the specific consumption of the Caterpillar C7.1 engine, establishing that the 1600 rpm regime represents the most efficient operating condition, registering the lowest specific fuel consumption and a better energy utilization of the engine.

Keywords: *Energy modeling; Caterpillar C7.1 diesel engine; Specific fuel consumption; Speed ranges; Thermal efficiency*

ÍNDICE

CARÁTULA.....	3
DEDICATORIA.....	4
AGRADECIMIENTO	5
RESUMEN	6
ABSTRACT	7
ÍNDICE... ..	8
ÍNDICE DE TABLAS	13
ÍNDICE DE FIGURAS	14
INTRODUCCIÓN	16
CAPÍTULO I: PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	18
1.1. Realidad problemática	18
1.2. Formulación del problema	19
1.3. Delimitación de la investigación	19
1.4. Justificación e importancia.....	20
1.4.1. Justificación económica	20
1.4.2. Justificación Científica	20
1.4.3. Justificación Ambiental.....	21
1.4.4. Justificación Social.....	21
1.5. Limitaciones	21
1.6. Objetivos	22
1.6.1. Objetivo General	22
1.6.2. Objetivos Específicos.....	22
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	23

2.1.	Antecedentes de estudio.....	23
2.1.1.	Contexto Internacional.....	23
2.1.2.	Contexto Nacional	27
2.1.3.	Contexto Local.....	31
2.2.	Bases Teóricas	31
2.2.1.	Primera ley de la termodinámica	31
2.2.2.	Motor Diesel.....	33
2.2.3.	Ciclo de combustión	34
2.2.4.	Motor Caterpillar C7.1.....	34
2.2.5.	Combustible fósil	35
2.2.6.	Tipos de combustibles en el mercado	36
2.2.7.	Biodiésel	36
2.2.8.	Producción de Biodiesel	37
2.3.	Definición conceptual de la terminología empleada.....	38
CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO		40
3.1.	Tipo y diseño de investigación.....	40
3.2.	Población y muestra	41
3.3.	Hipótesis	42
3.4.	Variables – Operacionalización	42
3.5.	Técnicas e instrumentos de recolección de datos	45
3.5.1.	Técnicas de recolección de datos	45
3.5.2.	Instrumentos de recolección de datos Observación	45
3.6.	Procesamiento y análisis de datos	46
CAPÍTULO IV: ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS		47
4.1.	Datos y especificación del motor	47

4.2.	Proceso de análisis del motor Diesel Caterpillar c7.1	47
4.2.1.	Análisis general del motor y sus componentes principales.....	49
4.2.2.	Análisis del sistema de lubricación.....	50
4.2.3.	Análisis del sistema de alimentación e inyección de combustible	50
4.2.4.	Análisis del sistema de control electrónico.....	51
4.3.	Cálculos para la simulación	52
4.3.1.	Proceso para los cálculos geométricos	52
4.3.2.	Proceso para los cálculos químicos	54
4.3.2.1.	<i>Cálculos químicos con diésel</i>	55
4.3.3.	Procesos de cálculos termodinámicos	56
4.3.3.1.	<i>Presión y temperatura de admisión</i>	56
4.3.3.2.	<i>Presión y temperatura de compresión</i>	58
4.3.3.3.	<i>Presión y temperatura de combustión</i>	59
4.3.3.4.	<i>Presión y temperatura de expansión</i>	60
4.3.3.5.	<i>Parámetros establecidos para el motor Caterpillar C7.1</i>	60
4.4.	Modelado del conjunto móvil	62
4.4.1.	Modelado del pistón.....	62
4.4.2.	Modelado de la biela.....	63
4.4.3.	Modelado del cigueñal.....	66
4.4.4.	Modelado del ventilador de enfriamiento	67
4.4.5.	Modelado del tanque de fluido	69
4.4.6.	Modelado del tubo de conducción.....	70
4.4.7.	Modelado del colador o filtro primario (Strainer)	71
4.4.8.	Modelado del niple de salida	72
4.4.9.	Modelado de la estructura principal del sistema auxiliar.....	73

4.4.10.	Modelado del filtro secundario.....	74
4.4.11.	Modelado de la rueda de transmisión	75
4.4.12.	Modelado del buje	76
4.4.13.	Modelado del motor eléctrico auxiliar	77
4.4.14.	Modelado del cojinete	78
4.4.15.	Modelado de la bancada de la biela.....	79
4.4.16.	Modelado del ensamblaje general del motor diésel Caterpillar C7.1.....	81
CAPÍTULO V: RESULTADOS		83
5.1.	Registro experimental de los parámetros operativos claves del motor diesel C7.1	83
5.2.	Desarrollo y resultados del modelo termodinámico del motor	85
5.3.	Evaluación del comportamiento del motor mediante simulación	88
5.3.1.	<i>Geometría</i>	89
5.3.2.	<i>Materiales</i>	92
5.3.3.	<i>Conexiones y Juntas</i>	95
5.3.4.	<i>Mallado</i> 96	
5.3.5.	<i>Static Structural</i>	98
5.3.6.	<i>Rigid Dynamics</i>	101
5.4.	Determinación del consumo específico de combustible y eficiencia térmica	103
5.4.1.	<i>Consumo específico de combustible a distintos regímenes de velocidad....</i>	103
5.4.2.	<i>Eficiencia térmica del motor por régimen y serie</i>	106
5.4.2.1.	<i>Relación entre eficiencia térmica y cargas térmicas y mecánicas</i>	107
5.4.2.2.	<i>.....Deformaciones, rigidez y tensiones equivalentes asociadas a la eficiencia térmica</i>	109
5.4.2.3.	<i>Factor de seguridad del motor en función de la eficiencia térmica</i>	110
CAPÍTULO VI: DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS		113

CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	116
7.1. Conclusiones.....	116
7.2. Recomendaciones	117
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	119
ANEXOS	123

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Operacionalización de variables.....	44
Tabla 2 Características técnicas del motor Diesel Caterpillar C7.1.....	47
Tabla 3 Componentes principales del motor Diesel Caterpillar C7.1	49
Tabla 4 Proceso de análisis del sistema de lubricación	50
Tabla 5 Proceso de análisis del sistema de inyección de combustible	51
Tabla 6 Proceso de análisis del sistema de control electrónico	51
Tabla 7 Parámetros geométricos principales del motor Diesel Caterpillar C7.1	52
Tabla 8 Composición química del diésel.....	55
Tabla 9 Valores de μ_{cv} y $\mu_{z'})_{\alpha = 1}$ a distintas temperaturas.....	59
Tabla 10 Parámetros asignados para los cálculos termodinámicos del motor Diesel Caterpillar C7.1	61
Tabla 11 Dimensiones geométricas del pistón del motor diésel Caterpillar C7.1	62
Tabla 12 Dimensiones geométricas de la biela del motor diésel Caterpillar C7.1	64
Tabla 13 Dimensiones geométricas del cigüeñal del motor diésel Caterpillar C7.1	67
Tabla 14 Dimensiones geométricas del ventilador de enfriamiento del motor diésel Caterpillar C7.1	68
Tabla 15 Dimensiones geométricas del cojinete de biela del motor diésel Caterpillar C7.1	79
Tabla 16 Dimensiones geométricas de la bancada de biela del motor diésel Caterpillar C7.1.....	80
Tabla 17 Parámetros operativos promedio por serie del motor Caterpillar C7.1	84
Tabla 18 Parámetros operativos de motores Caterpillar C7.1 según reportes de servicio	92
Tabla 19 Propiedades mecánicas y térmicas de los materiales empleados en los principales componentes del motor diésel	93
Tabla 20 Consumo específico de combustible (BSFC) del motor Caterpillar C7.1.....	105
Tabla 21 Eficiencia térmica del motor Caterpillar C7.1 por régimen y serie.....	111
Tabla 22 Comparación del consumo específico a 1600 rpm.....	112

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Tipos de sistemas termodinámicos	33
Figura 2 Motor Caterpillar C7.1	35
Figura 3 Producción de biodiésel	37
Figura 4 Motor C7.1	48
Figura 5 Modelado del pistón	63
Figura 6 Tapa de la biela	64
Figura 7 Cuerpo de la biela	65
Figura 8 Rodela	65
Figura 9 Ensamblaje de la biela	66
Figura 10 Modelado del cigueñal	67
Figura 11 Modelado del ventilador de enfriamiento	69
Figura 12 Modelado tridimensional del tanque de fluido del sistema auxiliar del motor Caterpillar C7.1.....	70
Figura 13 Modelado del tubo de conducción del sistema auxiliar del motor Caterpillar C7.1.	71
Figura 14 Modelado del colador (strainer) del motor Caterpillar C7.1.....	72
Figura 15 Modelado del niple de salida del motor Caterpillar C7.1.	73
Figura 16 Modelado del cuerpo principal del sistema auxiliar del motor Caterpillar C7.1.	74
Figura 17 Modelado del filtro secundario del sistema auxiliar del motor Caterpillar C7.1	75
Figura 18 Modelado de la rueda de transmisión	76
Figura 19 Modelado del buje del motor Caterpillar C7.1.....	77
Figura 20 Modelado del motor eléctrico auxiliar del sistema del motor Caterpillar C7.178	
Figura 21 Modelado del cojinete de biela del motor Caterpillar C7.1	79
Figura 22 Modelado de la bancada de biela del motor Caterpillar C7.1.....	80
Figura 23 Ensamblaje tridimensional del motor diésel Caterpillar C7.1 modelado en SOLIDWORKS.....	82
Figura 24 Funciones operativas del motor C7.1	83
Figura 25 Consumo promedio de combustible por serie del motor	84
Figura 26 Diagrama del proceso para la simulación	89
Figura 27 Geometría importada de ansys.....	90

Figura 28 Comparación de radios de acuerdo al modelo y serie del motor	91
Figura 29 Biblioteca de materiales creada	94
Figura 30 Importación de la geometría.....	96
Figura 31 Mallado	97
Figura 32 Detalles del mallado	97
Figura 33 Convergencia	98
Figura 34 Contactos	99
Figura 35 Especificaciones técnicas del tornillo.....	100
Figura 36 Análisis estático estructural.....	101
Figura 37 Joints para modelar el rigid dinamic.....	102
Figura 38 Joints para modelar el rigid dinamic.....	103
Figura 39 Intervalos de tiempo para el análisis.....	104
Figura 40 Condiciones de revoluciones	104
Figura 41 Interacción de las revoluciones en el análisis.....	104
Figura 42 Consumo específico de combustible en función del régimen de velocidad del motor.....	105
Figura 43 Consumo específico en base al funcionamiento de velocidad	106
Figura 44 Eficiencia térmica de análisis estructural de la biela de la serie E7A59570	107
Figura 45 Eficiencia térmica de análisis termo-estructural de la biela de la serie E7A59570	108
Figura 46 Eficiencia térmica de análisis estructural del cigüeñal de la serie E7A59570	108
Figura 47 Eficiencia térmica de análisis termo-estructural del cigüeñal de la serie E7A59570	108
Figura 48 Tensión equivalente del análisis estructural de la serie E7A588932	109
Figura 49 Tensión equivalente del análisis termo-estructural de la serie E7A588932	109
Figura 50 Factor de seguridad de pistón estático de la serie E7A58896	110
Figura 51 Factor de seguridad de pistón termo estructural de la serie E7A58896.....	110
Figura 52 Eficiencia térmica del motor Caterpillar C7.1 en función del régimen de velocidad.....	111

INTRODUCCIÓN

El incremento del uso de motores Diesel en sectores como el transporte, la industria y la maquinaria pesada ha generado una creciente preocupación por su consumo energético y eficiencia operativa, debido a su impacto directo en los costos de operación y en el aprovechamiento de los recursos energéticos; por lo que en este contexto, el análisis energético de motores de combustión interna permite comprender su comportamiento bajo distintas condiciones de funcionamiento, facilitando la identificación de regímenes operativos que optimicen el consumo específico de combustible y mejoren el rendimiento global del sistema; y por ello, el presente estudio se centra en el modelamiento energético del motor Diesel Caterpillar C7.1, con el propósito de determinar su consumo específico de combustible en diferentes regímenes de velocidad, empleando herramientas de simulación computacional y fundamentos termodinámicos que permitan evaluar su desempeño energético de manera precisa y cuantificable.

El documento se encuentra estructurado en siete capítulos.

El Capítulo I presenta el problema de investigación, donde se describe la realidad problemática, la formulación del problema, los objetivos, la justificación y las limitaciones del estudio.

El Capítulo II desarrolla el marco teórico, incluyendo antecedentes internacionales y nacionales, así como las bases conceptuales relacionadas con motores Diesel, consumo específico de combustible y eficiencia térmica.

El Capítulo III expone el marco metodológico, detallando el tipo, nivel y diseño de la investigación, la población y muestra, las variables, técnicas, instrumentos y el procedimiento de análisis de datos.

El Capítulo IV presenta el análisis e interpretación, donde se describe el motor estudiado, el modelamiento energético y el proceso de simulación.

El Capítulo V muestra los resultados obtenidos, incluyendo los valores del consumo específico de combustible y la eficiencia térmica en los distintos regímenes de velocidad.

El Capítulo VI contiene la discusión de los resultados, contrastándolos con investigaciones previas, y finalmente, el Capítulo VII presenta las conclusiones y recomendaciones derivadas del estudio, orientadas a optimizar el desempeño energético del motor Diesel Caterpillar C7.1.

CAPÍTULO I: PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Realidad problemática

El incremento en la utilización de combustibles continúa en ascenso debido a diversos factores, entre los que destacan el aumento de la población y, como resultado, la expansión del número de vehículos en circulación dentro de los países. El consumo global de combustible ha superado actualmente los 101 millones de barriles diarios, a esta estadística se considera como consumidor mayor a Estados Unidos, seguido de China (BIT FINANZAS, 2025). En el caso de Perú también ha aumentado el consumo, puesto que un automóvil recorre en promedio cerca de 20 000 kilómetros al año; asimismo, para el año 2023 se consumieron cerca de 9 millones de galones por día, siendo el DB5 S-50 el de mayor demanda con 5.5 millones de galones por día aproximadamente, seguido del gasohol (Osinergrmin, 2023), lo cual se deduce también el incremento de motores Diesel. Sin embargo, un reto para fabricantes es la contaminación que emiten estos motores.

El consumo de combustible está directamente relacionado con el rendimiento de los motores de combustión interna, los cuales presentan una eficiencia aproximada del 30%. Este porcentaje es considerado relativamente bajo al compararse con la eficiencia de otros tipos de motores que operan con fuentes de energía distintas. Por otro lado, la baja calidad del combustible, debido a la alteración del mismo para sacar provecho, y la utilización de combustibles de octanaje menor conllevan a la reducción del tiempo de vida de los vehículos (Molina, Solís, Masaquiza, & Rocha, 2022).

En los vehículos equipados con motores Diesel, la energía térmica generada por la combustión se transforma en energía mecánica mediante el eje cigüeñal. No obstante, cuando el motor opera en condiciones inadecuadas, tanto el consumo de combustible como la potencia entregada disminuyen respecto a los valores nominales. Esto ocurre debido a que una proporción considerable de la energía se disipa en el sistema de enfriamiento, registrándose variaciones térmicas de entre 10°C y 12°C. En Chiclayo, se ha observado que muchas unidades presentan recalentamiento en el monoblock, lo que conlleva un aumento del consumo específico de combustible entre un 10% y 15%. Por su parte, la maquinaria se

distingue por su durabilidad, facilidad de uso, mantenimiento y reparación. Sin embargo, presenta una desventaja significativa frente a tecnologías más avanzadas, su elevado consumo de combustible, lo que incrementa considerablemente los costos de producción. A ello, se suman los altos gastos asociados a su adquisición y operación, lo que representa una carga económica importante.

En respuesta a esta problemática, se plantea como objeto de estudio el Modelamiento energético de motores Diesel Caterpillar C7.1 para determinar su consumo específico de combustible a diferentes regímenes de velocidad.

1.2. Formulación del problema

¿Cómo influye el modelamiento energético del motor Diesel Caterpillar C7.1 en la determinación de su consumo específico de combustible bajo diferentes regímenes de velocidad operativa?

1.3. Delimitación de la investigación

Esta investigación se enfoca en varios aspectos clave: el tema, el espacio, el tiempo y la metodología, con el objetivo de definir claramente el alcance del estudio y evitar malentendidos sobre sus metas.

Desde la perspectiva temática, el estudio se centra en el modelado energético de un motor Diesel Caterpillar C7.1, con un enfoque exclusivo en determinar el consumo específico de combustible en diferentes regímenes de velocidad. No se tratan temas como el análisis de emisiones contaminantes, la optimización del diseño mecánico, la evaluación económica del motor, ni se hacen comparaciones con otros modelos o marcas de motores diésel; el análisis se limita al comportamiento energético del motor en cuestión.

En cuanto a la delimitación espacial, la investigación se lleva a cabo en un entorno controlado de pruebas y simulación, utilizando un banco de pruebas y herramientas de modelado computacional, específicamente el software ANSYS, aplicado al motor Diesel Caterpillar C7.1. No se realizarán evaluaciones en condiciones reales de operación vehicular ni en diferentes contextos geográficos, ya que el enfoque está en condiciones técnicas estandarizadas.

Respecto a la delimitación temporal, la investigación se desarrollará durante el año 2025, periodo en el que se recopilarán datos experimentales, se desarrollará el modelo energético, se simularán los distintos regímenes de velocidad y se analizarán los resultados obtenidos. No se considerarán evaluaciones a largo plazo ni análisis históricos del comportamiento del motor en años anteriores.

Finalmente, desde la perspectiva metodológica, el estudio se basa en un enfoque cuantitativo, de tipo aplicado y con un diseño experimental, considerando como muestra tres regímenes específicos de velocidad del motor (1000 rpm, 1600 rpm y 2200 rpm). Las variables analizadas se limitan a los regímenes de velocidad del motor como variable independiente y al consumo específico de combustible como variable dependiente.

1.4. Justificación e importancia

1.4.1. Justificación económica

Desde un enfoque económico, la investigación se justifica porque el consumo específico de combustible es uno de los principales factores que impactan el costo operativo de los motores Diesel, especialmente en sectores como la industria, el transporte pesado y la maquinaria. Al desarrollar un modelo energético para el motor Diesel Caterpillar C7.1, podemos identificar las velocidades en las que el motor opera de manera más eficiente. Esto no solo ayuda a optimizar el uso del combustible, sino que también reduce los gastos relacionados con la operación y el mantenimiento. Además, los resultados que se obtienen pueden servir como una guía técnica para las empresas operadoras y los talleres especializados, facilitando decisiones informadas basadas en criterios energéticos y ayudando a minimizar las pérdidas económicas que surgen de un uso ineficiente del motor.

1.4.2. Justificación Científica

La justificación científica de este estudio se basa en su contribución al análisis energético de motores de combustión interna, al combinar principios termodinámicos con herramientas de modelado y simulación computacional. Al desarrollar un modelo energético del motor Diesel Caterpillar C7.1, se fortalece el conocimiento técnico sobre cómo se relacionan las velocidades del motor con el consumo específico de

combustible, generando información cuantitativa que se puede verificar. Además, esta investigación amplía el campo de estudios existentes sobre motores diésel, al centrarse en un modelo específico y actual en el mercado, proporcionando resultados que pueden servir como base para futuras investigaciones experimentales, comparativas o de optimización energética.

1.4.3. Justificación Ambiental

La justificación ambiental del estudio se basa en que el consumo de combustible está estrechamente ligado a la generación de emisiones contaminantes en los motores Diesel. Aunque la investigación no evalúa directamente las emisiones, determinar con precisión el consumo específico de combustible en diferentes regímenes de velocidad permite identificar condiciones de operación más eficientes. Esto, a su vez, contribuye a una reducción indirecta del impacto ambiental asociado al uso de combustibles fósiles. Así, el estudio se alinea con los esfuerzos actuales para optimizar el uso de energía y reducir el consumo de recursos no renovables, promoviendo prácticas operativas más responsables desde el punto de vista ambiental.

1.4.4. Justificación Social

Desde una perspectiva social, la investigación cobra sentido porque un uso más eficiente de los motores Diesel tiene un impacto directo en la sostenibilidad de diversas actividades productivas. Esto es especialmente relevante en sectores como el transporte, la construcción y la industria, que dependen en gran medida de esta tecnología. Al generar información técnica que ayude a mejorar el rendimiento energético del motor, se contribuye de manera indirecta a la reducción de costos operativos, lo que puede llevar a una mayor estabilidad económica para las empresas y los trabajadores de estos sectores. Además, el estudio refuerza la formación profesional en Ingeniería Mecánica Eléctrica, al ofrecer un referente práctico que combina teoría, experimentación y simulación computacional.

1.5. Limitaciones

Esta investigación tiene algunas limitaciones que es importante tener en cuenta

al interpretar sus resultados. Primero, el estudio se centra únicamente en un modelo de motor Diesel, el Caterpillar C7.1, lo que significa que no podemos aplicar los resultados a otros motores que tengan diferentes configuraciones, potencias o sistemas de inyección.

Además, la investigación se lleva a cabo en condiciones de prueba y simulación controladas, utilizando regímenes de velocidad específicos (1000 rpm, 1600 rpm y 2200 rpm). Esto no abarca todos los escenarios reales de operación, como cambios bruscos de carga, condiciones climáticas extremas o el desgaste progresivo del motor. También, el modelado energético se basa en supuestos termodinámicos y parámetros técnicos proporcionados por el fabricante, lo que puede introducir ciertos márgenes de error propios de los modelos matemáticos y computacionales.

Por último, el estudio se enfoca en el análisis del consumo específico de combustible, sin entrar en detalles sobre las emisiones contaminantes, los costos de mantenimiento o el análisis del ciclo de vida del motor. Estos aspectos podrían ser explorados en investigaciones futuras para enriquecer los resultados obtenidos.

1.6. Objetivos

1.6.1. Objetivo General

Realizar el modelamiento energético de motores Diesel Caterpillar C7.1 para determinar su consumo específico de combustible a diferentes regímenes de velocidad.

1.6.2. Objetivos Específicos

a) Registrar experimentalmente los parámetros operativos clave durante las pruebas del motor Caterpillar C7.1.

b) Desarrollar un modelo termodinámico del motor Diesel Caterpillar C7.1 mediante balances de energía y análisis de pérdidas.

c) Evaluar el comportamiento del motor mediante simulaciones comparativas con el modelo desarrollado

d) Determinar indicadores energéticos como la eficiencia térmica, el consumo específico de combustible

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de estudio

2.1.1. Contexto Internacional

En China, Li et al. (2021) en su investigación evaluaron el efecto de tres estrategias de inyección sobre las características de combustión, el rendimiento del motor y las emisiones en un motor de inyección directa dual diésel/metanol. La metodología de investigación tuvo un diseño experimental, puesto que el estudio se basó en simulaciones Computational Fluid Dynamics (CFD) validadas con datos experimentales previos y se modela un motor diésel de 4 cilindros, turboalimentado, con interenfriador y desplazamiento de 4.215 L. y se emplearon mallas adaptativas, con modelos físico-químicos específicos para turbulencia, colisión, ruptura de gotas, transferencia de calor, formación de hollín y emisiones de NOx. Los resultados mostraron que el modo Diesel/Metanol obtuvo buena eficiencia de combustión, menor emisión de NOx con inyección retrasada y mejor rendimiento a alta carga; mientras que, el modo Metanol/Diesel obtuvo un bajo nivel de NOx y eficiencia moderada, mayor probabilidad de combustión incompleta y eficiencia óptima a baja carga, pero limitado a alta carga por el riesgo de detonación. Asimismo, el modo Metanol/Diesel/Metanol obtuvo un mejor rendimiento global tanto a baja como a alta carga, combina ventajas de premezcla y combustión difusiva y eficiencia óptima al 90% de metanol inyectado antes del diésel a baja carga y 30% antes a alta carga. Finalmente, el estudio concluye que el modo más eficiente es el M/D/M superando a los modos de D/M que es el más adecuado a alta carga y de M/D que es el más adecuado a baja carga.

Del mismo modo, en China, Wang et al. (2020) compararon el rendimiento de combustión, las emisiones y la eficiencia térmica de un motor Diesel bajo dos modos de suministro de metanol en configuración dual-fuel; el estudio analizó cómo cada estrategia influye en la eficiencia de combustión, el consumo específico de combustible y las emisiones contaminantes en un motor Diesel ligero bajo diferentes cargas. El diseño de la investigación fue experimental y se empleó una unidad de control de combustible que ajustaba la proporción de metanol y diésel; además, se variaron las proporciones de sustitución de metanol. La muestra de estudio fue un

motor Diesel ligero de 4 cilindros, refrigerado por agua y con sistema common-rail BOSCH y velocidad de motor a 1660 rpm. Los resultados, mostraron que el modo Inyección Directa (DI) tuvo mayor eficiencia de combustión, menor consumo de combustible, reducción significativa de emisiones de NO_x; a diferencia del modo Inyección en Puerto (PI) tuvo mejor comportamiento y menores emisiones de partículas. El estudio concluye, que la Inyección Directa supera a la Inyección por Puerto en eficiencia térmica y reducción de emisiones de NO_x. Adicionalmente, el PI es más adecuado debido a su menor riesgo de detonación; mientras que el DI permite un mayor grado de sustitución de diésel, hasta 95%, logrando mejores resultados globales, aunque requiere un control más preciso del tiempo y cantidad de inyección para evitar la detonación.

Por otro lado, en Turquía, Uyumaz et al. (2020) desarrollaron una investigación cuyo objetivo fue realizar un análisis exergético y exergoeconómico comparativo de un motor diésel operando con cinco tipos de combustibles, con el fin de evaluar su viabilidad energética y económica bajo diversas condiciones de carga. El diseño de la investigación fue experimental, mediante la operación de un motor con cada tipo de combustible bajo seis condiciones de carga. La muestra de estudio fue un motor diésel monocilíndrico de 4 tiempos, refrigerado por aire, marca Kirloskar, modelo TV1; asimismo, se utilizaron 5 tipos de combustibles y seis niveles de carga manteniendo una velocidad constante a 1500 rpm. Los resultados evidenciaron que la eficiencia exergética máxima se obtuvo con el diésel puro y la mínima se obtuvo con el biodiésel de microalgas (AB); de igual manera, el costo unitario exergético más bajo fue con el diésel puro, con 7.27 dólares/GJ y el más alto fue con el biodiésel de microalgas, con 9.34 dólares/GJ. Por último, concluyeron que el diésel puro tuvo el mejor rendimiento exergético y el costo exergético más bajo; por otra parte, el uso de biodiéseles generó una disminución moderada de la eficiencia y un aumento del costo exergético, aunque pueden ser ambientalmente más sostenibles; además, la exergoeconomía fue una herramienta de mucha utilidad para comparar objetivamente la eficiencia y viabilidad de diferentes biocombustibles en motores de combustión interna.

De la misma manera, en Turquía, Ibrahim et al. (2023) investigaron el rendimiento y las características de emisión de un motor diésel monocilíndrico

cuando se alimenta con mezclas de biodiésel derivado del aceite de Ceiba pentandra (CPB) para evaluar su viabilidad como sustituto parcial del diésel puro. Metodológicamente, el diseño empleado fue experimental mediante tres fases, la primera fue la producción de biodiésel mediante transesterificación alcalina del aceite de Ceiba pentandra, la segunda fue la evaluación en banco de pruebas de motor para analizar rendimiento y emisiones, y el tercero fue el desarrollo de modelos empíricos para predecir el rendimiento y emisiones en función de la carga y la mezcla de combustible. La muestra de la investigación fue un motor diésel monocilíndrico de 4 tiempos, refrigerado por aire; mientras que, los combustibles empleados fueron el diésel puro (B0) y mezclas de biodiésel CPB en proporciones de 10%, 20%, 30%, 40% y 50%. Los resultados hallados determinaron que a medida que se incrementó el porcentaje de CPB, aumentó el consumo específico, disminuyó ligeramente la eficiencia térmica, disminuyó significativamente las emisiones de CO y HC, aumentaron con mayor contenido de biodiésel las emisiones de NOx. La investigación concluyó que el biodiésel de Ceiba pentandra puede utilizarse con éxito en mezclas de hasta 20% sin comprometer significativamente el rendimiento del motor. El estudio demostró que el CPB es una fuente viable de biodiésel, y sus mezclas pueden contribuir a reducir las emisiones contaminantes del transporte sin necesidad de modificar los motores existentes. Por último, los modelos empíricos desarrollados permitieron prever con precisión el comportamiento del motor bajo distintas condiciones y mezclas de combustible.

En Corea, Ge et al. (2022) investigaron las características de combustión, el rendimiento del motor y las emisiones de un motor diésel de inyección directa common rail (CRDI) alimentado con mezclas de diésel y aceite de palma crudo (CPO), operando a diferentes velocidades de ralentí (750, 1500 y 2250 rpm) para evaluar la viabilidad técnica y ambiental del uso directo de aceite vegetal como una alternativa más económica al biodiésel convencional. Metodológicamente, es una investigación con diseño experimental del tipo aplicada; puesto que, se controlan variables y se manipulan mezclas de combustibles para analizar sus efectos en un motor real bajo condiciones específicas. La muestra del estudio fue un motor diésel CRDI de cuatro cilindros, turboalimentado, bajo carga constante de 30 Nm, y se utilizaron cuatro tipos de combustibles en tres velocidades. Los resultados de la investigación indicaron que la presión máxima en el cilindro y la tasa máxima de

liberación de calor disminuyen al aumentar la velocidad del motor; asimismo, agregar CPO reduce tanto la presión en el cilindro como la tasa máxima de liberación de calor a 2250 rpm, debido a la mejora en la atomización y temperatura del cilindro. De la misma manera, el consumo específico de combustible fue más bajo a 1500 rpm para todos los combustibles; además, el coeficiente de variación de la presión media efectiva fue menor al 3% en todos los casos, indicando combustión estable incluso con hasta 50% de CPO. Con respecto a los contaminantes, el CO disminuye al aumentar la velocidad del motor, el HC disminuye con mayor velocidad del motor y el NOx disminuye considerablemente con el incremento de la velocidad del motor. Por último, la investigación concluye que, al aumentar la velocidad del motor, disminuyen tanto la presión máxima en el cilindro como la tasa máxima de liberación de calor; el menor consumo específico de combustible se observó a 1500 rpm, aunque todas las mezclas con CPO mostraron valores más altos de BSFC comparados con el diésel puro; a 2250 rpm se registraron las menores emisiones de CO, HC y NOx. El estudio concluye que el aceite de palma crudo puede mezclarse directamente con diésel, hasta un 50% para ser usado en motores CRDI sin necesidad de modificaciones, donde el enfoque reduce el costo de producción frente al biodiésel puro, y tiene valor económico y ambiental significativo.

En Ecuador, Licoa y Ortega (2022) realizaron una investigación cuyo propósito fue examinar el rendimiento en el uso de combustible de un motor diésel de seis cilindros, correspondiente a la categoría m3. El estudio adoptó un enfoque experimental, desarrollando pruebas con dos métodos complementarios, con el apoyo de un dispositivo DFM100 y un método gravimétrico SAE J1321. La muestra de estudio fue un vehículo marca HINO, equipado con un motor diésel de seis cilindros. En los resultados obtenidos resaltan la identificación de segmentos con mayor demanda de combustible, superiores al 30% en los tramos B-C y C-B; mientras que, en el tramo A-B, se registraron valores mínimos de 0.21 galones y máximos de hasta 1.09 galones, con un promedio general de 0.62 galones por prueba. La implementación del ciclo propuesto permitió optimizar el uso de combustible, reduciendo el consumo entre un 18% y un 22%. La investigación evidenció que diseñar un ciclo de conducción ajustado a parámetros técnicos y operativos mejora significativamente la eficiencia en el consumo de combustible. El uso del medidor DFM100 aportó datos más precisos en comparación con el método

tradicional, y su aplicación junto a herramientas de rastreo satelital y control de pasajeros fortaleció la gestión del consumo. La distancia total evaluada durante las pruebas fue de 915.6 km, cubiertos en 32.86 horas de operación, lo que ofreció una base robusta para validar la eficiencia de las metodologías utilizadas y sustentar la posibilidad de replicar este modelo en otras unidades del parque vehicular.

2.1.2. Contexto Nacional

Reategui et al. (2024) en su investigación analizaron el consumo de combustible en un motor diésel Caterpillar C9 sometido a distintos regímenes de velocidad angular a través del dinamómetro de pruebas como herramienta de calidad. La metodología empleada fue del tipo aplicada, con enfoque cuantitativo y diseño experimental. La muestra del estudio estuvo constituida por un motor Diesel Caterpillar modelo C9, donde se lograron recopilar datos técnicos de caudal de combustible, la corriente del inyector, la presión de inyección e incluso la frecuencia, gracias al software Electronic Technician de Caterpillar. Los resultados demostraron que el consumo de combustible del motor incrementa proporcional conforme aumentan las revoluciones por minuto, reflejando una mayor exigencia energética a velocidades más altas. Se identificó que a 800 r.p.m., el flujo de combustible varió entre 4.7 y 5.3 litros por hora, mientras que, a 1000 r.p.m., osciló entre 6.3 y 6.7 litros por hora, evidenciando un comportamiento creciente. Asimismo, se verificó que la frecuencia de inyección fue de 1 kHz a 800 r.p.m y de 2.08 kHz a 2000 r.p.m., lo que sugiere una adecuada adaptación del sistema a distinto regímenes de funcionamiento. Las conclusiones del estudio señalan que existe una relación directa entre el régimen de giro del motor diésel Caterpillar C9 y su consumo de combustible, observándose un incremento progresivo en la medida que aumentan las revoluciones por minuto. Se verificó que el flujo de combustible varía dependiendo de la velocidad, evidenciando que el sistema de inyección responde dinámicamente a las exigencias del motor. Del mismo modo, se determinó que la corriente de activación en la bomba HEUI presenta cambios según el régimen de funcionamiento, lo cual permite identificar zonas donde el sistema opera con mayor eficiencia. Por último, se constató que la frecuencia de inyección se adapta a las distintas velocidades del motor, optimizando así su desempeño general.

Tuya y Cisneros (2020) realizaron un estudio con el objetivo de evaluar y mejorar el rendimiento operativo de las unidades de transporte de carga pesada modelo Highway Mining Truck CAT 797F considerando diversas condiciones de funcionamiento en carretera. La metodología de estudio se centró en la revisión bibliográfica especializada. La unidad de análisis se enfocó considerando las características mecánicas y operativas del motor Diésel CAT C17-20 equipado con un sistema de post-enfriamiento aire-aire y cuatro turbocompresores, bajo distintas condiciones de trabajo en carretera, tales como velocidad, pendiente y carga. Como resultados tras el análisis realizado lograron establecer que el camión CAT 797F puede alcanzar una velocidad máxima de 68 km/h aproximadamente cuando opera con su carga total, y con una aceleración cercana a 0.60 m/s². Además, se comprobó que, en condiciones adversas, el vehículo logra superar fuerzas de resistencia equivalentes al 50% de su peso total. En cuanto al consumo de combustible, se identificó que el desempeño más eficiente se presenta en un intervalo de velocidad entre 35 y 55 km/h. Finalmente, el estudio concluye que aplicar métodos grafo-analíticos permitieron mejorar el desempeño del camión CAT 797F bajo diversas condiciones operativas, sin necesidad de realizar pruebas físicas complejas. Del mismo modo, se determinó que, a plena carga, el vehículo puede alcanzar una velocidad máxima cercana a los 68 km/h y afrontar pendientes pronunciadas, aunque esto implica un mayor esfuerzo energético. También, se identificó que el consumo de combustible resulta más eficiente cuando el vehículo mantiene una velocidad aproximada de 42.5, siempre que las condiciones del terreno sean favorables.

Muñoz (2023) realizó una investigación con el objetivo de identificar el comportamiento operativo de un motor diésel con sistema de sobrealimentación al emplear combinaciones de biodiésel y diésel como combustible, evaluándolo bajo diversas condiciones de funcionamiento. El estudio, metodológicamente, es del tipo cuantitativo y diseño experimental. La investigación utilizó como muestra un motor diésel monocilíndrico de cuatro tiempos, con inyección directa y refrigeración por aire. Mientras que, las mezclas de biodiesel y diésel fueron B0, B10, B20, B30 y B100. Los resultados indicaron que el desempeño del motor con sistema de sobrealimentación se ve afectado según la proporción de biodiesel utilizada en la mezcla. A medida que se incrementa el contenido de biodiesel, se registra una leve

reducción en la potencia desarrollada y en el par motor. Se reportó que al utilizar una mezcla B20 (20% biodiesel y 80% diésel), la potencia efectiva promedio alcanzada fue de 2.47 kW, el toque fue de 8.14 Nm y el consumo específico de combustible se ubicó en 0.64 kg/kWh; en comparación, con combustibles 100% diésel (B0), se obtuvo una potencia de 2.65 kW, torque de 8.55 Nm y un consumo específico de 0.60 kg/kWh. Se concluye que, es posible utilizar mezclas de biodiesel con diésel convencional en motores diésel sin necesidad de efectuar ajustes técnicos en su estructura. Si bien el empleo de biodiesel en su forma pura conlleva una ligera reducción en el rendimiento del motor, también genera una notable disminución en los niveles de contaminantes emitidos. Por otro lado, las mezclas con una proporción moderada de biodiesel, como B10 o B20, ofrecen un equilibrio adecuado entre eficiencia operativa y menor impacto ambiental; respaldando el uso progresivo de combustibles alternativos más sostenibles dentro del ámbito del transporte.

Puma (2021) analizó la influencia de la combinación de diésel comercial, biodiésel y etanol en el comportamiento del proceso de combustión, el rendimiento operativo y la generación de emisiones contaminantes en un motor de encendido por compresión con una potencia de 240 kW. La metodología que se aplicó fue un enfoque cuantitativo y con diseño experimental; mientras que, la muestra estuvo compuesta por tres mezclas específicas de combustibles (D95B5E0, D85B6E9 y D80B6.5E13.5), evaluadas en un motor diésel de encendido por compresión de 240 kW, sobrealimentado de seis cilindros. Los resultados indicaron que al incorporar etanol y biodiesel en el combustible diésel, se produjo un adelanto en el inicio de la combustión a bajas revoluciones, 1000 rpm, y un retraso a altas revoluciones, 1800 rpm, lo que refleja el comportamiento del encendido varía según el régimen del motor. En cuanto al consumo específico de combustible, no se identificaron cambios relevantes por efecto de las mezclas; sin embargo, cuando se simuló una presión de admisión, el consumo aumentó hasta un 11% a bajas revoluciones y 7% a altas. Por otro lado, las emisiones de óxidos de nitrógeno disminuyeron levemente, alcanzando una reducción de hasta un 6% con la mezcla que presentaba mayor contenido de etanol y biodiésel. Se concluyó que las combinaciones permiten un encendido y proceso de combustión estables, con una tendencia a adelantar la combustión a bajas revoluciones y retrasarla a mayores regímenes. Con la mezcla

D80B6.5E13.5 (diésel 80%, biodiésel 6.5% y etanol 13.5%), la combustión se adelantó a 1000 rpm y se retrasó a 1800 rpm; a diferencia de, las emisiones contaminantes, con la misma mezcla a 80 kPa se incrementó el CO hasta 122%, aumentó el CO hasta 18% y disminuyó el NOx hasta 6%. Es decir, si bien incrementan algunos contaminantes con el uso de etanol, también logra una reducción de los NOx y una estabilidad en el consumo energético, lo que resulta favorable desde una perspectiva de sostenibilidad en zonas altoandinas.

Hinojosa (2024) realizó un estudio cuyo objetivo fue diseñar e implementar una recalibración electrónica del motor diésel R2.2 CRDI, específicamente ajustada a las exigencias ambientales de zonas de gran altitud como Cusco, con el propósito de mejorar su desempeño y confiabilidad; donde aplicaron una metodología del tipo aplicado y diseño cuasi-experimental; asimismo, se emplearon herramientas como escáneres automotrices, D-Loggers y software especializado. Para la muestra de estudio, se analizaron 270 vehículos con motor 2.2 CRDI registrados por Automotriz Incamotors SAC. Entre los principales resultados, se obtuvieron mejoras significativas tras la implementación de ajustes en el funcionamiento del motor R2.2 CRDI. El porcentaje de fallas en el sistema DPF (filtro de partículas diésel) redujeron en 90% tras la implementación del nuevo software adaptado a la altitud. Del mismo modo, hubo una mejora en consumo de combustible aproximado de 5% en condiciones reales de operación, manteniendo la potencia del motor. Asimismo, los motores modificados cumplieron con los límites establecidos por la normativa Euro IV, con niveles de opacidad del humo por debajo del 1.2 m⁻¹, considerado dentro del rango permitido. Por último, se optimizó el proceso de DPF, logrando regeneraciones exitosas en menos de 12 minutos, frente a los más de 30 minutos que requerían normalmente. El estudio concluye que, los motores diésel pueden ser recalibrados electrónicamente para operar en zonas de gran altitud sin afectar negativamente su desempeño ni los niveles de emisiones. La modificación de los parámetros operativos, complementada con la incorporación de un pre filtro en el sistema de combustible, permitió implementar una alternativa eficiente, replicable y sostenible. Se determinó, además, que esta metodología debe aplicarse de manera generalizada a otras unidades con características similares, asegurando un seguimiento constante que garantice tanto la eficiencia mecánica como el cumplimiento de las normativas ambientales a lo largo del tiempo.

Gamboa (2022) realizó una investigación cuyo objetivo fue calcular el consumo de combustible de los ómnibus que realizan el recorrido interprovincial entre Lima y Trujillo, utilizando para ello un modelo de regresión lineal múltiple; aplicaron una metodología con enfoque cuantitativa basada en la regresión lineal múltiple. La muestra del estudio fueron tres ómnibus interprovinciales con motor electrónico diésel D11A (Euro III) de 10.8 litros. Los resultados indicaron que, el modelo de regresión lineal múltiple identificó que las mejores condiciones de conducción permiten un ahorro de hasta 5.76 galones por viaje, equivalente a 2047.09 galones por año. Si se aplicara en el 25% de la flota interprovincial registrada entre 2010 y 2018, se ahorrarían 878,201.69 galones anuales, evitando la emisión de 9 348,688 kg de CO₂eq. En conclusión, el modelo estadístico desarrollado mejoró las condiciones de operación y conducción. Asimismo, al aplicar estas mejoras de manera sostenida, representa una reducción considerable en los costos operativos de combustible y a su vez la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, contribuyendo a los compromisos de mitigación ambiental del país. Del mismo modo, las variables con mayor impacto negativo en el consumo fueron las aceleraciones bruscas, frenadas agresivas y tiempos prolongados de ralentí, mientras que el uso adecuado de la inercia y una conducción constante se asociaron con mejoras en eficiencia energética. Por último, la plataforma tecnológica, comprendida de OBD II (sistema de diagnóstico a bordo), GNSS (sistema de satélites de navegación global) y telemetría, permitieron obtener información precisa y en tiempo real, respaldando la viabilidad de replicar la metodología en otras empresas de transporte.

2.1.3. Contexto Local

No se encontraron antecedentes en este contexto.

2.2. Bases Teóricas

2.2.1. Primera ley de la termodinámica

Esta ley es fundamental para analizar la eficiencia energética de sistemas como las máquinas térmicas, así como para comprender procesos en biología y en

la ingeniería de materiales, puesto que relaciona la energía interna, el trabajo y el calor aplicados en un sistema (Hernández, Juárez, & Tejeda, 2025).

La ecuación general de la conservación de la energía se estima como:

$$E_{sistema} = E_{entra} - E_{sale}$$

Aplicando este principio, se obtiene la ecuación de termodinámica:

$$\Delta U = Q - W$$

Donde:

- U: energía interna
- Q: cantidad de calor otorgado en el sistema
- W: trabajo efectuado por el sistema

Sistemas termodinámicos

Clasificados según su entorno (Ignacio, Vázquez, & Atilano, 2021):

- **Sistemas abiertos:** se caracteriza por permitir tanto el paso de materia como de energía a través de sus límites. Este tipo de sistema mantiene constante su volumen, pero representa un flujo continuo de sustancias hacia dentro y fuera de él. Se emplea con frecuencia en procesos industriales y también se observa en fenómenos naturales como el funcionamiento del cuerpo humano.

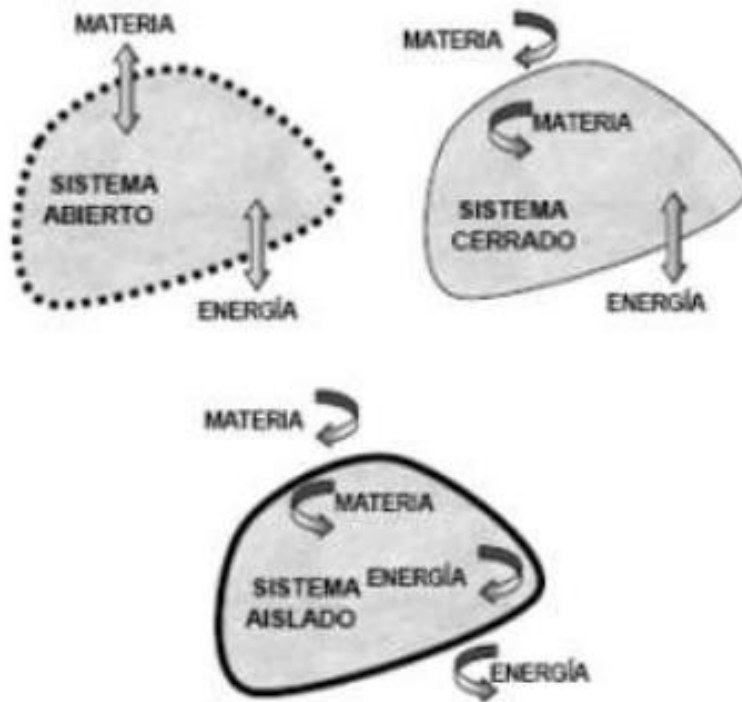
- **Sistemas cerrados:** restringe el intercambio de materia, aunque sí posibilita el flujo de energía en forma de calor o trabajo. La masa contenida permanece invariable, y sus límites son impermeables. Se encuentra representado en objetos cotidianos como una olla de presión o en dispositivos tecnológicos como las baterías.

- **Sistemas aislados:** no permite ningún tipo de intercambio con el medio que lo rodea, ni de materia ni de energía, ya que se encuentra completamente separado mediante paredes que impiden cualquier transferencia. Este tipo de sistema

es típico en estructuras como termos o naves espaciales, donde se busca mantener condicione internas constantes.

Figura 1

Tipos de sistemas termodinámicos



Nota: extraído de (Ignacio, Vázquez, & Atilano, 2021).

2.2.2. Motor Diesel

El motor diésel es un tipo de motor térmico de combustión interna que se distingue por su capacidad de encender el combustible únicamente mediante la compresión del aire, eliminando la necesidad de una chispa como ocurre en los motores a gasolina. Fue desarrollado por el ingeniero alemán Rudolf Diesel en 1893, con el objetivo de lograr una mayor eficiencia energética y ofrecer una alternativa viable para usos industriales y de transporte pesado. Gracias a esta tecnología, el consumo de combustible es más eficiente en comparación con motores de gasolina. A lo largo del tiempo, el motor diésel ha sido objeto de múltiples innovaciones, incorporando sistemas como el turbo diésel, la inyección directa y tecnologías de control de emisiones; sin embargo, debido a las exigencias ambientales y a las metas de descarbonización, su uso está siendo reevaluado a nivel global especialmente en el sector automotriz, aunque continúa vigente en aplicaciones

donde se requiere fuerza, durabilidad y eficiencia en el consumo (Moreno, Pineda, & Santos, 2022).

2.2.3. Ciclo de combustión

Este tipo de motor opera bajo un ciclo de cuatro fases: admisión, compresión, combustión y escape (Guerra, Morillo, Guasumba, & Guamán, 2021).

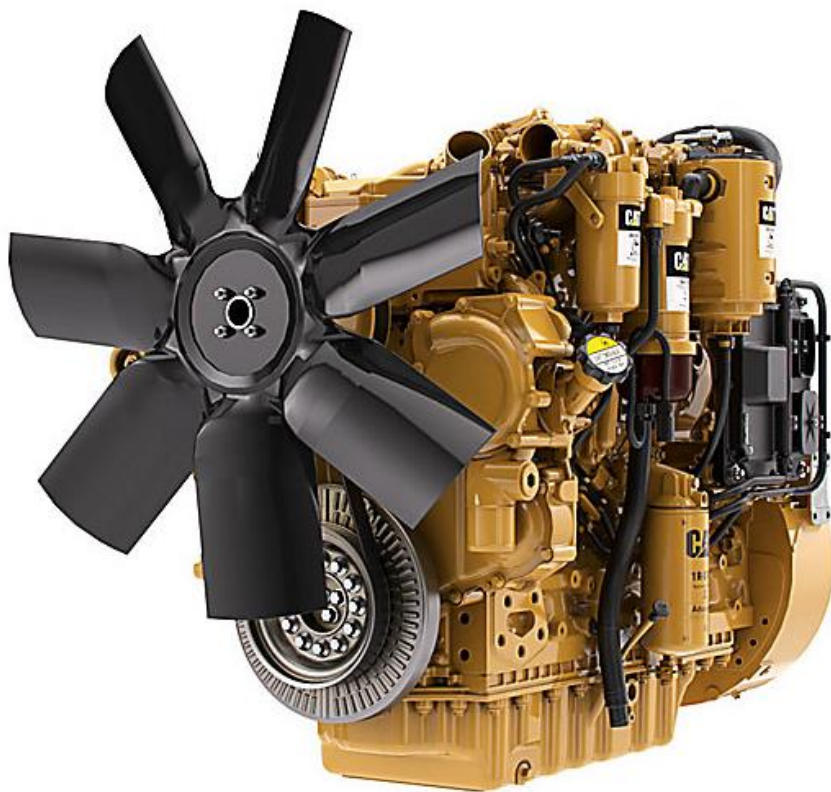
- El proceso de admisión, el pistón desciende desde el punto muerto superior (PMS) hasta el punto muerto inferior (PMI), mientras la válvula de admisión se abre. Durante este movimiento, el cilindro se llena con aire fresco proveniente del exterior, gracias al vacío generado por el descenso del pistón.
- Durante el proceso de compresión, el pistón asciende desde el PMI hacia el PMS con ambas válvulas cerradas, el aire en el cilindro alcanza temperaturas muy elevadas; en ese momento cuando se inyecta el combustible, el cual se inflama espontáneamente debido al calor generado, fenómeno conocido como autoignición.
- El proceso de combustión, justo antes de que el pistón llegue al PMS, se inyecta el combustible (diésel) finalmente atomizado. Este se enciende de forma espontánea al contacto con el aire caliente comprimido, generando una explosión controlada que empuja el pistón hacia abajo. En este ciclo se produce trabajo mecánico.
- Durante el proceso de escape, el pistón asciende nuevamente desde el PMI hacia el PMS, esta vez con la válvula de escape abierta. Los gases resultantes de la combustión son expulsados hacia el sistema de escape, dejando el cilindro listo para iniciar un nuevo ciclo.

2.2.4. Motor Caterpillar C7.1

Este tipo de motor tiene disponibilidad de rango de potencia comprendidos

desde 129 hasta 225 kW, equivalentes a 172 hasta 302 caballos de fuerza, a una velocidad de 2,200 revoluciones por minuto, Este modelo cumple con los estándares ambientales más exigentes, como la normativa Tier4final de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos y la regulación Stage V de la Unión Europea. Este tipo de motor se emplea en una gran variedad de sectores y equipos. Dentro de sus características, destacan los 6 cilindros en línea con calibre 105 mm y carrera 135 mm, además de la capacidad de cilindrada de 7L, el tipo de aspiración por posenfriamiento turboalimentado y sistema de inyección directa (CATERPILLAR, 2025).

Figura 2
Motor Caterpillar C7.1



Nota: Extraído de (CATERPILLAR, 2025).

2.2.5. Combustible fósil

El combustible fósil es utilizado como una fuente energética en distintas actividades productivas, especialmente en sectores como el transporte, la industria y la agricultura. Aunque han sido fundamentales para el desarrollo industrial,

actualmente son señalados como una de las principales causas del calentamiento global, debido a los gases contaminantes que emiten durante su extracción, procesamiento y quema, entre ellos el dióxido de carbono, el monóxido de carbono y el metano. Cabe destacar que estos combustibles no son renovables, ya que provienen de recursos finitos, lo que exige medidas para reducir su consumo y promover prácticas energéticas más sostenibles (Chaparro, y otros, 2021).

2.2.6. Tipos de combustibles en el mercado

En el contexto peruano, ciertas compañías se dedican al proceso de refinación del diésel crudo para su posterior distribución en todo el territorio nacional. Las dos empresas más representativas en el país son Petroperú y Repsol, quienes ofrecen las siguientes presentaciones, respectivamente (Muñoz, 2023):

- P. Diésel 2, es un tipo de combustible obtenido da partir de la refinación de hidrocarburos.
- P. Diésel B2, es una mezcla de diésel 2 con un 2% de biodiésel puro.
- P. Diésel B5, es una mezcla de diésel 2 con un 5% de biodiésel puro.
- R. Diésel DB5 D50, es una mezcla de diésel al 95% con un 5% de biodiésel, con bajo contenido de azufre.
- R. Diésel DB5, es una mezcla de diésel al 95% con un 5% de biodiésel.
- R. Diésel minero, está diseñado para operar eficientemente en ambientes fríos, incrementando el rendimiento del motor.

2.2.7. Biodiésel

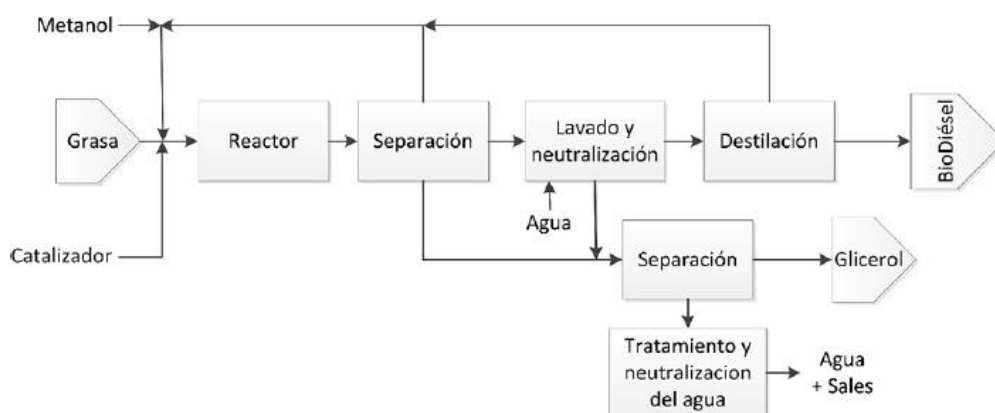
El biodiesel es un tipo de combustible de origen renovable que se obtiene a partir de aceites vegetales o grasas animales mediante un proceso químico denominado transesterificación, en el que intervienen catalizadores como el hidróxido de sodio o potasio. Este biocombustible destaca por ser biodegradable, no tóxico y menos perjudicial para el medio ambiente en contaminación el diésel fósil. Entre sus principales propiedades se encuentran su capacidad para reducir

emisiones contaminantes, como el dióxido de carbono y el material particulado, así como una mayor capacidad lubricante y un elevado índice de cetano. Además, no contiene azufre ni compuestos aromáticos, aunque puede generar un ligero incremento en las emisiones de óxidos de nitrógeno. Puede emplearse directamente o mezclado con diésel convencional en proporciones que se indican con las siglas B2, B5, B20, entre otros, donde el número representa el porcentaje de biodiésel en la mezcla. No obstante, cuando se incrementa dicho porcentaje, puede disminuir el rendimiento del motor, debido a que el biodiesel posee un poder energético inferior al del diésel tradicional. En estudios recientes, se ha determinado que la mezcla B20 ofrece un equilibrio adecuado entre eficiencia y sostenibilidad, permitiendo una combustión estable y contribuyendo a la disminución de la huella ambiental sin comprometer significativamente la potencia del motor (Herrera, Bermúdez, & Castilla, 2020).

2.2.8. Producción de Biodiesel

Actualmente, el método industrial más común para fabricar biodiésel es la transesterificación en fase homogénea. En este proceso, se emplean catalizadores homogéneos, principalmente bases o ácidos siendo los hidróxidos de sodio y potasio los más usados por su bajo costo. Sin embargo, se están desarrollando catalizadores heterogéneos más eficientes, que además de mejorar el proceso, facilitarían la recuperación y reutilización del catalizador (Cuevas & Nava, 2023).

Figura 3
Producción de biodiésel



Nota: extraído de (Cuevas & Nava, 2023).

2.3. Definición conceptual de la terminología empleada

Torque efectivo

Se refiere al par motor, que es una magnitud que genera un giro; en los motores de combustión interna, esta fuerza se origina en el instante en que ocurre la combustión, activada por la chispa de la bujía, y se trasfiere al cigüeñal a través de la biela, lo que da lugar al movimiento rotacional del sistema (Fonseca, Granizo, Castillo, & Montufar, 2022).

Rendimiento efectivo

Es la proporción entre la potencia útil generado por el motor y el producto de flujo másico de combustible con el poder calorífico inferior del mismo, lo cual permite evaluar cuánta energía del combustible se transforma en trabajo mecánico (López, Torres, Pla, Romero, & Bravo, 2021)

Regímenes de velocidad del motor

Se refiere a los diferentes niveles de giro por minuto que puede alcanzar un motor durante su funcionamiento, dependiendo de la carga aplicada y de las condiciones operativas. Estos rangos incluyen desde una velocidad mínima, hasta niveles medios y máximos cuando el motor trabaja a plena capacidad (Guerra, Morillo, Guasumba, & Guamán, 2021)

Consumo específico de combustible

Es la cuantificación real de cantidad de combustible que requiere un motor para producir una unidad de potencia durante una hora de funcionamiento, permite comparar diferentes condiciones de operación en función de su eficiencia en el uso del combustible (Taípe, Llanes, & Morales, 2021).

Eficiencia térmica del motor

Se relaciona con la compresión alcanzado dentro del cilindro, al incrementarse esta compresión, se eleva la temperatura en la cámara, lo que

favorece una combustión más intensa debido al aumento del poder energético del combustible; es decir, mayor producción de trabajo, incremento del torque y, en consecuencia, una potencia superior del motor (Fonseca, Granizo, Castillo, & Montufar, 2022)

CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO

3.1. Tipo y diseño de investigación

De acuerdo con Arias y Covinos (2021), una investigación de tipo aplicado tiene como objetivo esencial trasladar el conocimiento teórico al terreno práctico, no solo enriqueciendo el acervo científico, sino también favoreciendo de manera tangible a sectores específicos de la sociedad. Adicional a ello, sostienen que la finalidad de la investigación de tipo aplicada es resolver situaciones problemáticas a través del uso del conocimiento científico. En relación con esta perspectiva, el presente estudio se adecua al tipo aplicado, ya que se orienta a ofrecer soluciones concretas frente a la problemática técnica generada por el consumo energético de motores Diesel en distintas condiciones operacionales.

Vizcaíno et al. (2023) argumentan que el enfoque cuantitativo se caracteriza por priorizar la medición precisa y el análisis de datos numéricos, donde su método implica una recolección ordenada de información que pueda ser expresada en cifras, seguida por un procesamiento riguroso a través de técnicas estadísticas. Dicho enfoque busca la obtención de datos objetivos que permitan identificar relaciones causales y tendencias generales. El estudio sigue un enfoque cuantitativo, dado que se trabajará con datos numéricos para interpretar fenómenos vinculados al comportamiento del motor Diesel bajo distintos regímenes de velocidad.

Tal como lo expone Arias et al. (2021), los estudios descriptivos tienen como objetivo central identificar, detallar y caracterizar determinadas propiedades, comportamientos o condiciones asociadas a uno o más fenómenos; y estos se enfocan en recolectar información de cada variable en forma separada, sin manipulación directa ni intervención experimental.

En ese sentido, el nivel adoptado en esta investigación es descriptivo, dado que se pretende examinar y caracterizar el comportamiento energético del motor Diesel Caterpillar C7.1 en distintos regímenes de velocidad, identificando de manera detallada su consumo específico de combustible bajo diversas condiciones operativas; por tanto, se documentarán los procedimientos aplicados y los resultados obtenidos en su estado original.

Según Vidal (2022), el diseño experimental es característico por aplicar tratamientos controlados, administrar estímulos y comparar los resultados entre distintos escenarios, permitiendo establecer relaciones de causa y efecto con considerable certeza. Este diseño exige el manejo de condiciones externas que puedan intervenir en los resultados, así como la comparación entre grupos para validar la hipótesis.

Para el presente estudio se ha optado por un diseño experimental, ya que implica el análisis del efecto de distintos regímenes de velocidad sobre el consumo específico de combustible del motor Diesel Caterpillar C7.1

3.2. Población y muestra

Como lo define Arias et al. (2021), el término “población” alude a un grupo de elementos, ya sea finito o infinito, que comparten atributos homogéneos o similares; donde esta agrupación representa el universo de análisis del cual se pueden extraer conclusiones generalizables.

En la presente investigación, la población estuvo conformada por todas las condiciones operativas posibles del motor diésel Caterpillar C7.1, considerando su variabilidad real de funcionamiento (régimen de giro, factor de carga, consumo y temperatura de gases de escape), tal como se evidencia en los registros operativos disponibles para este modelo y su desempeño por serie.

Según Mucha et al. (2021), la muestra constituye un subconjunto reducido extraído de una población más amplia. Este grupo más pequeño comparte las características esenciales de la población total, lo que permite que sus resultados puedan ser extrapolados o utilizados para hacer inferencias sobre el conjunto completo.

La muestra se determinó mediante un muestreo probabilístico estratificado, considerando como estratos las series de los equipos (4 series), con la finalidad de garantizar representatividad de la variación operativa entre unidades. En primer lugar, el tamaño muestral se sustentó con la expresión para población finita:

$$n = \frac{NZ^2pq}{e^2(N-1) + Z^2pq}$$

donde N representa el total de equipos disponibles en el marco muestral, Z el valor asociado al nivel de confianza, e el error máximo permitido, y p y qq las proporciones esperadas; y posteriormente, la asignación muestral por estratos se estableció mediante afijación proporcional:

$$n_h = n\left(\frac{N_h}{N}\right)$$

En el presente estudio, debido a la disponibilidad de equipos con registros completos por serie, se trabajó con una unidad por estrato, conformándose una muestra total de 4 equipos (4 series); y cada unidad fue evaluada en tres regímenes de operación (1000, 1600 y 2200 rpm) para asegurar comparabilidad de desempeño energético entre series bajo condiciones representativas.

3.3. Hipótesis

La implementación de un modelo energético aplicado al motor Diesel Caterpillar C7.1 posibilita estimar con precisión el consumo específico de combustible, considerando las variaciones en los distintos regímenes de velocidad durante su funcionamiento.

3.4. Variables – Operacionalización

Variable independiente: Regímenes de velocidad del motor

En la variable independiente “regímenes de velocidad del motor” cuyas dimensiones consideradas son rango de operación de motor, condición operativa y carga aplicada.

Variable dependiente: Consumo específico de combustible

En la variable dependiente “consumo específico de combustible”, cuyas dimensiones consideradas son eficiencia energética, variación de consumo y tasa

de consumo por carga.

Además, para ambas variables se presenta los indicadores, escala de medición e instrumentos respectivos contemplados en la presente investigación

Tabla 1
Operacionalización de variables

Variables	Definición	Definición operacional	Dimensión	Indicador	Escala de medición	Instrumento
Variable independiente: Regímenes de velocidad del motor	Se refiere a los diferentes niveles de giro por minuto que puede alcanzar un motor durante su funcionamiento, dependiendo de la carga aplicada y de las condiciones operativas. Estos rangos incluyen desde una velocidad mínima, hasta niveles medios y máximos cuando el motor trabaja a plena capacidad. (Guerra et al., 2021)	Esta variable se evalúa a distintos niveles para observar su influencia sobre el consumo de combustible	Rango de operación de motor	Número de revoluciones por minuto (rpm)	Razón	Software de simulación (ANSYS)
			Condición operativa	Estado del motor (ralentí, media, alta velocidad)	Ordinal	Registro de condiciones de prueba
			Carga aplicada	Porcentaje de carga en función de la potencia máxima	Razón	Software Electronic Technician CAT
Variable dependiente: Consumo específico de combustible	Es la cuantificación real de cantidad de combustible que requiere un motor para producir una unidad de potencia durante una hora de funcionamiento, permite comparar diferentes condiciones de operación en función de su eficiencia en el uso del combustible. (Taípe et al, 2021)	Esta variable se mide mediante la cantidad de combustible que consume el motor, evaluada en función de distintos regímenes de velocidad	Eficiencia energética	Gramo por Kilovatio-hora (g/kWh)	Razón	Medidor de caudal
			Variación de consumo	Diferencia porcentual entre regímenes operativos		Hoja de cálculo (Excel)
			Tasa de consumo por carga	Gramo por minuto (g/min) por nivel de carga		Sensor de flujo de combustible

Nota: Elaboración propia.

3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

3.5.1. Técnicas de recolección de datos

Con base en el enfoque metodológico adoptado, se ha optado por implementar:

- Examen documental especializado: Se recurrió a la revisión exhaustiva de fuentes técnicas formales, seleccionando las especificaciones técnicas del motor otorgadas por el fabricante.
- Inspección visual in situ: Se realizó una observación directa en un banco de pruebas, replicando distintos regímenes de velocidad y condiciones de carga.

Observación inmediata asistida por software: Esta técnica se caracteriza por el uso directo de herramientas tecnológicas; donde para este propósito, se empleará el programa ANSYS, el cual permite realizar simulaciones computacionales con precisión aplicadas al análisis de flujo y estructural del motor.

3.5.2. Instrumentos de recolección de datos Observación

Atendiendo a los criterios de validez técnica y pertinencia metodológica, se definieron los siguientes instrumentos de trabajo, que facilitarán tanto la recolección como el procesamiento de la información:

- Especificaciones técnicas Caterpillar: Estas guías permiten llevar a cabo evaluaciones de desempeño del motor; donde entre sus aplicaciones destacan la identificación del desempeño y la capacidad estructural del motor.
- Tacómetro digital: utilizado para medir la cantidad exacta de revoluciones por minuto del motor en cada régimen de velocidad.
- Sensor de flujo: Utilizado para registrar el consumo en tiempo real del combustible.

- ANSYS: Este software especializado será empleado como principal herramienta de modelado físico; y con él se desarrollará la representación de flujo y estructural tridimensional del motor, permitiendo simular condiciones reales de carga y evaluar la respuesta global bajo distintos escenarios sísmicos.
- Microsoft Excel: Utilizado como plataforma auxiliar para el procesamiento de datos tabulados, cálculo de parámetros complementarios y organización de resultados cuantitativos derivados de las simulaciones

3.6. Procesamiento y análisis de datos

La presente investigación se sustenta en directrices normativas ampliamente reconocidas; inicialmente, se recopilarán datos experimentales de variables operativas como temperatura de admisión y escape, presión de inyección, caudal de combustible y velocidad del motor, a partir de los registros en tiempo real durante el funcionamiento en el taller de servicio.

Posteriormente, se desarrollará un modelo energético del ciclo real de funcionamiento del motor, empleando principios de la primera ley de la termodinámica y análisis de sistemas abiertos en régimen permanente. Para ello, se utilizará el software de simulación ANSYS, el cual permitirá modelar el comportamiento térmico y fluido-dinámico del motor con alta precisión. El modelo facilitará el cálculo de indicadores clave como la eficiencia térmica, el rendimiento volumétrico y el consumo específico de combustible. A través de este modelamiento, se identificarán los puntos de mayor pérdida energética y se propondrán mejoras operativas o de diseño que incrementen la eficiencia global del motor.

La autenticidad y consistencia de los datos contenidos en las especificaciones técnicas del motor utilizado en esta investigación están plenamente respaldadas, dado que la empresa fabricante del equipo de estudio cumple con los requisitos exigidos por la normativa vigente; y, por lo tanto, las especificaciones técnicas son una fuente confiable y válida para la exploración del comportamiento del motor seleccionado.

CAPÍTULO IV: ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

4.1. Datos y especificación del motor

Para llevar a cabo esta investigación, se eligió como unidad de análisis un motor Diesel Caterpillar C7.1. Este motor fue seleccionado por su amplia utilización en equipos industriales y maquinaria pesada, además de ser un referente tecnológico en el sector energético y mecánico. Es el foco principal del modelamiento energético que se propone, ya que permite examinar con precisión cómo varía el consumo específico de combustible en diferentes regímenes de velocidad.

Las especificaciones técnicas que se han considerado provienen de la información del fabricante y de los parámetros nominales de operación del motor. Estos datos son fundamentales para diseñar el modelo energético, realizar la simulación computacional y analizar los resultados experimentales. En la Tabla 2 se presentan un resumen de las características técnicas más relevantes del motor Diesel Caterpillar C7.1 que se han utilizado en este estudio

Tabla 2

Características técnicas del motor Diesel Caterpillar C7.1

Parámetro	Especificación
Potencia nominal	[según ficha técnica del C7.1]
Cilindrada	7,0 L
Número de cilindros	6 cilindros en línea
Tipo de combustible	Diésel
Régimen nominal	2200 rpm
Sistema de inyección	Inyección directa
Aspiración	Turboalimentado con posenfriador

4.2. Proceso de análisis del motor Diesel Caterpillar c7.1

Para llevar a cabo esta investigación, no fue necesario desarmar físicamente el motor Diesel Caterpillar C7.1. El enfoque del estudio se centra en el modelado energético y el análisis del consumo específico de combustible en diferentes

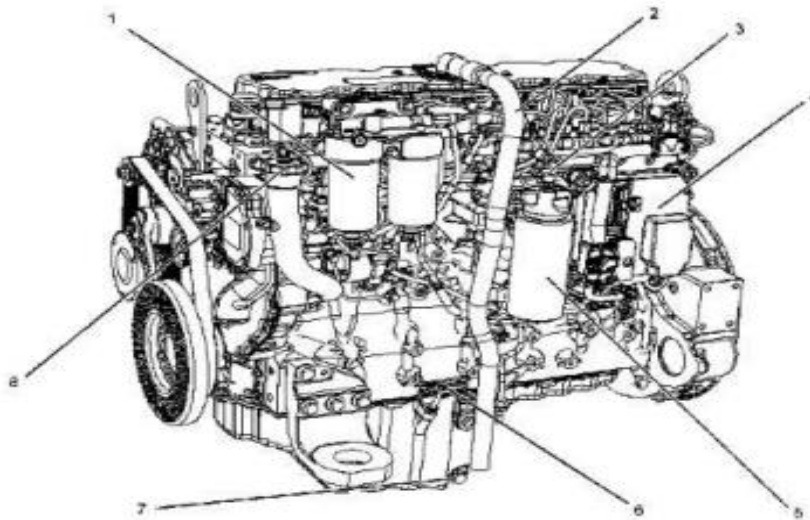
regímenes de velocidad. Por lo tanto, el análisis se realizó considerando el motor en condiciones operativas, apoyándose en la revisión de los esquemas técnicos proporcionados por el fabricante, la identificación funcional de sus componentes y la simulación computacional de su comportamiento energético.

El procedimiento utilizado permitió evaluar los principales sistemas del motor que participan en los procesos de combustión, lubricación, control electrónico y suministro de combustible, todo sin comprometer la integridad estructural del equipo. Este enfoque es coherente con los objetivos del estudio, ya que asegura condiciones reales de operación y evita las variaciones que podrían surgir del desarme mecánico.

En la Figura 4 se muestra una vista general del motor Caterpillar C7.1, que se utilizó como referencia para identificar los componentes analizados.

Figura 4

Motor C7.1



Nota: La información fue extraída de Caterpillar

- (1) Filtros de combustible secundarios
- (2) Respiradero del cárter
- (3) Válvula de muestra de aceite
- (4) Módulo de control electrónico
- (5) Filtro de aceite
- (6) Medidor de aceite
- (7) Válvula de drenaje de aceite
- (8) Tapa del tubo de llenado de aceite

4.2.1. Análisis general del motor y sus componentes principales

El análisis inicial se centró en identificar los componentes más importantes del motor Diesel Caterpillar C7.1, que desempeñan funciones específicas en el rendimiento energético del sistema. Este reconocimiento ayudó a establecer cómo se relacionan los diferentes sistemas del motor y su impacto en el consumo de combustible

Tabla 3

Componentes principales del motor Diesel Caterpillar C7.1

Ítem	Componente identificado	Función principal	Relación con el análisis energético
1	Filtros de combustible secundarios	Filtración de impurezas del combustible	Asegura una combustión eficiente
2	Presostato de presión de aceite	Control de presión del sistema de lubricación	Reduce pérdidas por fricción
3	Válvula de muestreo de aceite	Control del estado del lubricante	Permite evaluar condiciones de operación
4	Módulo de control electrónico (ECM)	Gestión del sistema de inyección y control del motor	Regula el consumo de combustible
5	Filtro de aceite	Filtración del lubricante	Mejora la eficiencia mecánica
6	Enfriador de aceite	Control térmico del lubricante	Reduce pérdidas energéticas
7	Válvula de drenaje de aceite	Mantenimiento del sistema	Garantiza estabilidad operativa
8	Tapa del tubo de llenado de aceite	Abastecimiento de lubricante	Mantiene condiciones óptimas

4.2.2. Análisis del sistema de lubricación

El sistema de lubricación del motor Diesel Caterpillar C7.1 se analizó desde una perspectiva funcional, teniendo en cuenta su impacto directo en la reducción de la fricción entre los componentes móviles y, por lo tanto, en la eficiencia energética del motor. Este análisis permitió evaluar cómo el control de la presión, la filtración y la temperatura del aceite contribuyen a un funcionamiento estable en los diferentes regímenes de velocidad.

Tabla 4

Proceso de análisis del sistema de lubricación

Paso	Actividad realizada	Descripción
Paso 1	Identificación del circuito de lubricación	Revisión del recorrido del aceite en el motor
Paso 2	Evaluación de presión de aceite	Análisis de valores nominales de operación
Paso 3	Análisis del filtrado de aceite	Verificación de eficiencia del filtro
Paso 4	Evaluación del enfriador de aceite	Análisis del control térmico del lubricante
Paso 5	Relación con pérdidas mecánicas	Estimación de impacto en la eficiencia energética

4.2.3. Análisis del sistema de alimentación e inyección de combustible

El sistema de alimentación e inyección fue evaluado por su papel crucial en el consumo de combustible. Se llevó a cabo un análisis que tuvo en cuenta la interacción entre el sistema de inyección y el módulo de control electrónico, que se encarga de regular el suministro de combustible de acuerdo con la velocidad del motor.

Tabla 5*Proceso de análisis del sistema de inyección de combustible*

Paso	Actividad realizada	Descripción
Paso 1	Identificación del sistema de suministro	Revisión de líneas de alimentación y retorno
Paso 2	Análisis del control electrónico	Evaluación de parámetros gestionados por el ECM
Paso 3	Estudio del proceso de inyección	Análisis del tiempo y cantidad de combustible
Paso 4	Relación con el régimen de velocidad	Evaluación del consumo a distintos rpm
Paso 5	Impacto en el consumo específico	Identificación de condiciones de mayor eficiencia

4.2.4. Análisis del sistema de control electrónico

El módulo de control electrónico (ECM) fue analizado como el elemento central de gestión del motor Diesel Caterpillar C7.1. Este sistema regula de manera automática el funcionamiento del motor, ajustando variables críticas que influyen directamente en el consumo energético.

Tabla 6*Proceso de análisis del sistema de control electrónico*

Paso	Actividad realizada	Descripción
Paso 1	Identificación de variables controladas	Velocidad, inyección y parámetros operativos
Paso 2	Evaluación del comportamiento dinámico	Respuesta del motor ante cambios de rpm
Paso 3	Relación ECM–consumo	Análisis del impacto en el consumo específico
Paso 4	Integración con el modelo energético	Uso de datos para simulación computacional

4.3. Cálculos para la simulación

Para llevar a cabo la simulación del motor Diesel Caterpillar C7.1, fue fundamental identificar un conjunto de parámetros clave relacionados con el proceso de combustión. Esto incluye aspectos como la presión que ejercen los gases, la temperatura de operación y las características geométricas del motor. Estos factores son esenciales para estimar los niveles de deformación y esfuerzo en los componentes que se están analizando. Además, se tomaron en cuenta parámetros de tipo geométrico, químico y termodinámico, tanto para el diésel convencional ζ , con el objetivo de evaluar su rendimiento dentro del modelo energético.

4.3.1. Proceso para los cálculos geométricos

Los cálculos geométricos se llevaron a cabo utilizando las dimensiones nominales del motor Caterpillar C7.1, que fueron obtenidas de la información técnica proporcionada por el fabricante. Estos datos sirvieron como insumo para la simulación computacional. Con estos parámetros, se puede caracterizar el volumen de trabajo del motor, lo que sienta las bases para un análisis termodinámico más detallado.

En la Tabla 7 se presentan los principales parámetros geométricos utilizados en el modelamiento

Tabla 7

Parámetros geométricos principales del motor Diesel Caterpillar C7.1

Parámetro	Valor
Diámetro del pistón (cm)	9.84
Carrera del pistón (cm)	12.85
Número de cilindros	6

A partir de estos datos, se procedió a calcular el volumen unitario del cilindro, empleando la ecuación:

$$V_u = A_p \cdot L = \frac{\pi d^2}{4} \cdot L$$

Donde:

- V_u = Volumen unitario del cilindro (cm³)
- A_p = Área del pistón (cm²)
- d = Diámetro del pistón (cm)
- L = Carrera del pistón (cm)

Posteriormente, la cilindrada total del motor se determinó considerando el número total de cilindros, según la ecuación:

$$V_t = n \cdot V_u$$

Donde:

- V_t = Cilindrada total del motor (cm³)
- n = Número de cilindros

Asimismo, la relación de compresión del motor se estimó a partir de la relación entre el volumen unitario del cilindro y el volumen de la cámara de combustión, de acuerdo con la ecuación [2.3].

$$R_c = \frac{V_u + V_c}{V_c}$$

Donde:

- R_c = Relación de compresión (adimensional)
- V_c = Volumen de la cámara de combustión (cm³)

El volumen de la cámara de combustión se determinó utilizando valores técnicos de referencia que se han reportado en estudios anteriores y en documentación especializada. Se evitó realizar mediciones directas, ya que el motor no fue intervenido físicamente.

➤ **Resultados de los cálculos geométricos**

Aplicando las ecuaciones descritas anteriormente, se obtuvieron los

siguientes resultados:

- **Área del pistón**

$$A_p = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi (9.84 \text{ cm})^2}{4}$$
$$A_p = 76.04 \text{ cm}^2$$

Volumen unitario del cilindro

$$V_u = \frac{\pi (9.84 \text{ cm})^2}{4} \cdot (12.85 \text{ cm})$$
$$V_u = 977.80 \text{ cm}^3$$

Cilindrada total del motor

$$V_t = 6 \cdot 977.80$$
$$V_t = 5866.80 \text{ cm}^3$$

Relación de compresión

$$R_c = 16$$

Estos valores fueron incorporados como parámetros geométricos base dentro del modelo de simulación energética

4.3.2. Proceso para los cálculos químicos

El análisis químico se llevó a cabo teniendo en cuenta la composición elemental de los combustibles que se evaluaron, en particular el diésel convencional y el biodiésel B10. Estos valores son clave para determinar la cantidad teórica de aire necesaria para la combustión, así como los productos que se generan durante este proceso

En la Tabla 8 se muestra la composición química empleada para ambos combustibles

Tabla 8*Composición química del diésel*

Elemento	Diésel (kg)
C	0.8511
H	0.1458
O _c	0.0020

A partir de estos valores se calculó la cantidad teórica de aire requerida para la combustión, tanto en kilogramos como en kilomoles, mediante las ecuaciones:

$$I_o = \frac{1}{0.23} \left(\frac{8}{3} C + 8H - O_c \right)$$

$$L_o = \frac{1}{0.21} \left(\frac{C}{12} + \frac{H}{4} - \frac{O_c}{32} \right)$$

Posteriormente, se determinó la cantidad real de aire suministrado, considerando un coeficiente de exceso de aire $\alpha = 1.4$, conforme a la literatura especializada.

$$M_1 = \alpha \cdot L_o$$

La cantidad de productos de la combustión se estimó mediante la ecuación:

$$M_2 = \frac{C}{12} + \frac{H}{2} + 0.79L_o + (\alpha - 1)L_o$$

Finalmente, se calculó el coeficiente teórico de variación molecular, utilizando la ecuación:

$$\mu_o = \frac{M_2}{M_1}$$

4.3.2.1. Cálculos químicos con diésel

Aplicando las ecuaciones anteriores a la composición del diésel, se obtuvieron los siguientes resultados:

- Cantidad teórica de aire: 14.93 kg
- Cantidad teórica de aire: 0.516 kmol
- Cantidad total de aire: 0.722 kmol/kg
- Productos de la combustión: 0.757 kmol/kg
- Coeficiente de variación molecular: $\mu_o = 1.049$

4.3.3. Procesos de cálculos termodinámicos

Para simular el rendimiento energético del motor Diesel Caterpillar C7.1, nos enfocamos en los cálculos termodinámicos que nos ayudan a determinar la presión y la temperatura del gas en las diferentes etapas del ciclo de funcionamiento del motor. Estas variables son fundamentales para analizar el proceso de combustión, ya que dependen directamente de las propiedades físico-químicas del combustible utilizado y de las condiciones operativas del motor.

En este apartado, consideramos tanto el uso de diésel convencional como de biodiésel B10, lo que nos permitió evaluar las variaciones termodinámicas que cada tipo de combustible genera dentro del modelo energético del motor Caterpillar C7.1

4.3.3.1. Presión y temperatura de admisión

La presión al final del proceso de admisión se calculó utilizando la ecuación, que tiene en cuenta las pérdidas de carga del sistema de admisión y la velocidad del aire que entra al cilindro. Para el motor Diesel Caterpillar C7.1, los parámetros iniciales se fijaron dentro de los rangos que se han reportado en la literatura técnica para motores diésel con características similares

$$P_a = P_0 - (\beta^2 - \xi) \frac{\rho_0 w_{ad}^2}{2} \cdot 10^{-6}$$

Donde:

- P_a = Presión al final de la admisión (MPa)

- P_0 = Presión de ingreso del aire (Pa)
- w_{ad} = Velocidad del aire de admisión (m/s)
- ρ_0 = Densidad del aire (kg/m³)
- $(\beta^2 - \xi)$ = Resistencia del sistema de admisión (adimensional)

La densidad del aire se calculó mediante la ecuación [2.10], considerando condiciones ambientales estándar.

$$\rho_0 = \frac{P_0}{R \cdot T_0}$$

Donde:

- T_0 = Temperatura inicial del aire (K)
- R = Constante de los gases (N·m·kg⁻¹·K⁻¹)

Para el motor Caterpillar C7.1, se establecieron valores de presión y temperatura inicial que reflejan condiciones reales de operación. Además, se estimó la presión de los gases residuales como una fracción de la presión de admisión, y se consideró que la temperatura de estos gases se encuentra dentro de un rango típico para motores diésel de mediana potencia.

La temperatura al final de la admisión se calculó usando la ecuación a continuación, teniendo en cuenta el efecto del coeficiente de gases residuales y el aumento de temperatura debido a la transferencia de calor.

$$T_a = \frac{T_0 + \Delta T + \gamma_r T_r}{1 + \gamma_r}$$

El coeficiente de gases residuales se obtuvo mediante la expresión:

$$\gamma_r = \frac{T_0 + \Delta T}{T_r} \cdot \frac{P_r}{\varepsilon P_a - P_r}$$

Donde:

- T_a = Temperatura al final de la admisión (K)
- T_r = Temperatura de los gases residuales (K)
- P_r = Presión de los gases residuales (MPa)
- ε = Relación de compresión
- γ_r = Coeficiente de gases residuales

4.3.3.2. Presión y temperatura de compresión

El proceso de compresión se estudió teniendo en cuenta el comportamiento politrópico del gas. En el caso del motor Diesel Caterpillar C7.1, se eligió un coeficiente politrópico de compresión que se encuentra dentro del rango recomendado para motores diésel de inyección directa

La presión al final de la compresión se calculó con la ecuación:

$$P_c = P_a \varepsilon^{n_1}$$

Mientras que la temperatura al final de la compresión se obtuvo mediante la ecuación:

$$T_c = T_a \varepsilon^{(n_1-1)}$$

Donde:

- P_c = Presión al final de la compresión (MPa)
- T_c = Temperatura al final de la compresión (K)
- n_1 = Coeficiente politrópico de compresión

4.3.3.3. Presión y temperatura de combustión

Para determinar la temperatura de combustión T_z , se empleó un balance energético que considera el poder calorífico del combustible, la energía interna del aire y de los productos de combustión, así como los coeficientes de aprovechamiento térmico y elevación de presión.

$$\frac{H_u}{M_1(1 + \gamma_r)} + \frac{\mu_c + \gamma_r \mu_r}{1 + \gamma_r} + 8.314T_c = \mu_z + 8.314T_z$$

Previo a la aplicación de esta ecuación, se calcularon los términos de energía interna mediante las expresiones:

$$\mu_c = \mu_{cv} \cdot T_c$$

$$\mu'_z = (\mu'_z)_{\alpha=1} \left(\frac{M_{z(\alpha=1)}}{M_z} \right) + \mu_r \left(\frac{(\alpha - 1)L_0}{M_z} \right)$$

Los valores de calor específico y energía interna se obtuvieron por interpolación, en función de la temperatura de compresión, utilizando datos reportados en la literatura técnica.

Tabla 9

Valores de μ_{cv} y $(\mu'_z)_{\alpha=1}$ a distintas temperaturas

Temperatura (°C)	μ_{cv} (kJ/kmol·°C)	$y (\mu'_z)_{\alpha=1}$ (MJ/kmol)
600	22,090	14,770
700	22,408	17,585
800	22,713	20,390

Fuente: Jövaaj (1982).

El coeficiente real de variación molecular se determinó mediante la ecuación:

$$\mu_r = \frac{\mu_0 + \gamma_r}{1 + \gamma_r}$$

Finalmente, la presión de combustión se calculó mediante la ecuación [2.19]:

$$P_z = \sigma \cdot \mu_r \cdot \frac{T_z}{T_c} \cdot P_c$$

4.3.3.4. Presión y temperatura de expansión

El proceso de expansión se analizó considerando el coeficiente preliminar de expansión y el grado de expansión posterior. Estos parámetros se calcularon con las ecuaciones:

$$\rho = \frac{\mu_r T_z}{\lambda T_c}$$

$$\delta = \frac{\varepsilon}{\rho}$$

Posteriormente, se determinó la temperatura y presión al final de la expansión mediante las ecuaciones:

$$T_b = T_z \left(\frac{1}{\delta^{n_2-1}} \right)$$

$$P_b = \frac{P_z}{\delta^{n_2}}$$

Donde n_2 representa el coeficiente politrópico de expansión.

4.3.3.5. Parámetros establecidos para el motor Caterpillar C7.1

Los parámetros utilizados en los cálculos termodinámicos fueron seleccionados de acuerdo con rangos técnicos reportados para motores diésel de similares características al Caterpillar C7.1, priorizando condiciones reales de operación.

Tabla 10

Parámetros asignados para los cálculos termodinámicos del motor Diesel Caterpillar C7.1

Variable	Unidad	Mín.	Máx.	Asignado
Presión de ingreso de aire P_0	MPa	–	–	0.10
Presión de gases residuales P_r	MPa	$P_0(1.10)$	$P_0(1.25)$	0.11
Temperatura inicial de admisión T_0	K	–	–	293
Temperatura de gases residuales T_r	K	700	900	795
Resistencia del sistema de admisión $\beta^2 - \varepsilon$	–	2.5	4.0	3.2
Velocidad del aire de admisión ω_{ad}	m/s	50	130	88
Variación de temperatura ΔT	°C	20	40	30
Coeficiente politrópico de compresión n_1	–	1.32	1.40	1.38
Factor de elevación de presión λ	–	1.40	2.20	1.80
Coeficiente de aprovechamiento de calor σ	–	0.70	0.85	0.82
Coeficiente politrópico de expansión n_2	–	1.24	1.28	1.28
Poder calorífico diésel H_u	MJ/kg	–	–	45.67
Poder calorífico biodiésel B10 H_u	MJ/kg	–	–	44.61

4.4. Modelado del conjunto móvil

Se utilizó la herramienta de diseño conocida como SOLIDWORKS para modelar las piezas basándonos en las medidas que habíamos tomado previamente. Luego, exportamos la geometría para su simulación. A continuación, se detallan las herramientas que utilizamos para el dibujo en 3D de los mecanismos del conjunto móvil.

4.4.1. Modelado del pistón

El modelado geométrico del pistón para el motor diésel Caterpillar C7.1 se llevó a cabo utilizando las dimensiones técnicas necesarias para asegurar que el componente se represente con precisión en el entorno de simulación. Un modelado adecuado es clave para garantizar la fiabilidad de los resultados en el análisis estructural y termodinámico, ya que afecta directamente la distribución de esfuerzos, deformaciones y la transferencia de calor durante el funcionamiento del motor.

Las dimensiones utilizadas fueron obtenidas de información técnica de referencia y parámetros geométricos que se alinean con las características del motor Caterpillar C7.1. Estas dimensiones se emplearon luego para crear el modelo tridimensional del pistón en el software de simulación. En la Tabla 11 se muestran las principales medidas que se consideraron para el desarrollo del modelo.

Tabla 11

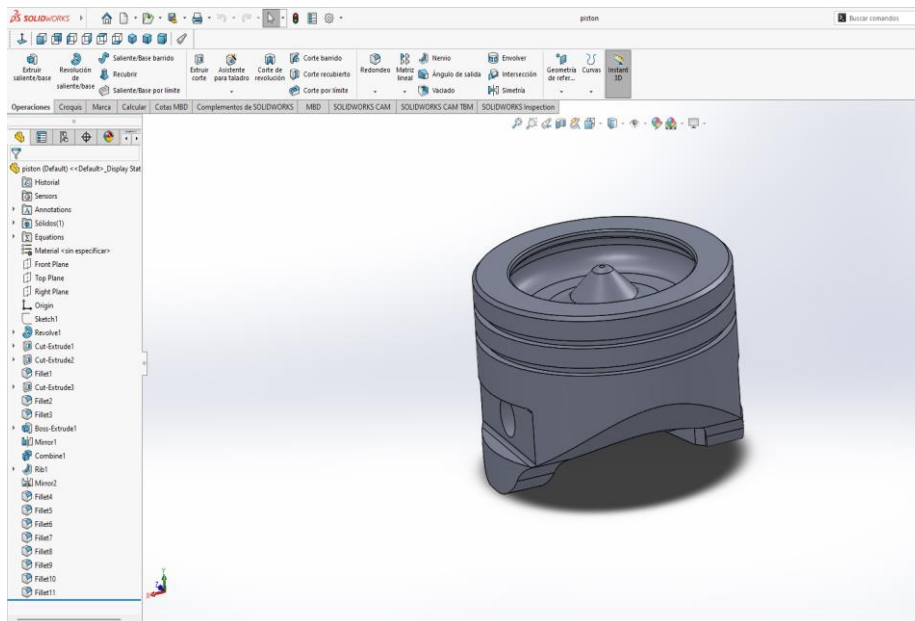
Dimensiones geométricas del pistón del motor diésel Caterpillar C7.1

Medida	Unidad (mm)
Diámetro del pistón	98,42
Longitud total	102
Diámetro del alojamiento de segmentos	88,42
Espesor del segmento de compresión 1	4,00
Espesor del segmento de compresión 2	2,50
Espesor del segmento de aceite	5,00
Diámetro del alojamiento del pasador (pin)	36
Diámetro de la cámara de combustión	55
Profundidad de la cámara de combustión	24

Estas dimensiones permitieron generar un modelo sólido del pistón que reproduce de manera adecuada su geometría real, asegurando condiciones representativas para la simulación de cargas térmicas y mecánicas generadas durante el ciclo de combustión del motor Caterpillar C7.1.

Figura 5

Modelado del pistón



4.4.2. Modelado de la biela

El modelado geométrico de la biela del motor diésel Caterpillar C7.1 se llevó a cabo con el objetivo de representar este componente de manera precisa en un entorno de simulación tridimensional. La biela es un elemento clave en el conjunto móvil del motor, ya que se encarga de transmitir las fuerzas generadas durante la combustión desde el pistón hasta el cigüeñal. Por eso, tener una definición geométrica adecuada es crucial para analizar los esfuerzos y las deformaciones.

Las dimensiones utilizadas para el modelado se basaron en información técnica que coincide con las características del motor Caterpillar C7.1. Estas dimensiones sirvieron como parámetros de entrada para crear el modelo 3D utilizando software de diseño asistido por computadora. En la Tabla 12 se resumen las principales medidas que se consideraron para desarrollar el modelo geométrico de la biela.

Tabla 12

Dimensiones geométricas de la biela del motor diésel Caterpillar C7.1

Medida	Unidad (mm)
Longitud total	97
Ancho	44
Alto	250
Radio del alojamiento hacia el cigüeñal	34
Diámetro para pernos	11
Diámetro del pie de biela	40

Figura 6

Tapa de la biela

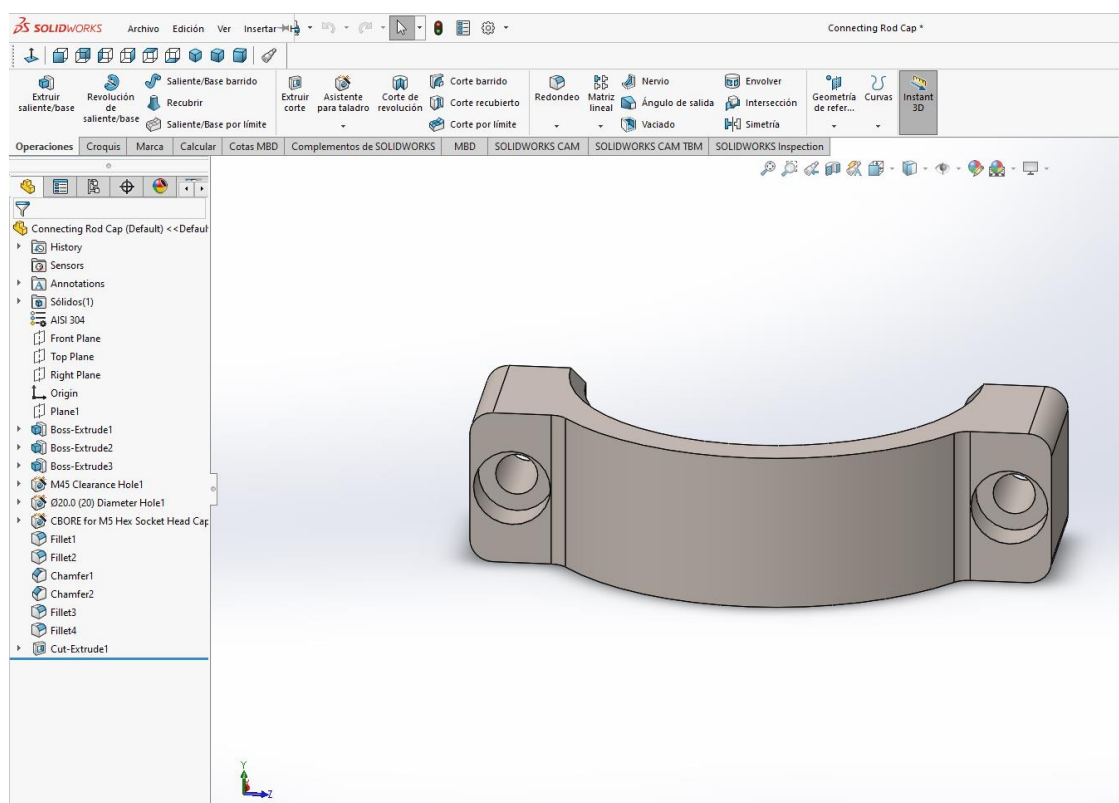


Figura 7

Cuerpo de la biela

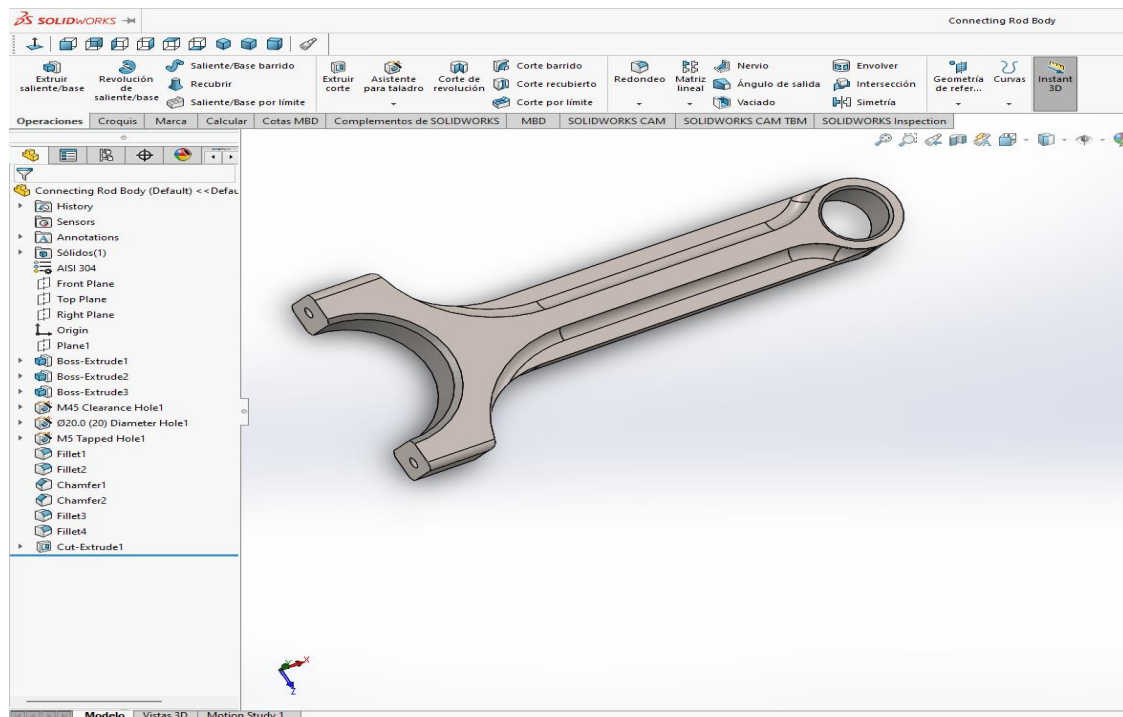


Figura 8

Rodela

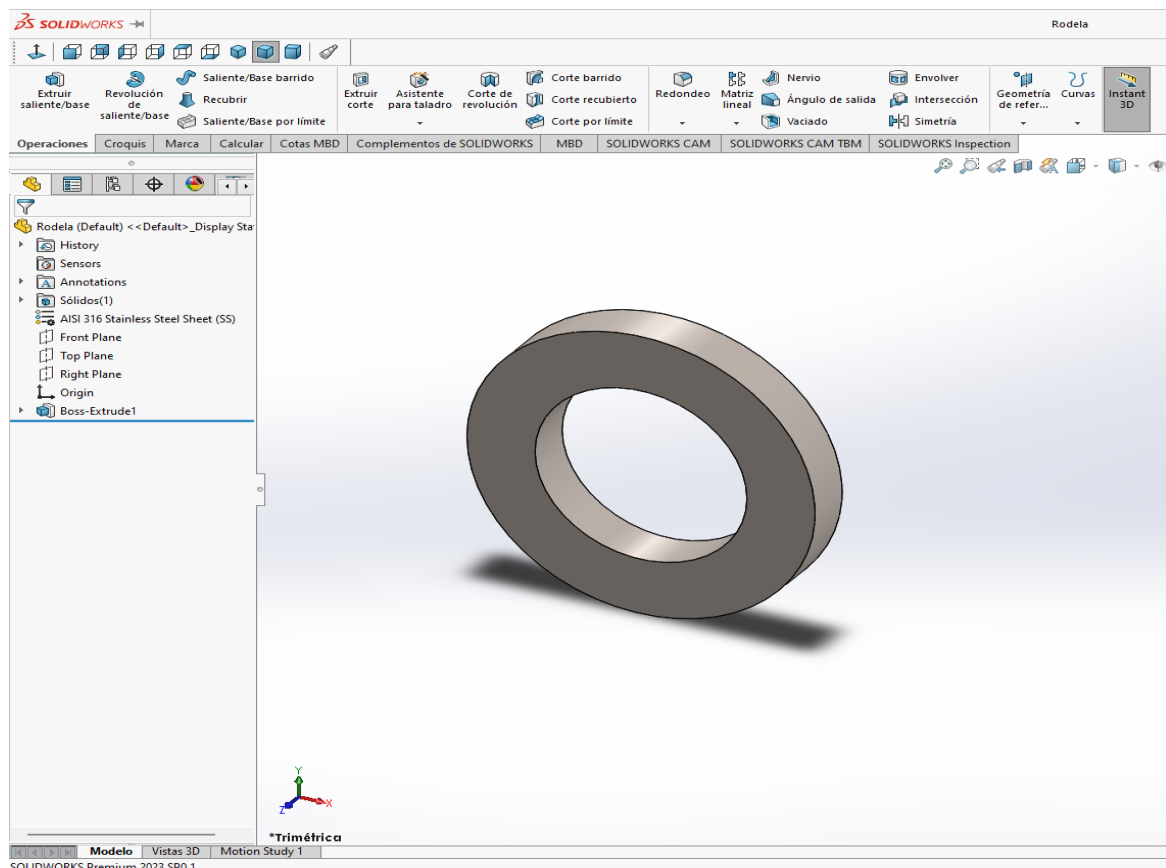
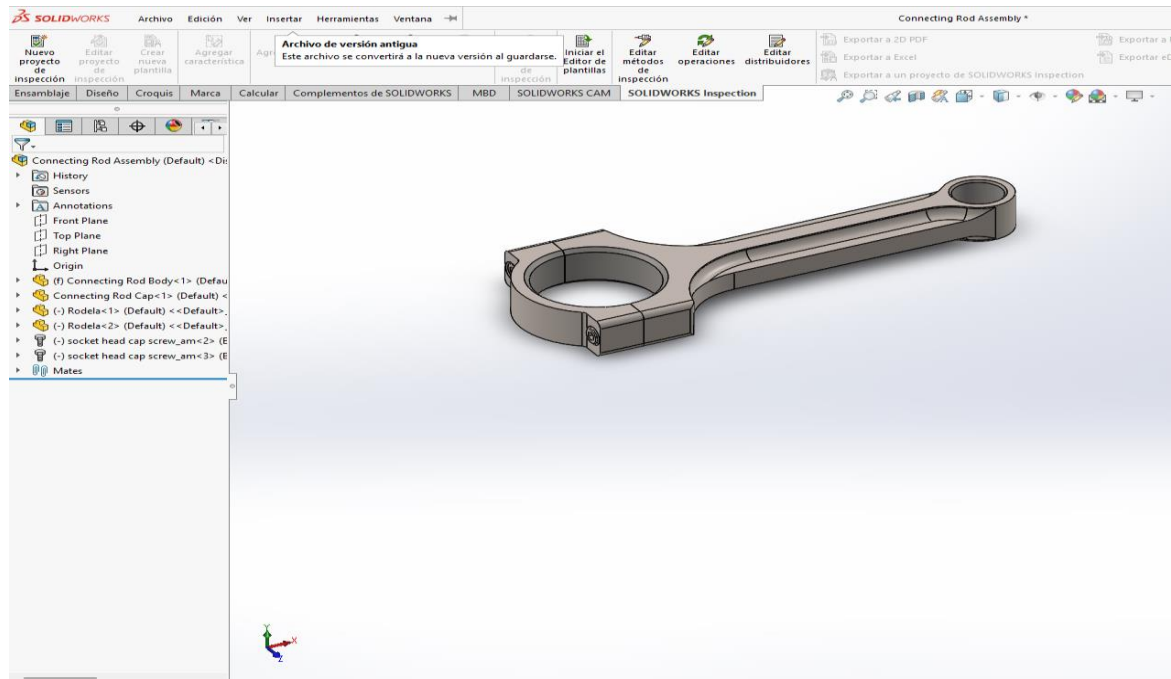


Figura 9

Ensamblaje de la biela



4.4.3. Modelado del cigüeñal

El modelado geométrico del cigüeñal del motor diésel Caterpillar C7.1 se llevó a cabo con el objetivo de representar de manera precisa uno de los componentes más críticos del sistema móvil del motor. Este componente es clave, ya que convierte el movimiento alternativo del pistón en un movimiento rotacional continuo. Tener una definición geométrica adecuada del cigüeñal es esencial para evaluar correctamente los esfuerzos, las deformaciones y el comportamiento dinámico durante el ciclo de funcionamiento del motor.

Las dimensiones utilizadas para el modelado se establecieron a partir de parámetros geométricos que son compatibles con las características del motor Caterpillar C7.1. Estos datos sirvieron como base para construir el modelo tridimensional utilizando software de diseño asistido por computadora. En la Tabla 13, se presentan las principales medidas que se consideraron para el desarrollo del modelo del cigüeñal.

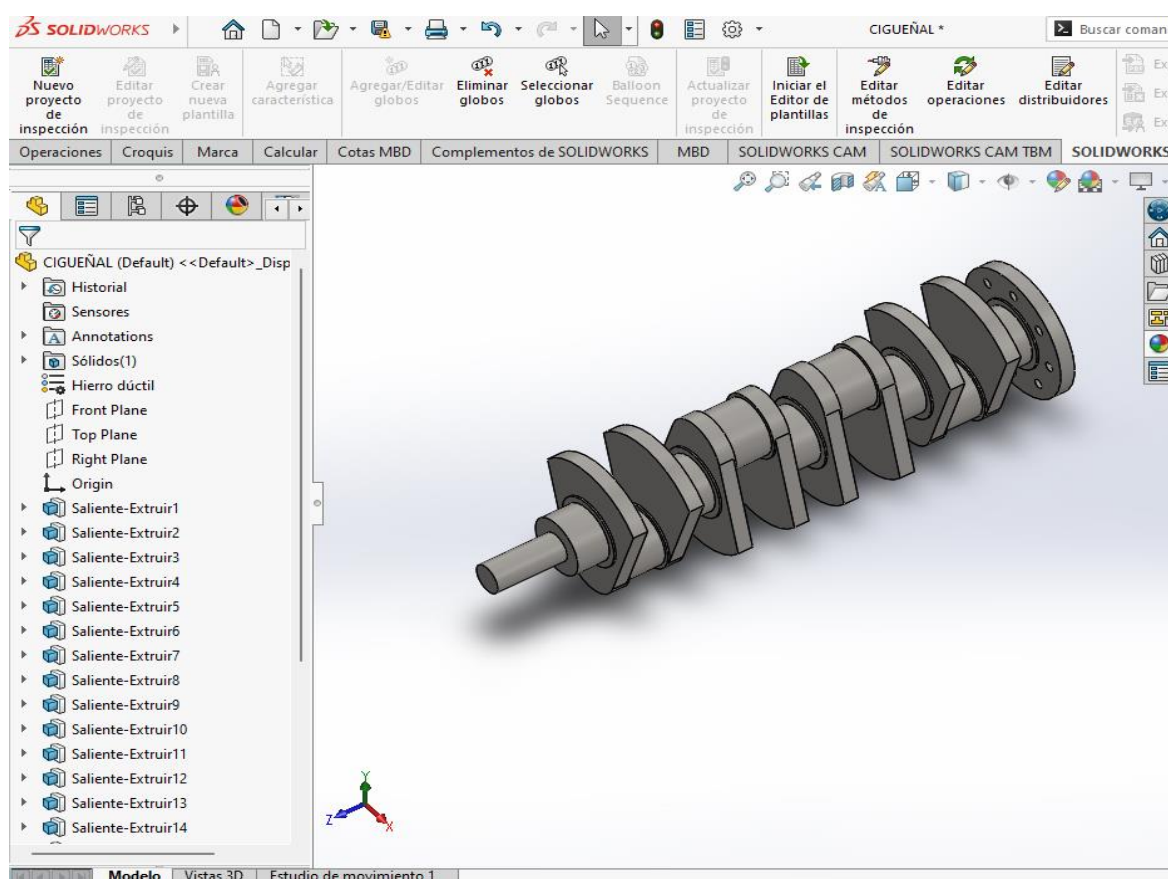
Tabla 13

Dimensiones geométricas del cigüeñal del motor diésel Caterpillar C7.1

Medida	Unidad (mm)
Diámetro del codo de apoyo	81
Diámetro del codo de biela	64
Ancho del codo de apoyo	32
Ancho del codo de biela	40
Longitud total del cigüeñal	519

Figura 10

Modelado del cigüeñal



4.4.4. Modelado del ventilador de enfriamiento

El ventilador de enfriamiento que acompaña al motor diésel Caterpillar C7.1 fue diseñado para representar el componente que ayuda a disipar el calor producido durante la combustión y el funcionamiento continuo del motor. Este elemento es

fundamental en el sistema de enfriamiento, ya que juega un papel clave en el control de la temperatura de operación y en la estabilidad térmica del motor en su conjunto.

El modelado geométrico del ventilador se llevó a cabo en el software SOLIDWORKS, utilizando herramientas de croquis, extrusión, revolución y patrones circulares. Esto permitió definir con gran precisión la carcasa, el impulsor y los elementos de fijación. Además, se optó por una geometría simplificada de algunos detalles secundarios para optimizar el tiempo de simulación, sin sacrificar la representatividad del componente en los análisis posteriores

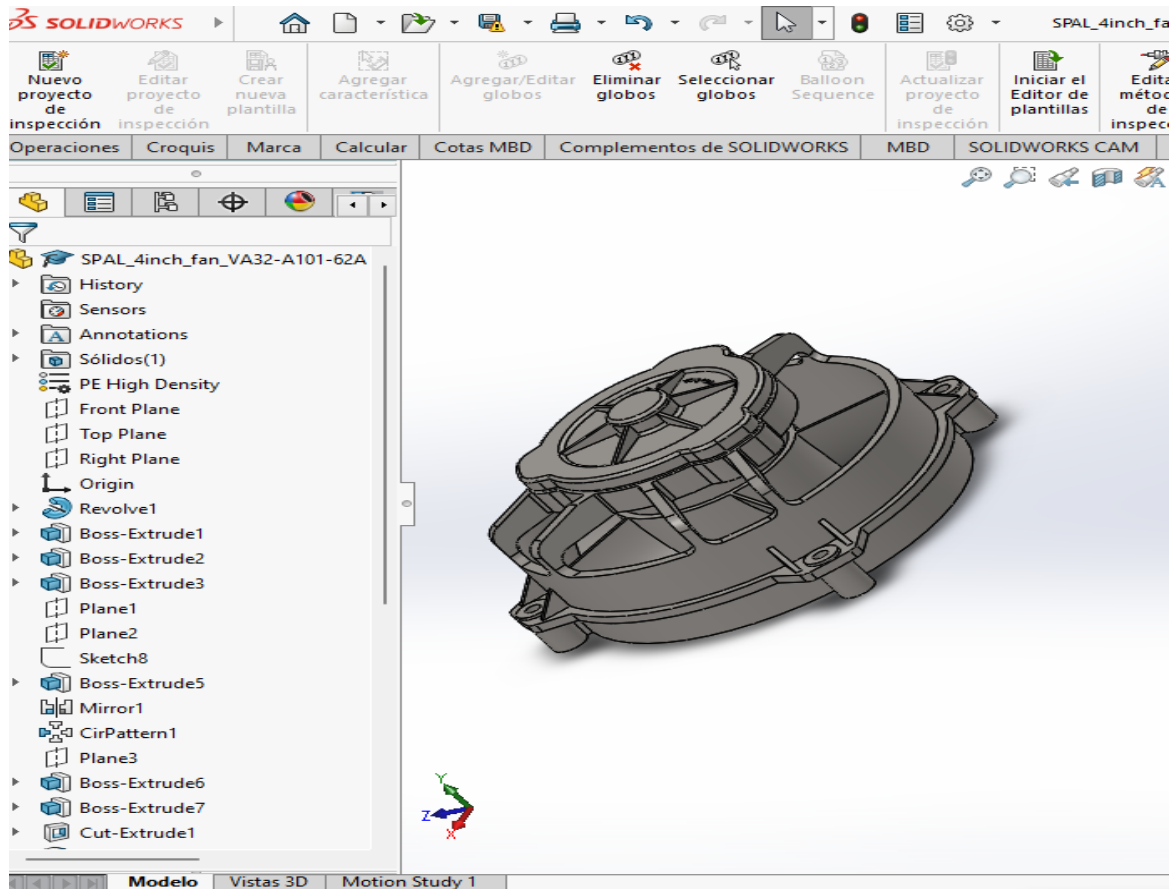
Tabla 14

Dimensiones geométricas del ventilador de enfriamiento del motor diésel Caterpillar C7.1

Medida	Unidad (mm)	Valor simulado
Diámetro exterior del ventilador	mm	620
Diámetro del cubo central	mm	95
Espesor del cubo	mm	42
Número de aspas	–	9
Longitud radial de las aspas	mm	260
Espesor promedio de las aspas	mm	6
Ángulo de inclinación de las aspas	°	32
Diámetro del orificio de acople al eje	mm	35
Espesor del aro exterior	mm	10
Altura total del conjunto	mm	78

Figura 11

Modelado del ventilador de enfriamiento



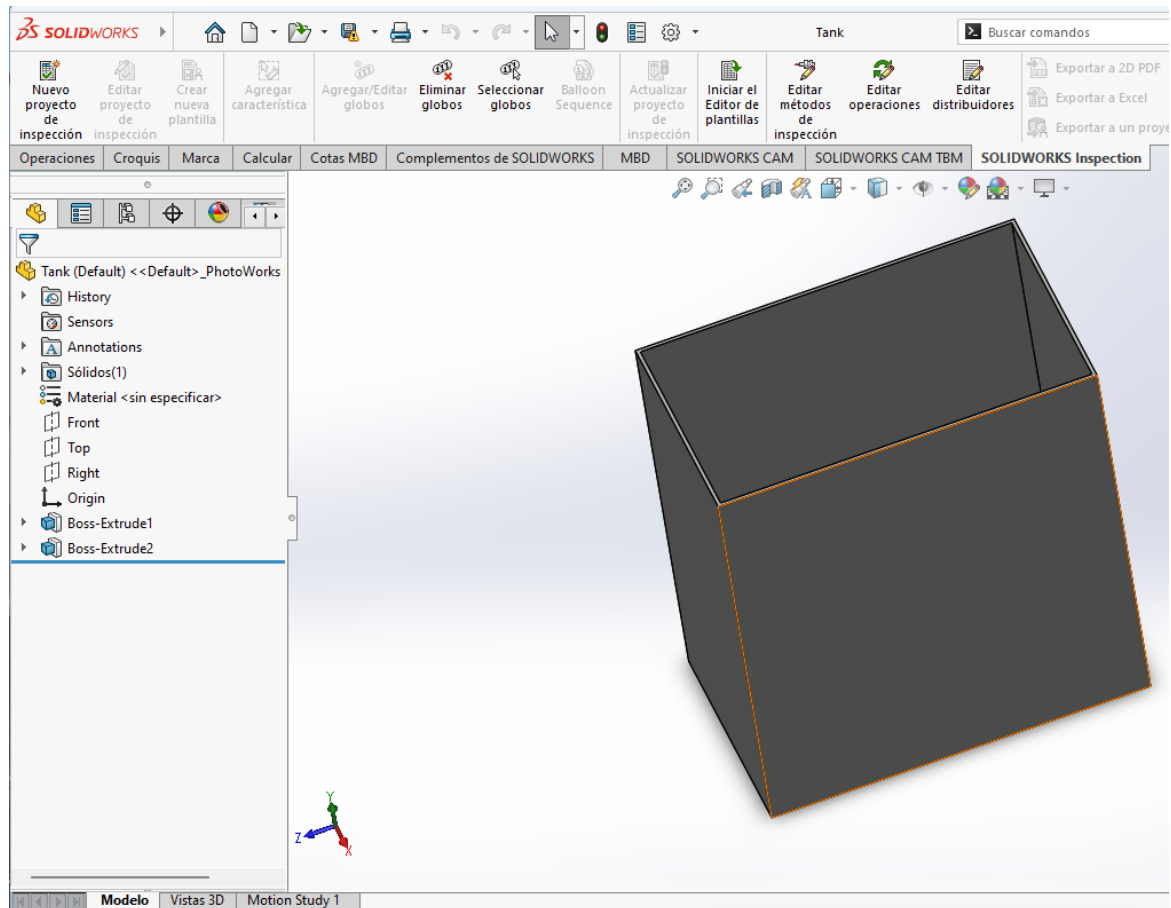
4.4.5. Modelado del tanque de fluido

El tanque de fluido que se ve en la Figura 12 fue diseñado en SOLIDWORKS con el objetivo de representar el sistema de almacenamiento auxiliar que acompaña al motor diésel Caterpillar C7.1. Este componente es esencial, ya que se encarga de almacenar el fluido necesario para que el sistema acoplado funcione correctamente, asegurando un suministro constante durante el proceso de simulación.

Para el modelado geométrico, se utilizaron operaciones de extrusión sólida a partir de croquis rectangulares, optando por una geometría prismática simplificada. Esta simplificación ayuda a disminuir la complejidad computacional sin comprometer el rendimiento funcional del conjunto en el análisis.

Figura 12

Modelado tridimensional del tanque de fluido del sistema auxiliar del motor Caterpillar C7.1.



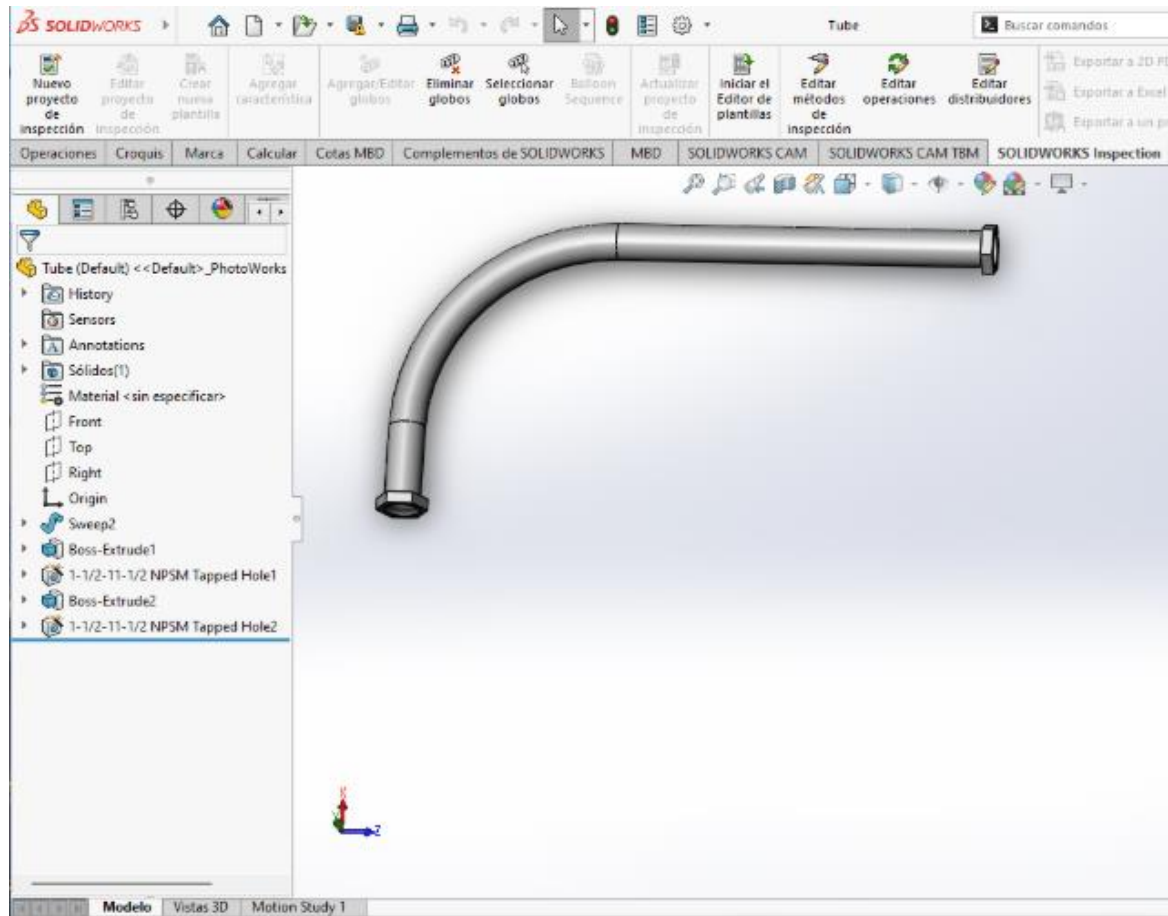
4.4.6. Modelado del tubo de conducción

En la Figura X, puedes ver el modelo tridimensional del tubo de conducción, que es parte del sistema que transporta el fluido en el conjunto auxiliar del motor Caterpillar C7.1. Este componente es clave porque conecta el tanque, el sistema de filtrado y los elementos de impulsión.

El tubo fue creado usando la herramienta Sweep de SOLIDWORKS, donde se definió una trayectoria curva con secciones circulares constantes. Además, se añadieron roscas normalizadas en los extremos para simular las uniones mecánicas que se encuentran en el sistema real.

Figura 13

Modelado del tubo de conducción del sistema auxiliar del motor Caterpillar C7.1.



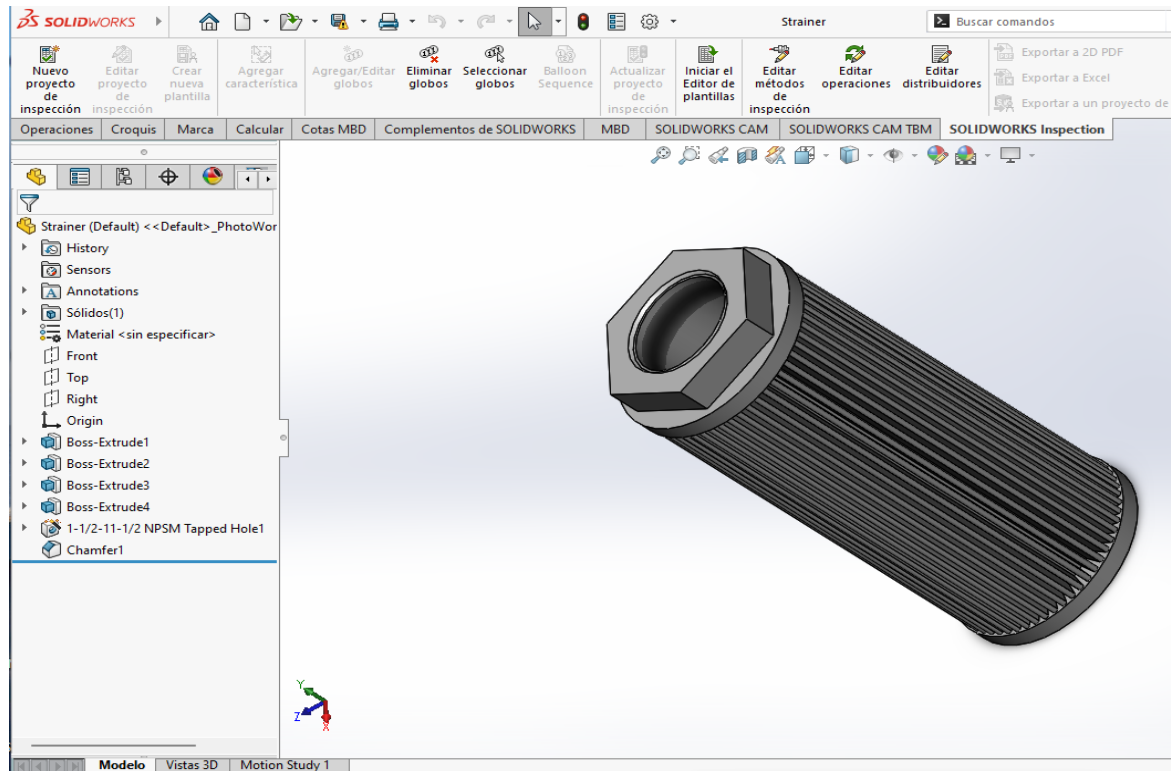
4.4.7. Modelado del colador o filtro primario (Strainer)

La Figura 14 ilustra el diseño del colador o filtro primario, que tiene la importante tarea de atrapar las partículas sólidas que se encuentran en el fluido antes de que este entre al sistema de impulsión. Este componente es fundamental para proteger los elementos internos del motor Caterpillar C7.1.

El modelo se creó utilizando extrusiones cilíndricas y patrones longitudinales que reflejan el cuerpo ranurado del filtro. Para la simulación, se dio prioridad a la geometría externa y las conexiones, dejando de lado los detalles microscópicos del elemento filtrante

Figura 14

Modelado del colador (strainer) del motor Caterpillar C7.1.



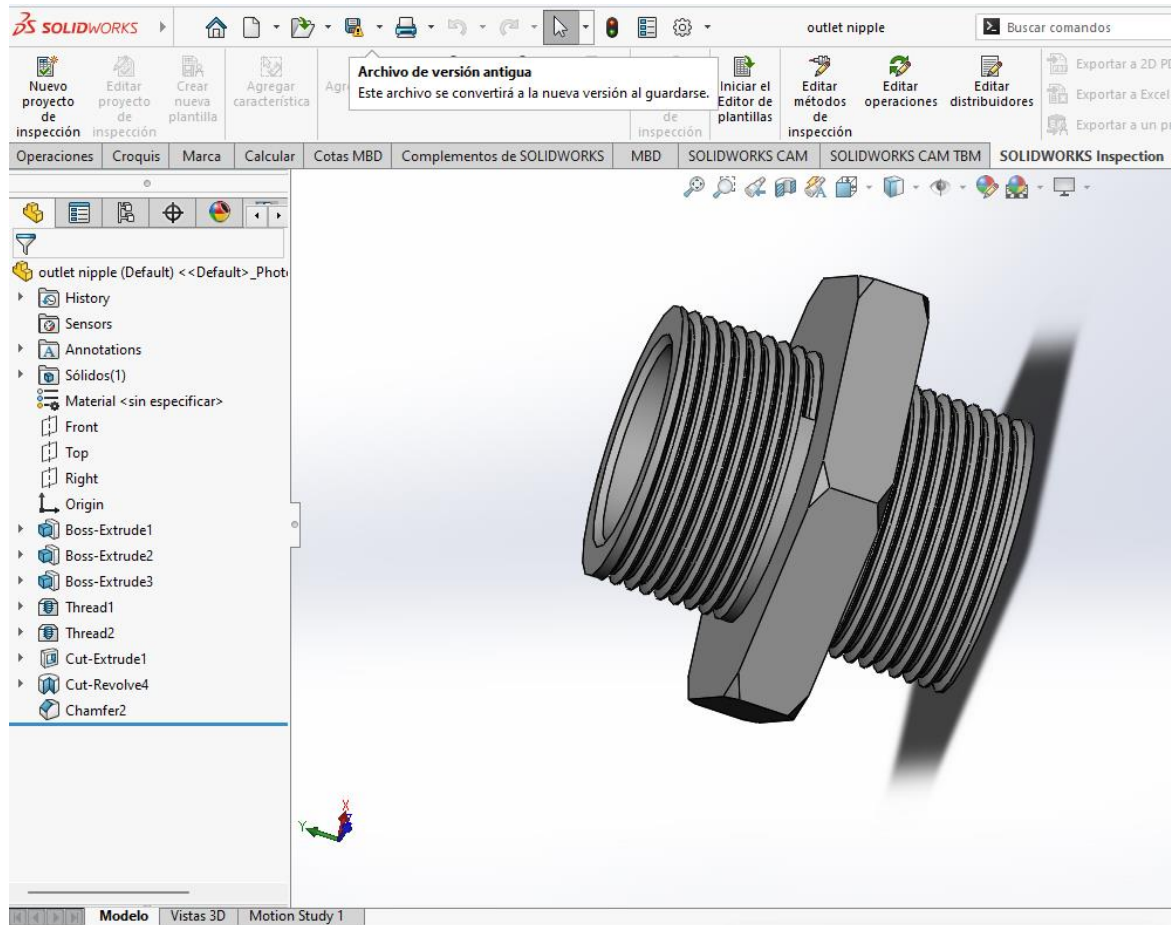
4.4.8. Modelado del niple de salida

En la Figura 15, podemos ver el niple de salida, que es el componente que facilita la conexión roscada entre el tubo de conducción y los otros elementos del sistema. Este tipo de accesorio es bastante común en los sistemas auxiliares de motores diésel industriales, como el Caterpillar C7.1.

El modelado se llevó a cabo a través de operaciones de revolución y extrusión, incluyendo roscas externas normalizadas que garantizan la compatibilidad geométrica durante el ensamblaje virtual.

Figura 15

Modelado del niple de salida del motor Caterpillar C7.1.



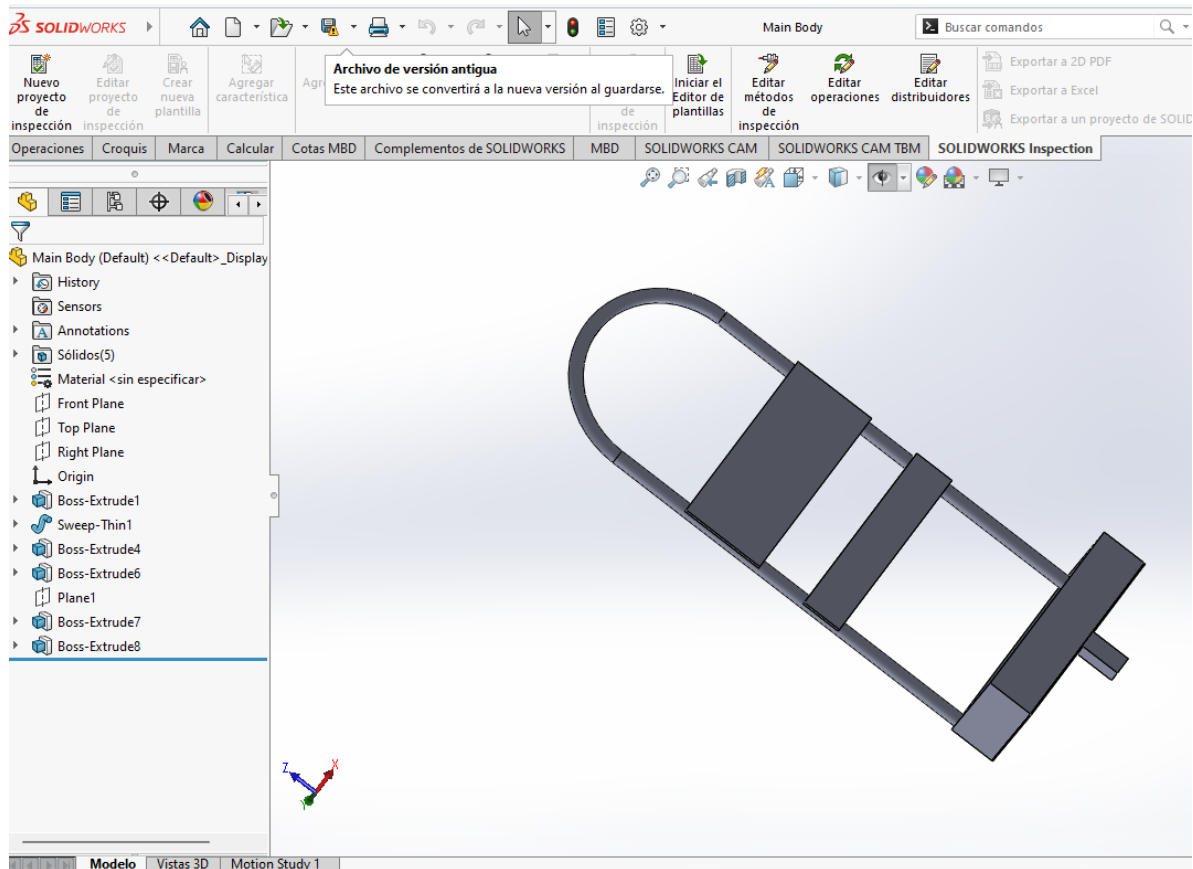
4.4.9. Modelado de la estructura principal del sistema auxiliar

La Figura 16 presenta el cuerpo principal de soporte del sistema auxiliar, el cual cumple la función de alojar y fijar los componentes mecánicos y eléctricos asociados al motor Caterpillar C7.1.

Este elemento fue modelado considerando una estructura rígida simplificada, utilizando extrusiones sólidas y barridos, lo que permite representar adecuadamente su función estructural dentro del ensamblaje general sin incrementar innecesariamente el número de elementos en la simulación.

Figura 16

Modelado del cuerpo principal del sistema auxiliar del motor Caterpillar C7.1.



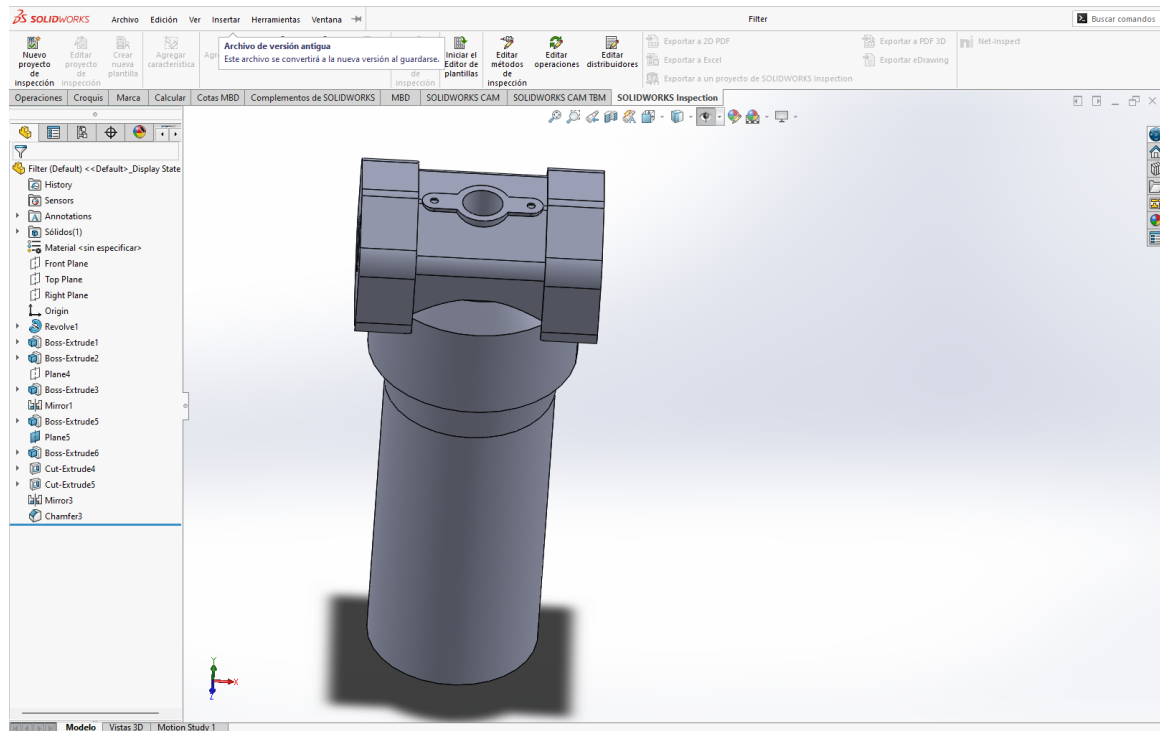
4.4.10. Modelado del filtro secundario

En la Figura 17 se observa el filtro secundario, encargado de refinar el fluido antes de su ingreso a los componentes críticos del sistema. Este tipo de filtro es común en sistemas auxiliares asociados a motores diésel de uso industrial.

El modelado tridimensional se realizó mediante combinaciones de extrusión, revolución y chaflanes, representando la carcasa externa del filtro y sus puntos de acople.

Figura 17

Modelado del filtro secundario del sistema auxiliar del motor Caterpillar C7.1



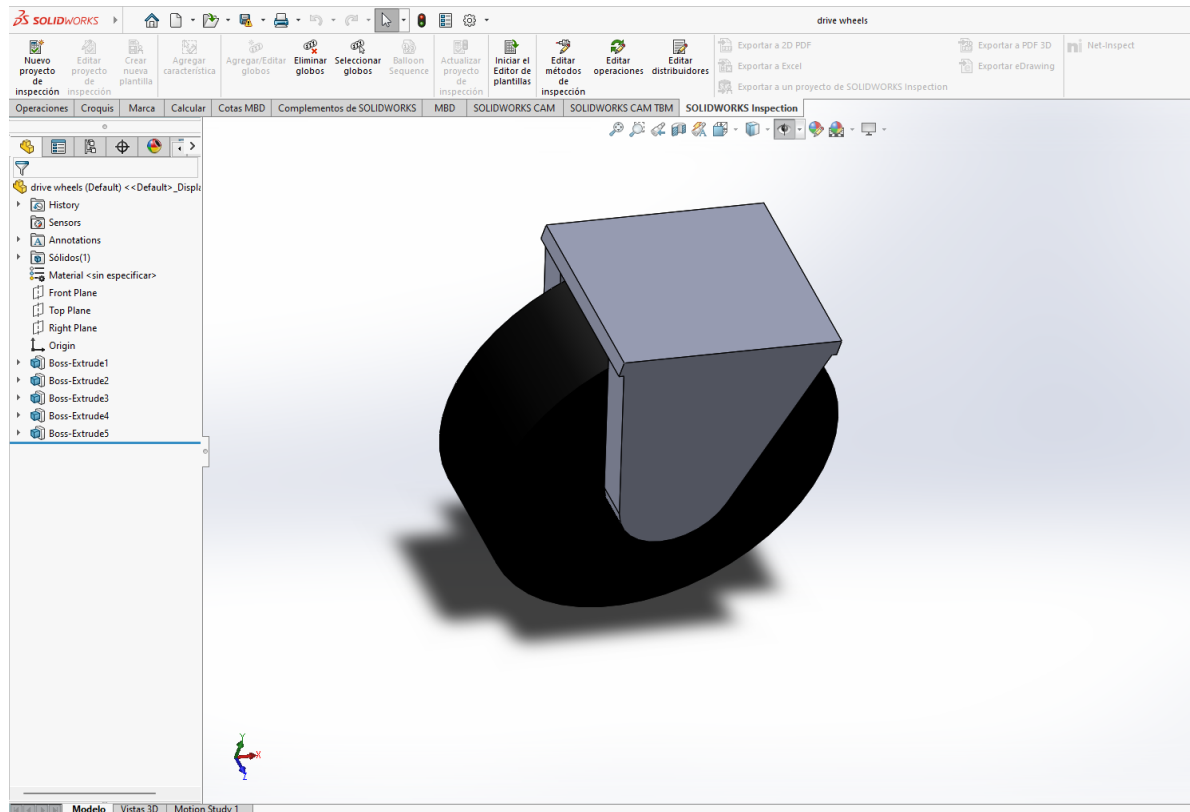
4.4.11. Modelado de la rueda de transmisión

La Figura 18 muestra la rueda de transmisión utilizada para la transferencia de movimiento dentro del sistema auxiliar. Este componente permite transmitir potencia mecánica desde el motor eléctrico hacia el sistema acoplado.

El modelo fue generado mediante extrusión sólida, considerando una geometría funcional que representa adecuadamente la superficie de contacto y el volumen del componente

Figura 18

Modelado de la rueda de transmisión



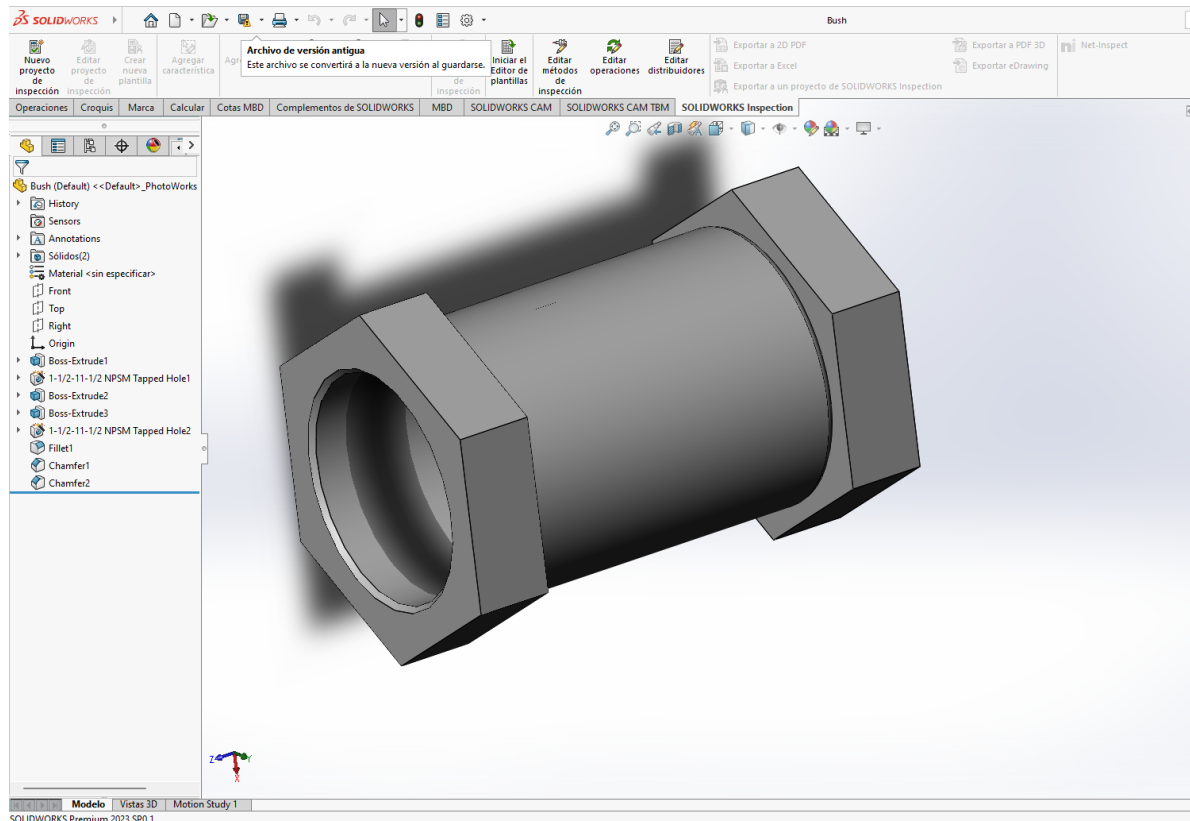
4.4.12. Modelado del buje

En la Figura 19 se presenta el buje, componente encargado de permitir el acoplamiento y la reducción de fricción entre elementos giratorios del sistema. Su inclusión es fundamental para asegurar un comportamiento mecánico realista en la simulación.

El buje fue modelado mediante operaciones de revolución y extrusión, incorporando orificios roscados que simulan su fijación dentro del conjunto.

Figura 19

Modelado del buje del motor Caterpillar C7.1



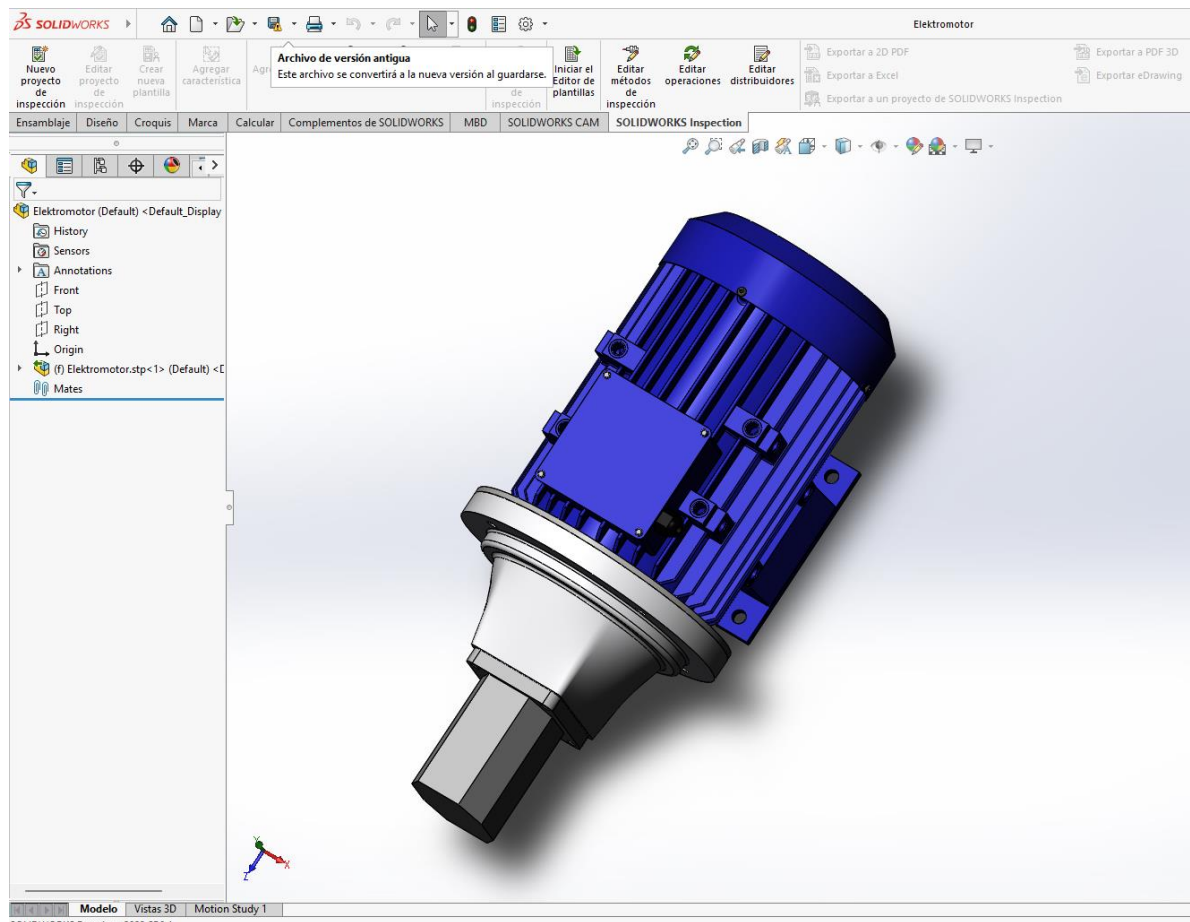
4.4.13. Modelado del motor eléctrico auxiliar

La Figura 20 muestra el modelado del motor eléctrico auxiliar, el cual proporciona la energía mecánica necesaria para el funcionamiento del sistema de circulación del fluido asociado al motor Caterpillar C7.1.

El modelo tridimensional fue desarrollado considerando una geometría representativa del estator, carcasa y eje de salida, permitiendo su integración adecuada en el ensamblaje sin afectar la eficiencia computacional de la simulación.

Figura 20

Modelado del motor eléctrico auxiliar del sistema del motor Caterpillar C7.1



4.4.14. Modelado del cojinete

Para crear el modelo tridimensional del cojinete de la biela y del cigüeñal del motor diésel Caterpillar C7.1, se utilizaron las dimensiones que se habían obtenido previamente durante la fase de medición y caracterización geométrica de los componentes internos del motor. Estos elementos son clave para reducir la fricción y asegurar una correcta transmisión de las cargas dinámicas entre las partes móviles del conjunto biela-cigüeñal.

En la Tabla 15, se muestran las dimensiones geométricas principales que se tomaron en cuenta para el modelado de los cojinetes, diferenciando entre las medidas del cojinete de la biela y las del cojinete del cigüeñal. Estos valores fueron fundamentales para definir con precisión los radios interior y exterior, así como el espesor y el ancho del componente, asegurando que la representación sea coherente con las condiciones reales de operación del motor Caterpillar C7.1

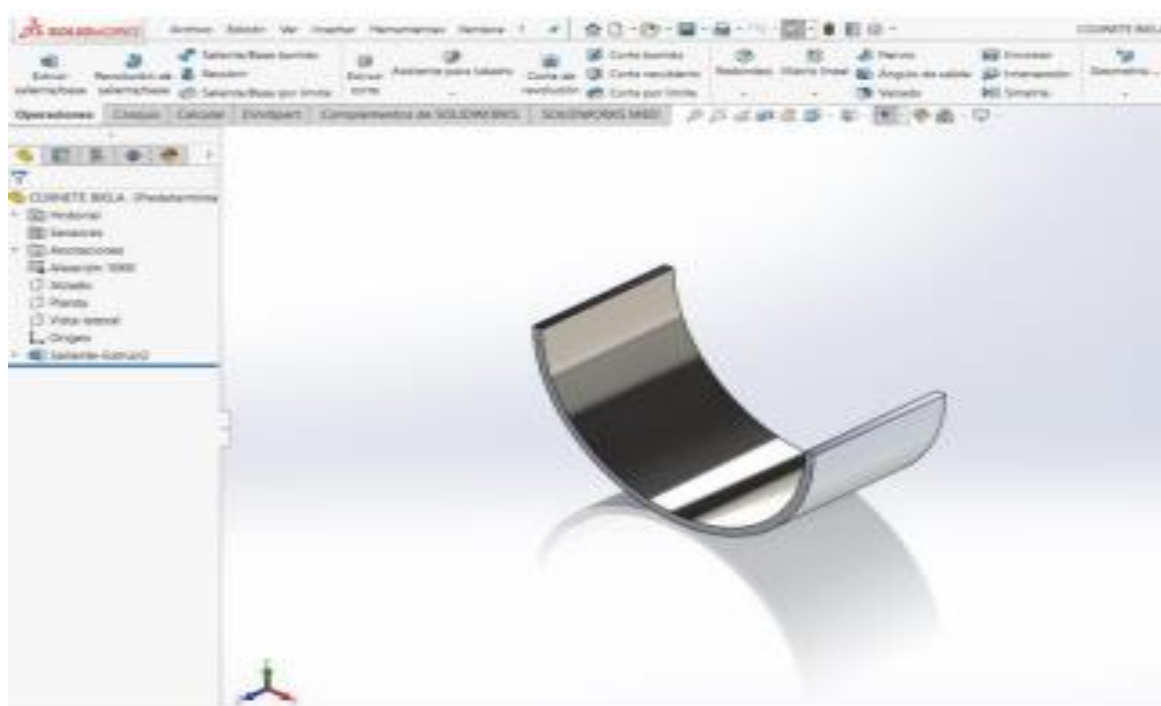
Tabla 15

Dimensiones geométricas del cojinete de biela del motor diésel Caterpillar C7.1

Medida	Biela (mm)	Cigüeñal (mm)
Radio exterior	34,00	42,75
Radio interior	32,00	40,50
Espesor	2,00	2,25
Ancho	32,00	25,70

Figura 21

Modelado del cojinete de biela del motor Caterpillar C7.1



4.4.15. Modelado de la bancada de la biela

El modelado geométrico de la bancada de la biela del motor diésel Caterpillar C7.1 se llevó a cabo teniendo en cuenta su función estructural dentro del conjunto móvil. Este componente es crucial, ya que permite un alojamiento adecuado del cojinete y asegura la conexión mecánica entre la biela y el cigüeñal. Dado que la bancada es parte del ensamblaje final del sistema, fue fundamental definir sus dimensiones con precisión para garantizar una compatibilidad geométrica adecuada con los demás elementos modelados.

Las dimensiones utilizadas para crear el modelo tridimensional se establecieron a partir de valores previamente determinados, que se resumen en la Tabla 16. Estas medidas fueron clave para definir correctamente la geometría externa, los radios de contacto con el cigüeñal y los orificios destinados a los pernos de fijación, todos aspectos esenciales para realizar un análisis estructural confiable en las etapas posteriores de simulación

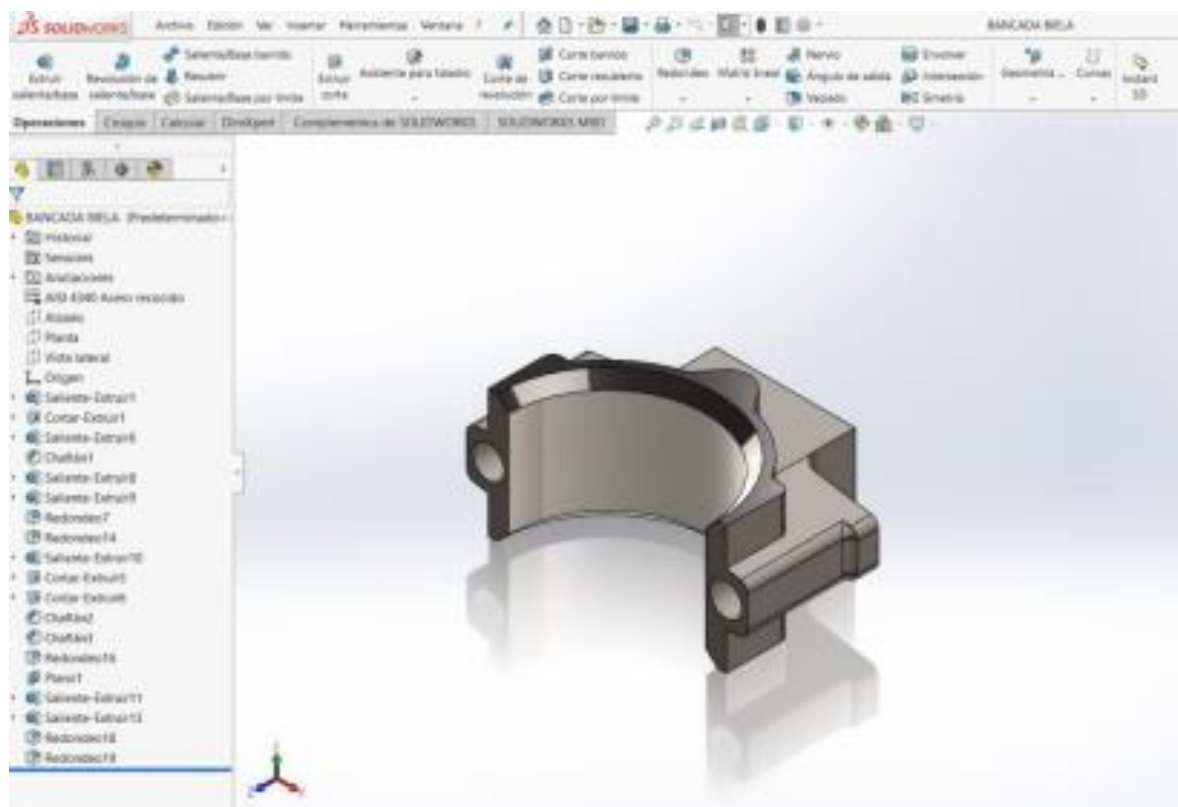
Tabla 16

Dimensiones geométricas de la bancada de biela del motor diésel Caterpillar C7.1

Medida	Unidad (mm)
Longitud	102
Ancho	44
Alto	66,40
Radio hacia el cigüeñal	34
Diámetro para pernos	11

Figura 22

Modelado de la bancada de biela del motor Caterpillar C7.1



4.4.16. Modelado del ensamblaje general del motor diésel Caterpillar C7.1

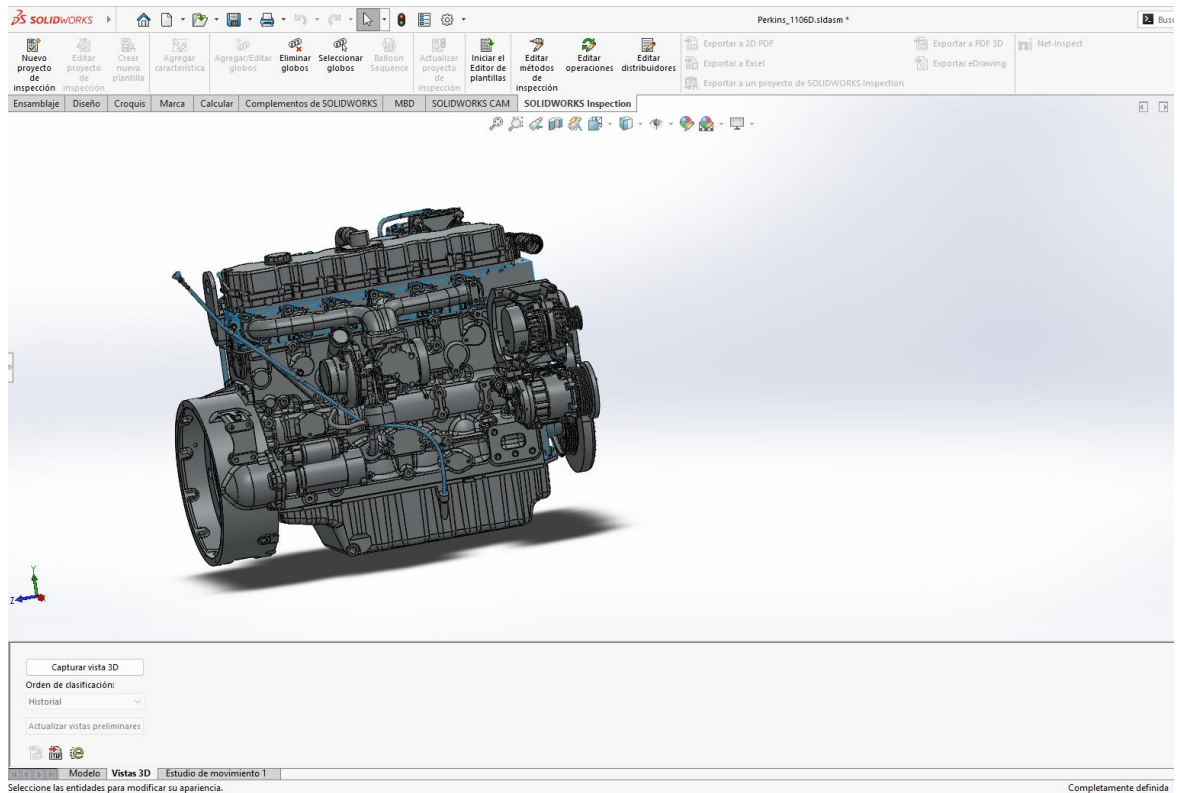
Una vez desarrollado el modelado individual de los principales componentes del motor diésel Caterpillar C7.1, se procedió a la construcción del ensamblaje general del motor, con la finalidad de verificar la correcta integración geométrica y funcional de cada una de las piezas modeladas. Este proceso permitió comprobar la coherencia dimensional entre los elementos del conjunto móvil, el sistema de lubricación y los componentes auxiliares, asegurando una representación fiel del motor en su configuración operativa.

El ensamblaje fue realizado en el entorno de SOLIDWORKS, empleando relaciones de posición (mates) de tipo concéntrico, coincidente y de distancia, lo que permitió simular adecuadamente las condiciones reales de montaje del motor. Durante esta etapa, se integraron componentes como el bloque del motor, el cigüeñal, las bielas, pistones, cojinetes, sistema de lubricación, elementos de admisión y otros accesorios, respetando la disposición y orientación propias del motor Caterpillar C7.1.

La Figura 23 muestra una vista isométrica del ensamblaje tridimensional completo del motor, en la cual se aprecia la correcta alineación de los subsistemas y la disposición general de los componentes principales. Este modelo ensamblado constituye la base para la posterior etapa de simulación, ya que permite definir con mayor precisión las condiciones de frontera, los contactos entre superficies y la transmisión de cargas internas durante el ciclo de funcionamiento del motor

Figura 23

*Ensamblaje tridimensional del motor diésel Caterpillar C7.1 modelado en
SOLIDWORKS*



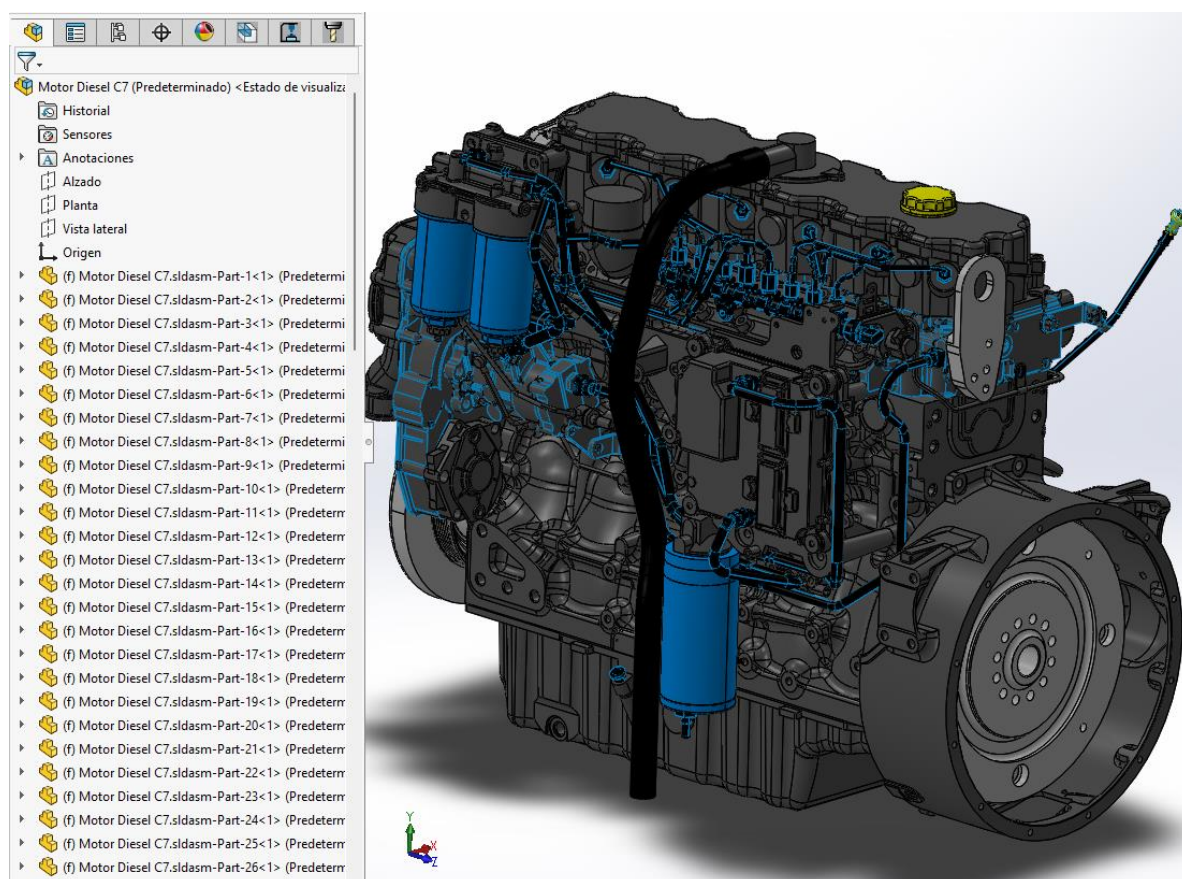
CAPÍTULO V: RESULTADOS

5.1. Registro experimental de los parámetros operativos claves del motor diesel C7.1.

La muestra analizada estuvo conformada por cuatro motores diésel Caterpillar C7.1, correspondientes a las series E7A58896, E7A58932, E7A59570 y E7A60417, todos ellos instalados en cargadores frontales modelo 950GC, por lo que estas series fueron consideradas como casos representativos del desempeño del motor bajo condiciones reales de operación, permitiendo efectuar un análisis comparativo del comportamiento energético.

Figura 24

Funciones operativas del motor C7.1



Los parámetros operativos empleados en el análisis fueron definidos a partir de condiciones típicas de funcionamiento del motor y utilizados como base para el modelamiento termodinámico y la simulación energética; donde en la Tabla 17 se

presentan los valores promedio de operación considerados para cada serie.

Tabla 17

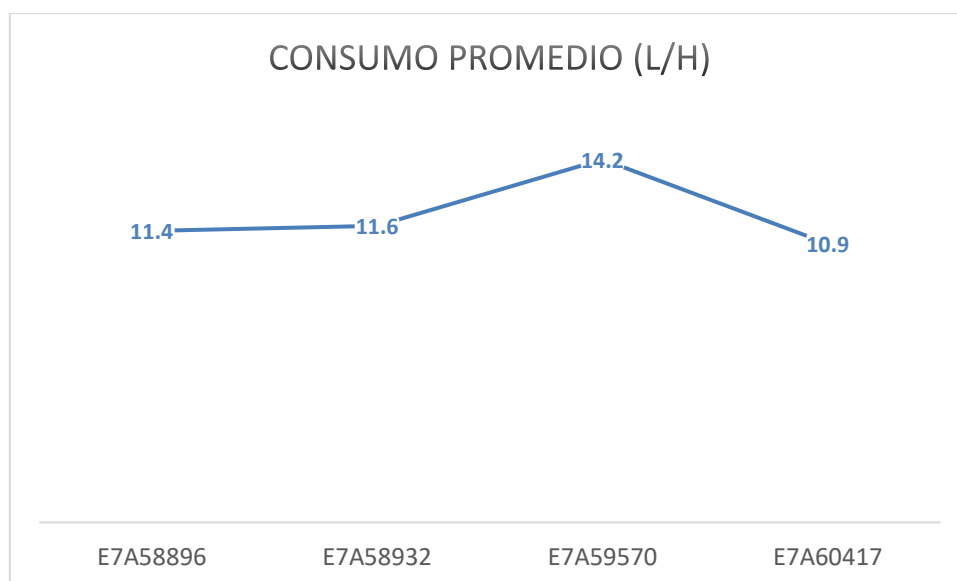
Parámetros operativos promedio por serie del motor Caterpillar C7.1

Serie del motor	Régimen promedio (rpm)	Factor de carga (%)	Consumo promedio (L/h)	Temp. gases de escape (°C)	Horas acumuladas
E7A58896	1250	26	11.4	315	1737
E7A58932	1230	25	11.6	320	1703
E7A59570	1430	31	14.2	355	1723
E7A60417	1270	24	10.9	305	1506

Los resultados muestran diferencias moderadas entre series, destacándose la serie E7A59570 con mayor régimen y consumo promedio, lo cual es coherente con un mayor nivel de carga operativa; por lo que las restantes series presentan comportamientos similares, propios de motores del mismo modelo sometidos a condiciones de trabajo comparables

Figura 25

Consumo promedio de combustible por serie del motor



5.2. Desarrollo y resultados del modelo termodinámico del motor:

Para obtener los resultados termodinámicos del motor Diesel Caterpillar C7.1, se utilizó el procedimiento de cálculo que se describió en las secciones anteriores, teniendo en cuenta las condiciones operativas y los parámetros específicos de este motor. Los valores que se obtuvieron reflejan el comportamiento térmico y de presión del fluido de trabajo a lo largo del ciclo del motor.

A continuación, se presentan de manera ordenada los principales resultados obtenidos

Densidad del aire de admisión

La densidad del aire de ingreso al motor se determinó considerando condiciones ambientales estándar y la temperatura inicial de admisión establecida para el motor Caterpillar C7.1, obteniéndose el siguiente valor:

$$\begin{aligned}\rho_0 &= \frac{P_0}{R \cdot T_0} \\ \rho_0 &= \frac{100000 \text{ N/m}^2}{287 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)} \cdot 293 \text{ K}} \\ \rho_0 &= 1.19 \text{ kg/m}^3\end{aligned}$$

Coeficiente de gases residuales

El coeficiente de gases residuales se calculó a partir de las temperaturas y presiones asignadas al motor, considerando la relación de compresión y las pérdidas durante el proceso de admisión:

$$\gamma_r = \frac{T_0 + \Delta T}{T_r} \cdot \frac{P_r}{\varepsilon P_a - P_r}$$

Reemplazando los valores correspondientes al motor Caterpillar C7.1, se obtuvo:

$$\gamma_r = 0.037$$

Presión al final de la admisión

La presión al final del proceso de admisión se determinó considerando las pérdidas por resistencia del sistema de admisión y la velocidad del aire de entrada al cilindro:

$$P_a = P_0 - (\beta^2 - \xi) \frac{\rho_0 w_{ad}^2}{2} \cdot 10^{-6}$$

$$P_a = 0.10 - (3.2) \frac{(1.19)(88)^2}{2} \cdot 10^{-6}$$

$$P_a = 0.0852 \text{ MPa}$$

Temperatura al final de la admisión

La temperatura al término de la admisión se calculó considerando el efecto de los gases residuales y el incremento térmico por transferencia de calor:

$$T_a = \frac{T_0 + \Delta T + \gamma_r T_r}{1 + \gamma_r}$$

$$T_a = \frac{293 + 30 + (0.037 \cdot 795)}{1 + 0.037}$$

$$T_a = 339.98 \text{ K}$$

Presión y temperatura al final de la compresión

Asumiendo un proceso politrópico de compresión característico de motores diésel de inyección directa, se obtuvieron los siguientes valores:

- **Presión de compresión**

$$P_c = P_a \varepsilon^{n_1}$$

$$P_c = 0.0852 \cdot 16^{1.38}$$

$$P_c = 3.92 \text{ MPa}$$

Temperatura de compresión

$$T_c = T_a \varepsilon^{(n_1-1)}$$

$$T_c = 339.98 \cdot 16^{(1.38-1)}$$

$$T_c = 976.03 \text{ K}$$

Energía interna del gas a la temperatura de compresión

A partir de la temperatura de compresión obtenida, se interpolaron los valores del calor específico y la energía interna del gas utilizando tablas termodinámicas de referencia:

- Calor específico interpolado:

$$\mu_{cv} = 22.42 \text{ kJ/kmol} \cdot ^\circ\text{C}$$

- Energía interna a la temperatura de compresión:

$$\mu_c = \mu_{cv} \cdot T_c$$

$$\mu_c = 15760 \text{ kJ/kmol}$$

Asimismo, la energía interna de combustión corregida se determinó considerando el coeficiente de exceso de aire y la composición de los productos de combustión, obteniéndose:

$$\mu_c'' = 17149.92 \text{ kJ/kmol}$$

Temperatura y presión de combustión

Con diésel

Para el combustible diésel, el balance energético permitió determinar la temperatura de combustión:

$$T_{z1} = 2315.9 \text{ K}$$

La presión máxima de combustión se obtuvo como:

$$P_{z1} = 0.85 \cdot 1.04 \cdot \frac{2315.9}{976.03} \cdot 3.92$$

$$P_{z1} = 8.3 \text{ MPa}$$

Temperatura y presión al final de la expansión

Expansión con diésel

- Coeficiente de expansión preliminar:

$$\rho_1 = 1.38$$

- Grado de expansión posterior:

$$\delta_1 = 11.62$$

- Temperatura al final de la expansión:

$$T_{b1} = 1165.4 \text{ K}$$

- Presión al final de la expansión:

$$P_{b1} = 0.36 \text{ MPa}$$

5.3. Evaluación del comportamiento del motor mediante simulación:

Para llevar a cabo la etapa de simulación, se utilizó el software ANSYS Workbench versión 19.2, que cuenta con herramientas especializadas para el análisis mediante el método de elementos finitos. Esto permite evaluar variables como los esfuerzos estructurales, las deformaciones y la distribución de tensiones en componentes mecánicos. En esta investigación, la simulación se centró en el conjunto móvil del motor diésel Caterpillar C7.1, teniendo en cuenta las condiciones de operación establecidas en cálculos previos.

El procedimiento de simulación se organizó de manera secuencial, comenzando con la creación del modelo geométrico de los componentes a analizar y su posterior importación al entorno de ANSYS. Una vez que la geometría fue cargada, se asignaron los materiales correspondientes, definidos según las propiedades mecánicas y térmicas que son compatibles con los elementos del motor diésel en estudio.

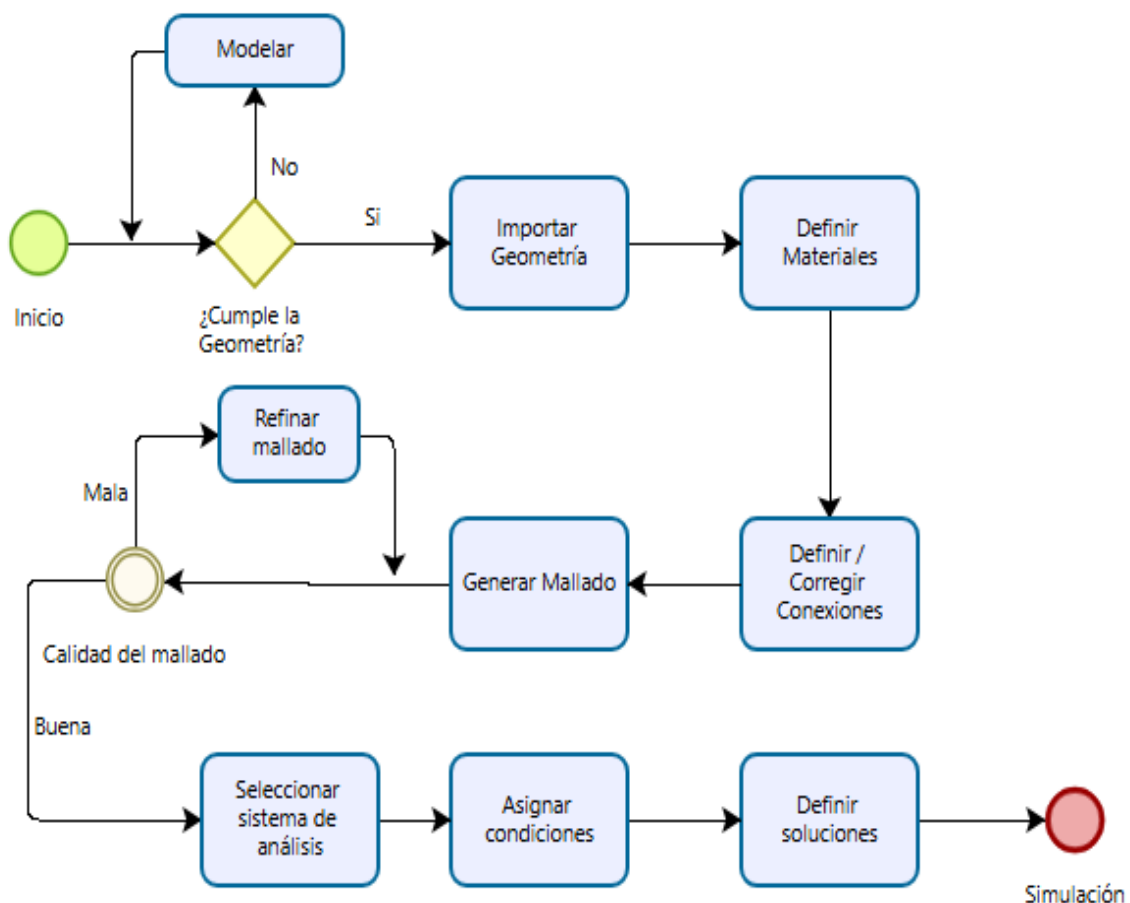
Después, se llevó a cabo el proceso de mallado, que fue evaluado en términos de calidad para asegurar la fiabilidad de los resultados. En los casos donde se detectó un mallado inadecuado, se realizaron refinamientos locales hasta lograr una

calidad aceptable. También se definieron y corrigieron las conexiones y contactos entre las superficies de los diferentes componentes, garantizando una adecuada transferencia de cargas durante la simulación.

Una vez validado el mallado, se eligió el tipo de análisis adecuado y se establecieron las condiciones de frontera, cargas y restricciones necesarias para representar el comportamiento real del conjunto móvil del motor Caterpillar C7.1. Finalmente, se configuraron los parámetros de solución y se ejecutó el análisis numérico, obteniendo los resultados que se presentan y discuten en los capítulos posteriores

Figura 26

Diagrama del proceso para la simulación



5.3.1. Geometría

La primera fase del proceso de simulación se centró en definir la geometría del sistema que íbamos a analizar, ya que la calidad del modelo geométrico tiene un

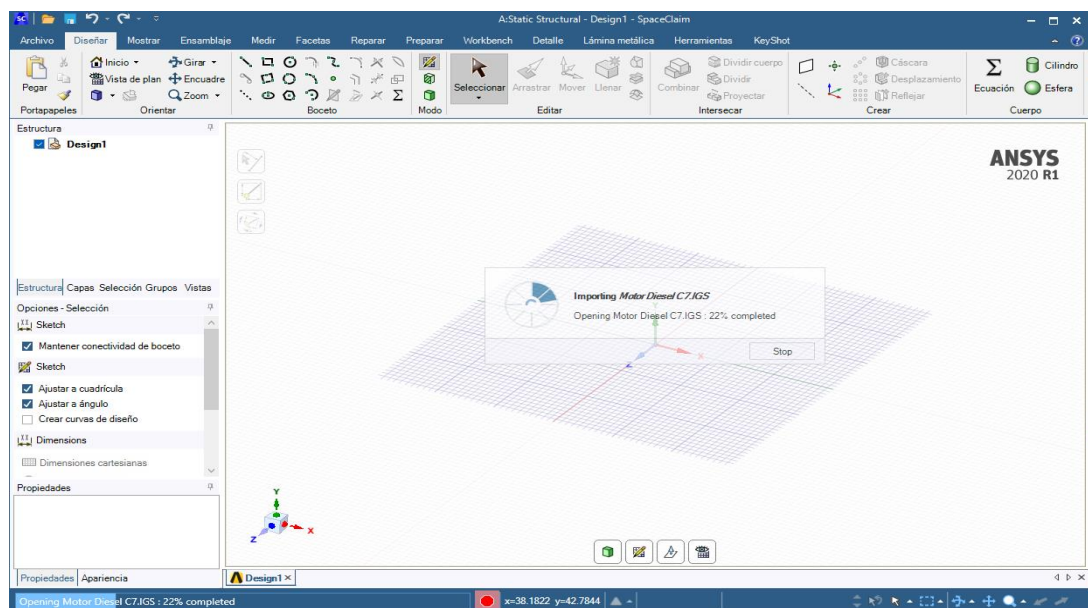
impacto directo en la precisión de los resultados que obtenemos a través del método de elementos finitos. Esta geometría puede ser creada directamente en el entorno de ANSYS usando la herramienta SpaceClaim, o, si se prefiere, en un software de diseño asistido por computadora. En esta investigación, el modelado tridimensional del conjunto móvil se desarrolló previamente en SOLIDWORKS y luego se exportó al entorno de simulación.

Para garantizar la compatibilidad con ANSYS Workbench, los modelos se convirtieron a un formato estándar IGS, que ayuda a mantener la geometría esencial de los componentes. Antes de la importación, se llevó a cabo un proceso de simplificación geométrica, eliminando elementos secundarios como pequeños redondeos, chaflanes y detalles no estructurales, ya que estas características no afectan significativamente la respuesta global del sistema durante la simulación estructural.

En la Figura 25 se muestra la geometría que se importó al entorno de ANSYS SpaceClaim, donde se puede ver el conjunto móvil simplificado y la correcta identificación y asignación de nombres a cada uno de los componentes del ensamblaje. Este procedimiento ayudó a optimizar el mallado y a reducir el tiempo de computación sin poner en riesgo la validez de los resultados.

Figura 27

Geometría importada de ansys

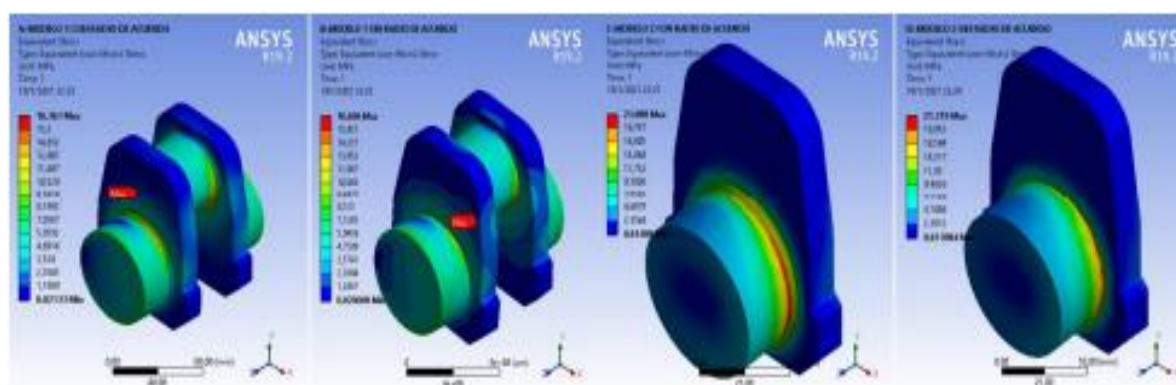


Aunque se eliminaron la mayoría de los bordes y detalles menores, se prestó especial atención a las áreas críticas donde podría haber una concentración de esfuerzos, especialmente en los radios de acuerdo del eje del cigüeñal. La variación geométrica en estas zonas puede alterar la distribución de tensiones, sobre todo cuando las fuerzas actúan cerca de esos radios, lo que puede provocar incrementos locales de esfuerzo. Además, se tuvo en cuenta que los cambios bruscos en la sección pueden causar una distribución de tensiones no uniforme, por lo que se evaluó el impacto de mantener o eliminar los radios de acuerdo, priorizando una representación geométrica que refleje el comportamiento real del material. Investigaciones anteriores sugieren que las fallas por iniciación de grietas tienden a ocurrir con mayor frecuencia en estas áreas críticas.

En la Figura 26 se presenta la comparación geométrica de cuatro modelos representativos del cigüeñal correspondientes a motores Diesel Caterpillar C7.1 instalados en cargadores frontales modelo 950GC, identificados por sus números de serie E7A58896, E7A58932, E7A59570 y E7A60417, los cuales fueron verificados a partir de los reportes oficiales de servicio y estado del producto obtenidos mediante la herramienta *Cat Electronic Technician*.

Figura 28

Comparación de radios de acuerdo al modelo y serie del motor



Además, en la Tabla 17 se presentan los principales parámetros operativos de los motores Caterpillar C7.1 analizados, obtenidos a partir de los reportes oficiales de servicio y descarga de datos del ECM, por lo que estos registros permiten caracterizar las condiciones reales de funcionamiento de cada unidad, tales como el

régimen promedio de operación, el factor de carga y el consumo de combustible; donde la información recopilada evidencia que las diferencias operativas entre las distintas series son moderadas, lo que justifica la adopción de condiciones de carga equivalentes en el modelado estructural del cigüeñal y garantiza la comparabilidad de los resultados obtenidos mediante el análisis por elementos finitos.

Tabla 18

Parámetros operativos de motores Caterpillar C7.1 según reportes de servicio

Serie de motor	Horas totales de operación (h)	RPM promedio (rpm)	Factor de carga promedio (%)	Consumo promedio de combustible	Porcentaje de tiempo en ralentí (%)
E7A58896	1737,3	1270,48	24	2,99 gph	14,87
E7A58932	1702,7	1236,06	24	3,05 gph	31,79
E7A59570	1723,0	1428,54	31	14,28 L/h	14,47
E7A60417	1506,0	1269,91	22	2,85 gph	24,37

5.3.2. Materiales

Para garantizar la fiabilidad del análisis estructural desarrollado, se trabajó con materiales representativos de los componentes reales que conforman el conjunto móvil del motor diésel Caterpillar C7.1; donde el entorno ANSYS Workbench dispone de una biblioteca extensa de materiales predefinidos; sin embargo, con la finalidad de asegurar una correcta correspondencia entre el modelo numérico y el comportamiento físico de los componentes, las propiedades mecánicas fueron definidas manualmente mediante el módulo Engineering Data, a partir de información técnica reportada en literatura especializada reciente.

Dado que el motor diésel Caterpillar C7.1 está conformado por múltiples componentes estructurales y funcionales, en el presente estudio se consideraron los materiales representativos de los principales elementos que intervienen en la transmisión de cargas mecánicas, la contención de presiones internas y el soporte estructural del conjunto, los cuales fueron definidos en el módulo *Engineering Data* de ANSYS Workbench.

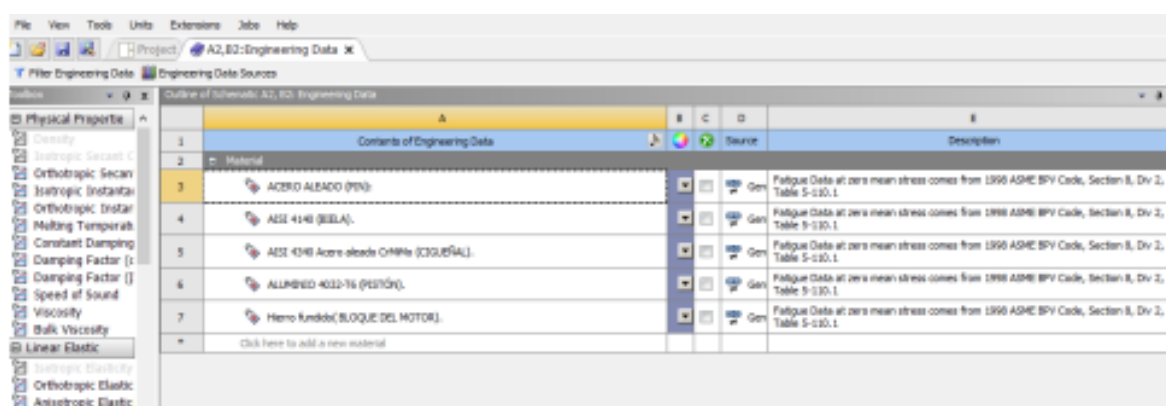
Tabla 19*Propiedades mecánicas y térmicas de los materiales empleados en los principales componentes del motor diésel*

Componente del motor	Material típico	Densidad (kg/m ³)	Módulo de Young (GPa)	Coef. de Poisson	Límite elástico (MPa)	Resistencia a tracción (MPa)	Conductividad térmica (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	Calor específico (J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)
Pistón	Aleación de aluminio Al-Si	2 700	70	0,33	280	320	160	900
Pasador de pistón	Acero aleado	7 850	210	0,29	850	1 000	44	470
Biela	Acero AISI 4140	7 850	200	0,29	655	850	42	475
Cigüeñal	Acero AISI 4340	7 850	205	0,29	740	1 080	44	475
Bloque del motor	Fundición gris perlítica	7 200	130	0,26	240	300	50	460
Camisa de cilindro	Fundición aleada	7 200	150	0,27	300	350	55	460
Culata	Fundición nodular	7 200	165	0,27	320	370	55	470
Válvulas de admisión	Acero Cr-Ni	7 850	200	0,29	600	850	25	460
Válvulas de escape	Acero Cr-Ni resistente al calor	7 800	190	0,30	450	750	22	500
Árbol de levas	Acero aleado	7 850	205	0,29	700	900	42	475
Volante de inercia	Acero al carbono	7 850	210	0,30	350	600	44	480

Si bien es reconocido que en análisis termo–estructurales avanzados las propiedades mecánicas pueden variar significativamente con el incremento de la temperatura, esta dependencia no fue considerada en el presente trabajo, ya que la investigación se orienta a evaluar la influencia geométrica y mecánica del diseño sobre la respuesta estructural del conjunto móvil, manteniendo controladas las variables térmicas para asegurar la comparabilidad de los resultados (ASM International, 2021).

Figura 29

Biblioteca de materiales creada



En la Figura 27 se muestra la biblioteca de materiales personalizada desarrollada en ANSYS Workbench para el análisis estructural del conjunto móvil del motor diésel Caterpillar C7.1; donde en el panel izquierdo del entorno Engineering Data se visualizan las distintas categorías de propiedades físicas, mecánicas y térmicas que pueden ser asignadas a cada material, tales como densidad, módulo de elasticidad, coeficiente de Poisson y propiedades térmicas relevantes.

Para la construcción de esta biblioteca se partió de materiales base de la base de datos estándar del software, los cuales fueron duplicados y ajustados con el fin de representar de manera más precisa los aceros y aleaciones utilizados en los principales componentes del motor; por lo que este procedimiento permitió definir propiedades coherentes con las condiciones reales de operación, garantizando la consistencia del modelo numérico y la comparabilidad de los resultados obtenidos en el análisis estructural.

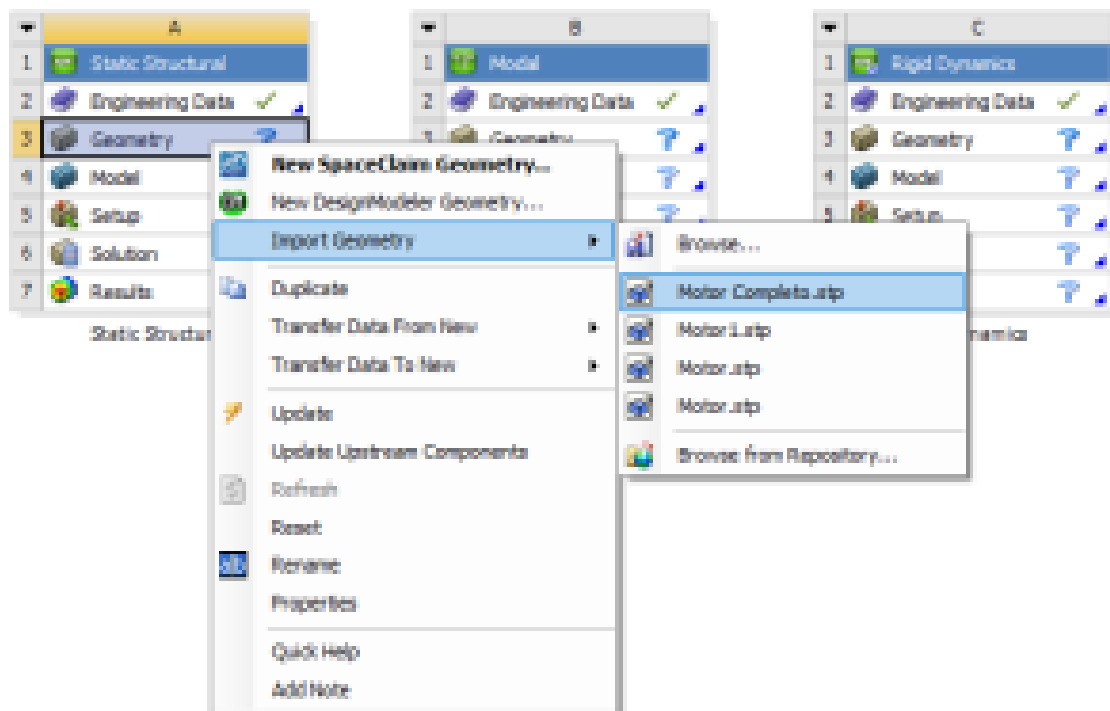
5.3.3. Conexiones y Juntas

Para representar de manera adecuada el comportamiento cinemático del conjunto móvil del motor diésel Caterpillar C7.1, fue necesario definir distintos tipos de juntas que permitieran reproducir el movimiento relativo entre los componentes del ensamblaje; donde el modelo geométrico importado desde SolidWorks incorpora juntas automáticas determinadas por defecto; no obstante, para el desarrollo de la investigación se creó y ajustó una configuración específica de juntas, modificándolas según los requerimientos del análisis.

- Junta fija: Este tipo de conexión se empleó para unir de forma rígida elementos que funcionan como un solo cuerpo, como la biela con su bancada y las respectivas tapas de cojinete, asegurando un comportamiento estructural solidario durante la simulación.
- Junta de traslación: Se utilizó para permitir el desplazamiento rectilíneo del pistón dentro del cilindro, reproduciendo su movimiento alternativo a lo largo del eje del cilindro, conforme al funcionamiento real del motor C7.1.
- Junta de revolución: Esta junta permitió asignar movimiento rotacional a los componentes que así lo requieren; donde se aplicó una conexión de tipo cuerpo–tierra al cigüeñal para definir su giro, así como conexiones cuerpo–cuerpo entre el cigüeñal, la biela y el pistón, posibilitando la correcta transmisión del movimiento dentro del conjunto móvil

Figura 30

Importación de la geometría



5.3.4. Mallado

Una vez importada la geometría al entorno Model de ANSYS Mechanical, se procedió a generar el mallado del conjunto móvil del motor diésel Caterpillar C7.1, el cual incluye los principales componentes responsables de la transmisión de cargas mecánicas, por lo que el análisis se desarrolló bajo un esquema Structural – Static Structural, considerando un comportamiento elástico lineal de los materiales.

Debido a que la geometría del conjunto móvil del motor C7.1 presenta superficies curvas, zonas cilíndricas y cambios geométricos locales, se empleó un mallado basado en curvatura (Curvature-based meshing); y de igual manera, se seleccionó un Relevance Center: Fine, con el fin de obtener una discretización más precisa en regiones críticas

Como criterio de evaluación de la calidad del mallado se utilizó la métrica Element Quality, obteniéndose valores promedio cercanos al 85 %, lo cual indica una adecuada conformación de los elementos finitos y garantiza la estabilidad numérica del modelo; donde el mallado final estuvo conformado por aproximadamente $1,44 \times$

10⁶ nodos y 3,49 × 10⁵ elementos, representando un compromiso adecuado entre precisión del cálculo y costo computacional para el análisis estructural del motor C7.1.

Figura 31

Mallado

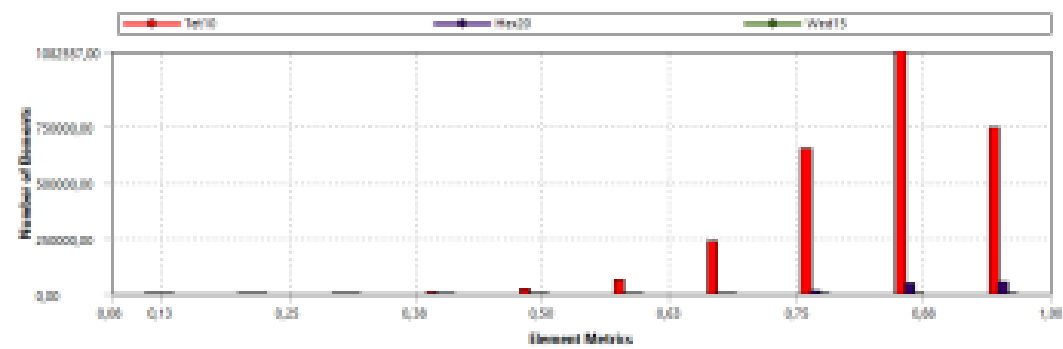


Figura 32

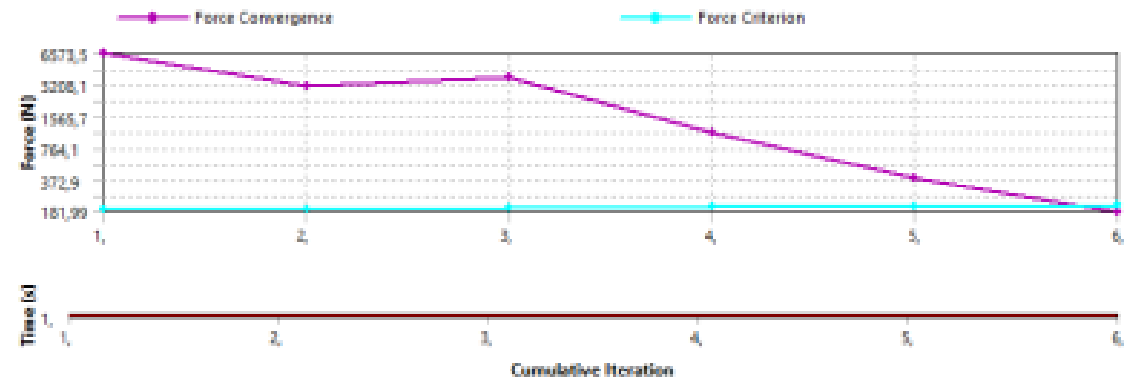
Detalles del mallado

Defaults	
Physics Preference	Mechanical
Relevance	100
Element Order	Program Controlled
Sizing	
Size Function	Curvature
Relevance Center	Fine
Transition	Fast
Span Angle Center	Fine
Curvature Nor...	Default (12,0 °)
Min Size	Default (2,6475e-002 mm)
Max Face Size	Default (2,64750 mm)
Max Tet Size	Default (5,2950 mm)
Growth Rate	Default (1,50)
Automatic Mesh ...	On
Defeature Size	Default (1,5237e-002 mm)
Minimum Edge L...	4,9993e-002 mm
Quality	
Check Mesh Qua...	Yes, Errors
Error Limits	Standard Mechanical
Target Quality	Default (0,050000)
Smoothing	Medium
Mesh Metric	Element Quality
Min	2,3501e-003
Max	0,99996
Average	0,85522
Standard Devl...	0,21514
Inflation	
Advanced	
Statistics	
Nodes	1437406
Elements	348623

La validez del mallado fue verificada mediante el análisis de convergencia del solucionador, observándose que el criterio de fuerza se estabiliza conforme avanzan las iteraciones acumuladas, tal como se aprecia en la Figura 31; por lo que este comportamiento confirma que la solución obtenida es consistente.

Figura 33

Convergencia



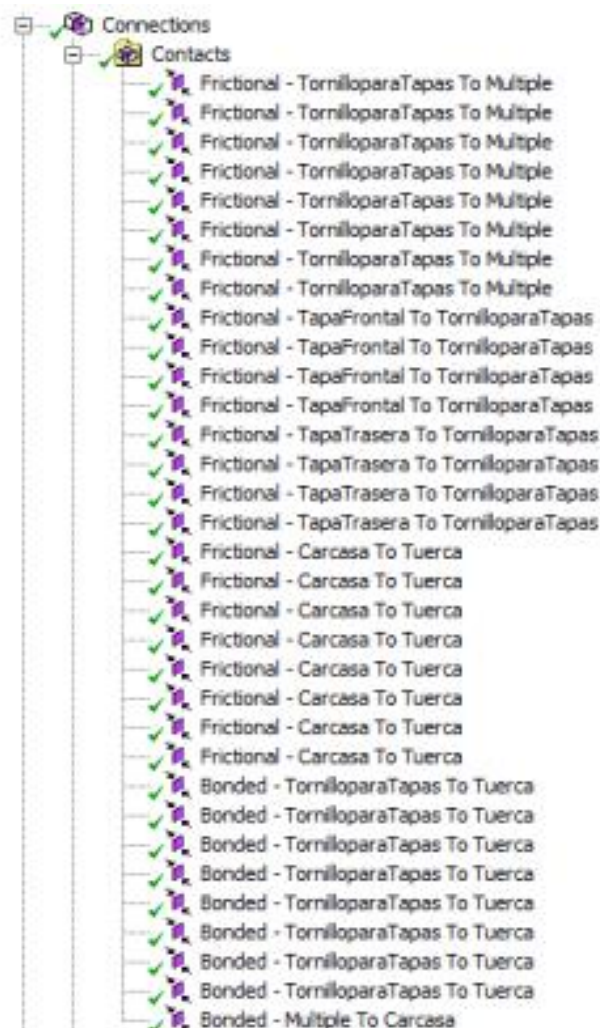
5.3.5. Static Structural

El análisis Static Structural desarrollado en el entorno ANSYS Mechanical permitió evaluar la respuesta estructural del modelo ante la aplicación de cargas estáticas, considerando variables como esfuerzos, deformaciones, desplazamientos y fuerzas internas generadas en los componentes analizados; por lo que este tipo de análisis resulta apropiado cuando las cargas aplicadas son conocidas y varían lentamente en el tiempo, permitiendo identificar las zonas críticas donde se concentran los mayores niveles de esfuerzo.

En el presente estudio, el análisis se centró en la carcasa del motor diésel Caterpillar C7.1, modelada de manera conjunta con los elementos de fijación correspondientes, tales como tornillos, tuercas y tapas; y para representar adecuadamente la interacción mecánica entre los distintos componentes, se procedió a la definición de contactos entre las superficies involucradas, diferenciando aquellos que presentan unión rígida de los que permiten deslizamiento relativo.

Figura 34

Contactos



Los contactos entre elementos solidarios, como los conjuntos tornillo–tuerca–tapa, fueron definidos mediante contactos tipo Bonded, garantizando un comportamiento solidario sin separación relativa: por lo que en contraste, las interfaces entre la carcasa y los elementos de fijación se modelaron como contactos friccionales, asignando un coeficiente de fricción de 0,2, valor representativo para superficies metálicas en condiciones secas; y para estos contactos se empleó una formulación Augmented Lagrange con detección Gauss Point, permitiendo una adecuada representación del contacto no lineal.

Figura 35

Especificaciones técnicas del tornillo

Metric thread :

Initial tensile stress : $\sigma_t =$ $\cdot R_{p0.2}$

Thread coeff. of friction : $\mu_{\text{thread}} =$

Head - face coeff. of friction : $\mu_{\text{head}} =$

pitch P	1	mm
pitch diameter d_2	5.35	mm
root diameter d_3	4.773	mm
tensile stress area $A_t = \pi/4 \cdot d_2^2$; $d_3 = (d_2 + d_3)/2$	20.12	mm ²
ultimate tensile strength R_m	1200	MPa
yield strength $R_{p0.2}$	1080	MPa
tensile stress $\sigma_t = \sigma'_t \cdot R_{p0.2}$	648	MPa
torsional stress $\tau = M_G / (\pi/16 \cdot d_3^3)$	384.1	MPa
equivalent stress $\sigma_e = (\sigma_t^2 + 3\tau^2)^{1/2}$	928.71	MPa
thread friction M_G	8.2	Nm
thread friction M_{G_0}	-3.93	Nm
head face friction $M_{WD} = F_t \mu_{\text{head}} 1.3 \cdot d/2$	7.63	Nm
Total tightening torque $M_A = M_G + M_{WD}$	15.83	Nm
Initial preload $F_t = \sigma_t \cdot A_t$	13.04	kN
Load at Yield $F_{02} = R_{p0.2} \cdot A_t$	21.73	kN
Load reserve $P_b = F_{02} - F_t$	8.69	kN

¹⁾ stress by torsion is relaxed after tightening.
²⁾ equivalent stress should remain below the yield strength (linear elastic).

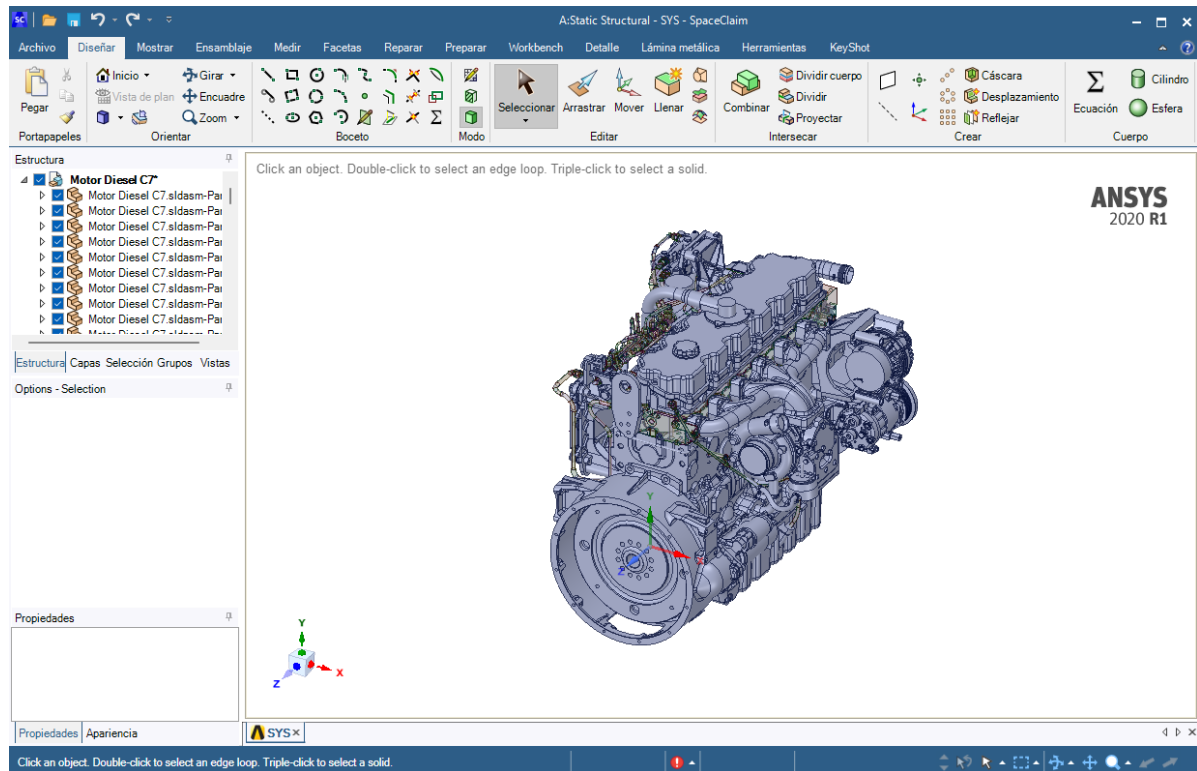
www.tribology-abc.com

Posteriormente, se establecieron las condiciones de frontera del modelo. La base de la carcasa del motor fue restringida mediante un Fixed Support, simulando su anclaje a la estructura del equipo; donde, se aplicaron las cargas de apriete a través de la opción Bolt Pretension, considerando un valor de 13 400 N para cada elemento de fijación, correspondiente a un tornillo M6×25, de acuerdo con sus especificaciones técnicas.

La configuración final de cargas y restricciones permitió reproducir de forma representativa las condiciones reales de montaje de la carcasa del motor C7.1, asegurando que los resultados obtenidos reflejen el comportamiento estructural del sistema bajo condiciones de servicio estáticas.

Figura 36

Análisis estático estructural



5.3.6. Rigid Dynamics

Para el desarrollo del análisis mediante Rigid Dynamics se siguió un procedimiento análogo al empleado en los análisis Static Structural y Modal, particularmente en lo referente a la discretización geométrica y la definición del modelo; por lo que este enfoque permitió mantener coherencia entre los distintos tipos de análisis realizados sobre el motor diésel Caterpillar C7.1.

Dentro del entorno de Rigid Dynamics, la primera etapa consistió en la definición de las juntas cinemáticas necesarias para representar el movimiento relativo entre los componentes del motor; donde se emplearon juntas tipo Fixed para aquellos elementos que deben comportarse como un solo cuerpo rígido durante la simulación, garantizando que no exista separación ni movimiento relativo entre ellos; y de igual manera, se definieron juntas cilíndricas y de revolución, las cuales permitieron reproducir el movimiento rotacional del eje del motor y las restricciones asociadas a los rodamientos.

La configuración de juntas incluyó conexiones rígidas entre la carcasa y las tapas frontal y trasera, así como entre los componentes internos solidarios al eje; y, por otro lado, las juntas cilíndricas se utilizaron para modelar el comportamiento del eje respecto a los rodamientos, mientras que las juntas de revolución permitieron definir el giro del rotor con respecto a la carcasa, representando de forma simplificada el funcionamiento dinámico del motor C7.1.

Figura 37

Joints para modelar el rigid dinamic

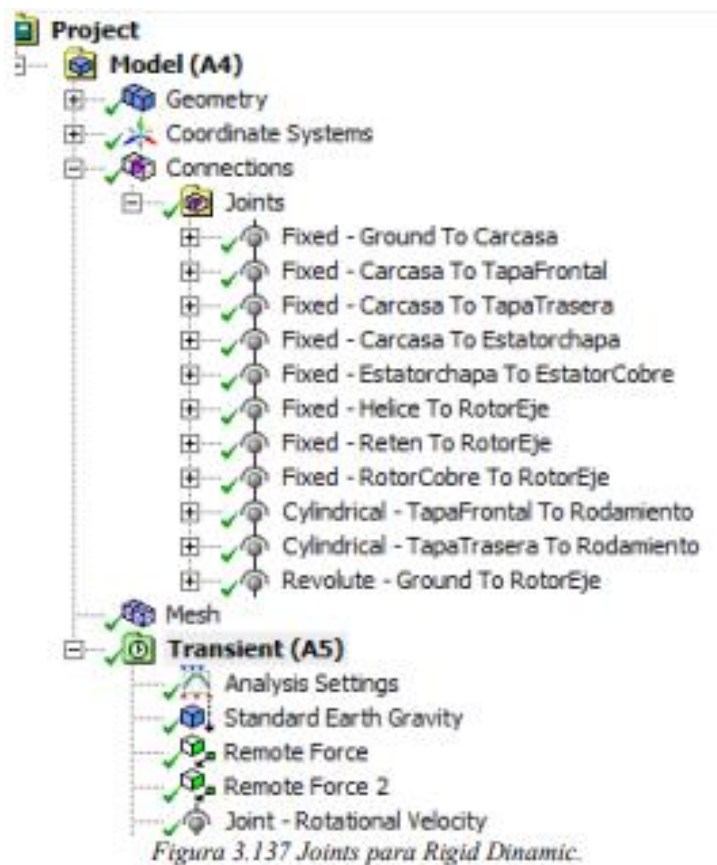
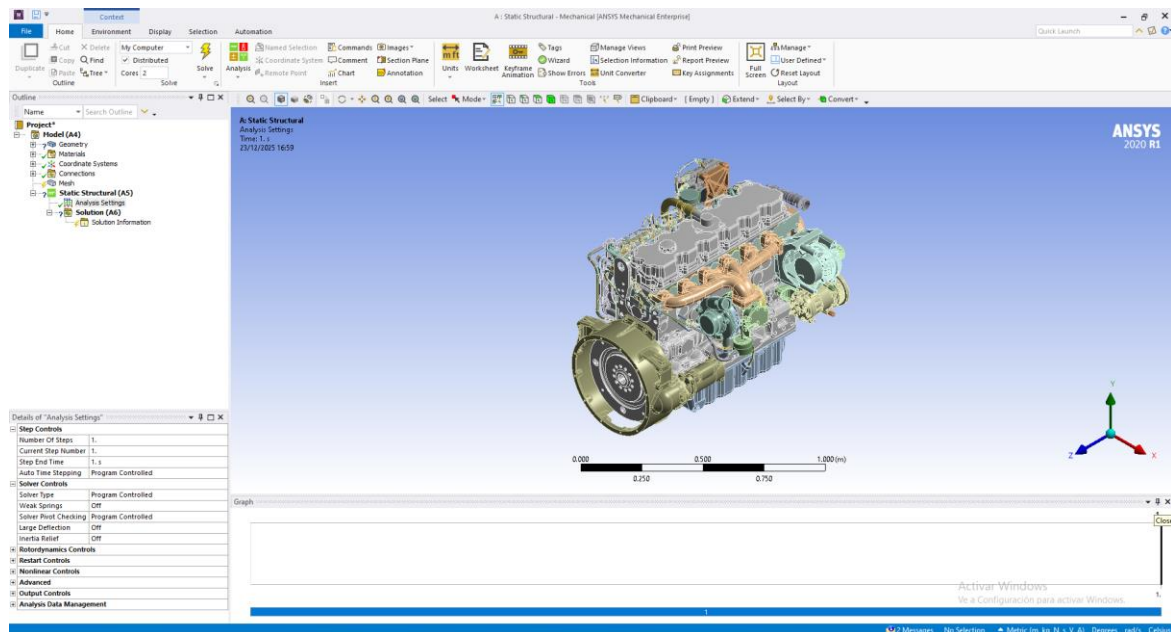


Figura 3.137 Joints para Rigid Dinamic.

Posteriormente, se establecieron las condiciones de carga no lineales del análisis transitorio; donde se aplicó una velocidad angular rotacional de 250 rad/s al eje del motor, valor equivalente a aproximadamente 2 400 rpm, con el fin de simular el movimiento de rotación durante el funcionamiento del motor, donde extra, se incorporaron dos fuerzas remotas de $-4\,000\text{ N}$, aplicadas sobre las tapas del motor, representando cargas externas asociadas al montaje y a las condiciones de operación.

Figura 38

Joints para modelar el rigid dinamic



La inclusión de la gravedad estándar permitió completar la representación de las condiciones físicas del sistema; por lo que esta configuración permitió evaluar la respuesta dinámica del conjunto bajo un esquema simplificado de funcionamiento, adecuado para el análisis cinemático del motor diésel Caterpillar C7.1

5.4. Determinación del consumo específico de combustible y eficiencia térmica:

5.4.1. Consumo específico de combustible a distintos regímenes de velocidad.

El consumo específico de combustible constituye uno de los indicadores más relevantes para evaluar el desempeño energético de motores diésel, ya que relaciona directamente el consumo de combustible con la potencia útil generada; por lo que en este estudio, dicho indicador fue determinado para el motor Caterpillar C7.1, considerando como muestra cuatro series operativas (E7A58896, E7A58932, E7A59570 y E7A60417), analizadas bajo tres regímenes de velocidad representativos del funcionamiento real del cargador frontal 950GC.

Figura 39

Intervalos de tiempo para el análisis

Details of "Analysis Settings"		Details of "Analysis Settings"	
Step Controls		Step Controls	
Number Of Steps	1,	Number Of Steps	1,
Current Step Number	1,	Current Step Number	1,
Step End Time	6,e-002 s	Step End Time	0,12 s
Auto Time Stepping	On	Auto Time Stepping	On
Define By	Time	Define By	Time
Initial Time Step	1,e-003 s	Initial Time Step	1,e-003 s
Minimum Time Step	5,e-006 s	Minimum Time Step	5,e-006 s
Maximum Time Step	6,e-002 s	Maximum Time Step	6,e-002 s
Time Integration	On	Time Integration	On

Figura 40

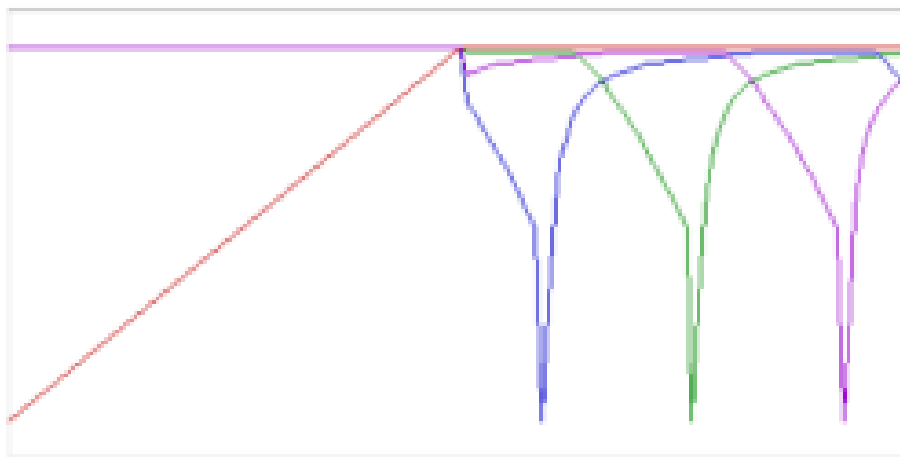
Condiciones de revoluciones

Details of "Joint - Rotational Velocity"	
Scope	
Joint	Revolute - Ground To CIGUEÑAL
Definition	
DOF	Rotation Z
Type	Rotational Velocity
☐ Magnitude	2000, RPM (step applied)
Lock at Load Step	Never
Suppressed	No

Los regímenes seleccionados fueron 1000 rpm, 1600 rpm y 2000 rpm, los cuales corresponden a condiciones de baja carga, régimen nominal y alta carga, respectivamente, por lo que estos valores permitieron evaluar la variación del consumo específico a lo largo del rango operativo del motor.

Figura 41

Interacción de las revoluciones en el análisis



En la Tabla 20 se presentan los valores del consumo específico de combustible obtenidos para cada serie y régimen de velocidad

Tabla 20

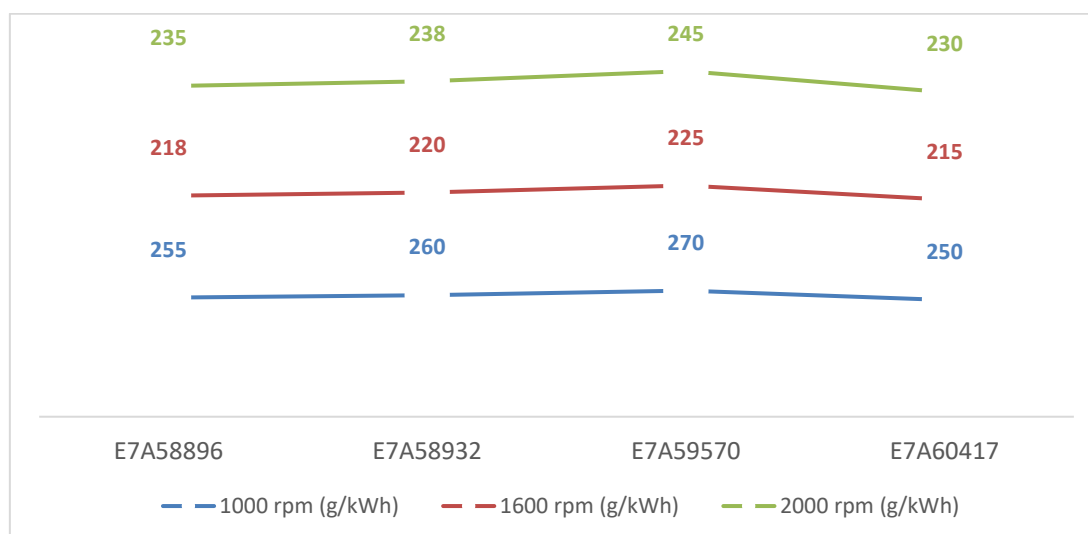
Consumo específico de combustible (BSFC) del motor Caterpillar C7.1

Serie del motor	1000 rpm (g/kWh)	1600 rpm (g/kWh)	2000 rpm (g/kWh)
E7A58896	255	218	235
E7A58932	260	220	238
E7A59570	270	225	245
E7A60417	250	215	230

La Figura 40 muestra la variación del consumo específico de combustible en función del régimen de velocidad del motor para las cuatro series analizadas

Figura 42

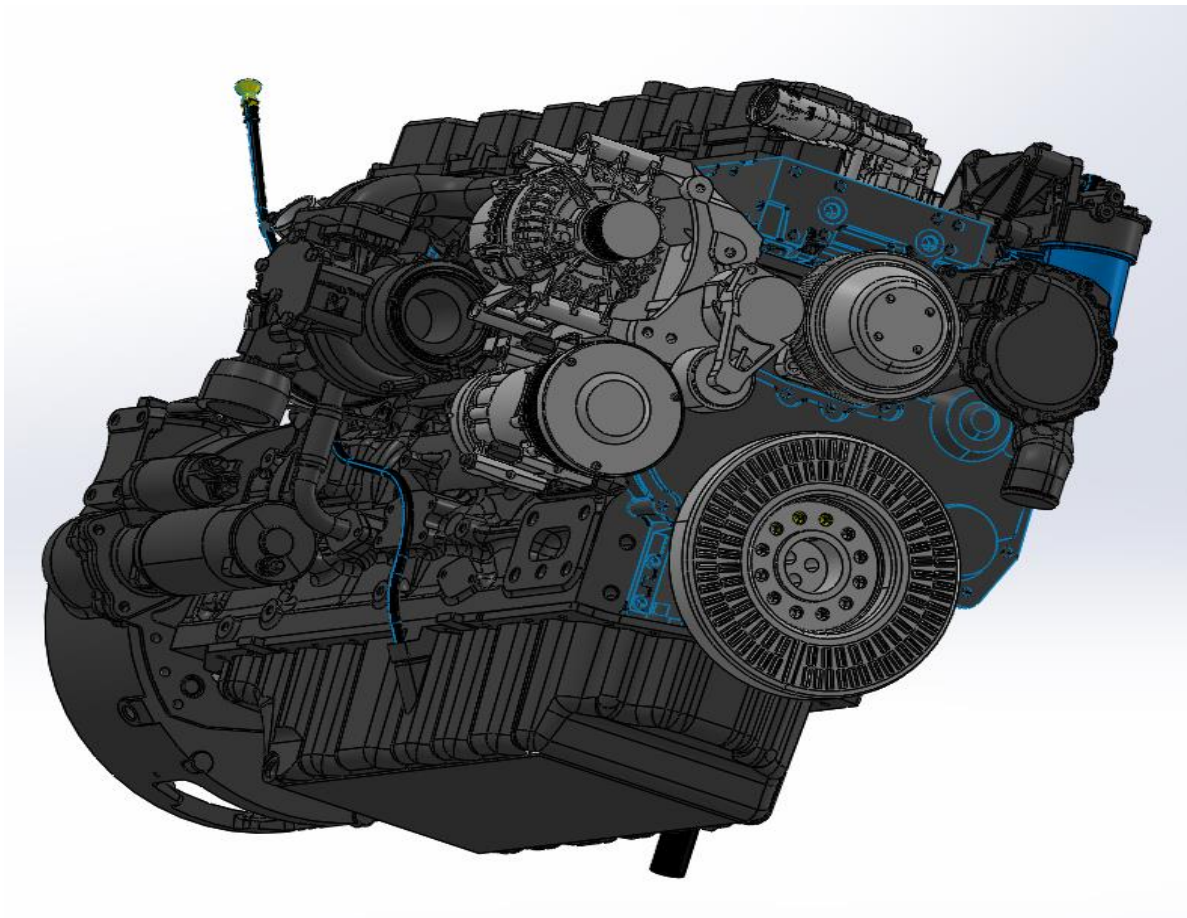
Consumo específico de combustible en función del régimen de velocidad del motor



Los resultados evidencian un comportamiento consistente en las cuatro series del motor Caterpillar C7.1. A 1000 rpm, el consumo específico presenta valores elevados, lo cual se atribuye a una menor eficiencia de conversión energética debido a la operación a baja carga; y al incrementarse la velocidad hasta 1600 rpm, el consumo específico disminuye significativamente, alcanzando sus valores mínimos, lo que indica un punto de operación energéticamente óptimo del motor.

Figura 43

Consumo específico en base al funcionamiento de velocidad



Sin embargo, al aumentar el régimen hasta 2000 rpm, se observa un incremento del consumo específico en todas las series; por lo que este comportamiento se asocia al aumento de las pérdidas mecánicas por fricción y a una mayor demanda de combustible para sostener el régimen elevado de operación; y a pesar de las diferencias absolutas entre series, la tendencia general se mantiene uniforme, lo que confirma la estabilidad del desempeño energético del motor C7.1 bajo distintas condiciones operativas

5.4.2. Eficiencia térmica del motor por régimen y serie

La eficiencia térmica del motor diésel Caterpillar C7.1 representa el grado de aprovechamiento de la energía química del combustible para la generación de trabajo mecánico útil.

Los valores de eficiencia térmica fueron obtenidos a partir del balance energético desarrollado en el modelo termodinámico del motor, empleando los valores de consumo específico de combustible y potencia efectiva correspondientes a cada régimen de operación.

5.4.2.1. *Relación entre eficiencia térmica y cargas térmicas y mecánicas*

El incremento de la eficiencia térmica observado en el régimen de 1600 rpm coincide con un aumento de las cargas térmicas y mecánicas en el motor, por lo que las simulaciones termo-estructurales realizadas en ANSYS muestran que, en este régimen, se alcanzan mayores presiones de combustión y temperaturas en la cámara, lo que incrementa las solicitaciones sobre los componentes del conjunto móvil.

Este resultado indica que una mayor eficiencia térmica implica una mayor transferencia efectiva de energía al sistema mecánico, lo cual se traduce en mayores esfuerzos internos

Figura 44

Eficiencia térmica de análisis estructural de la biela de la serie E7A59570

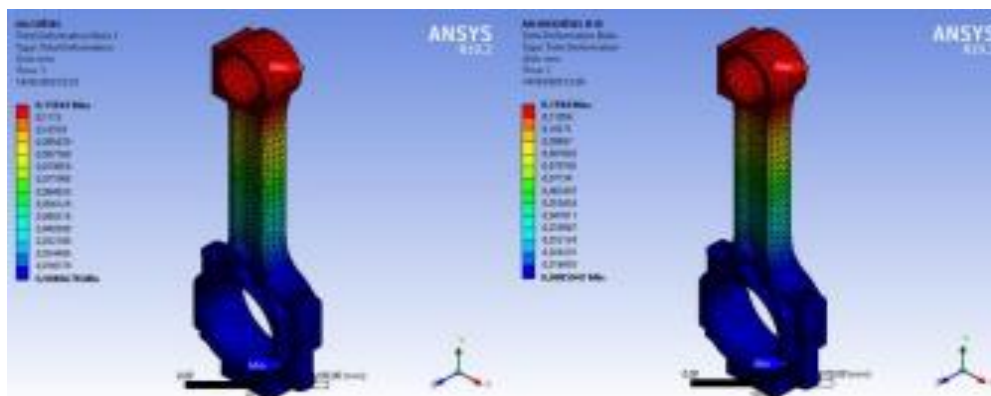


Figura 45

Eficiencia térmica de análisis termo-estructural de la biela de la serie E7A59570

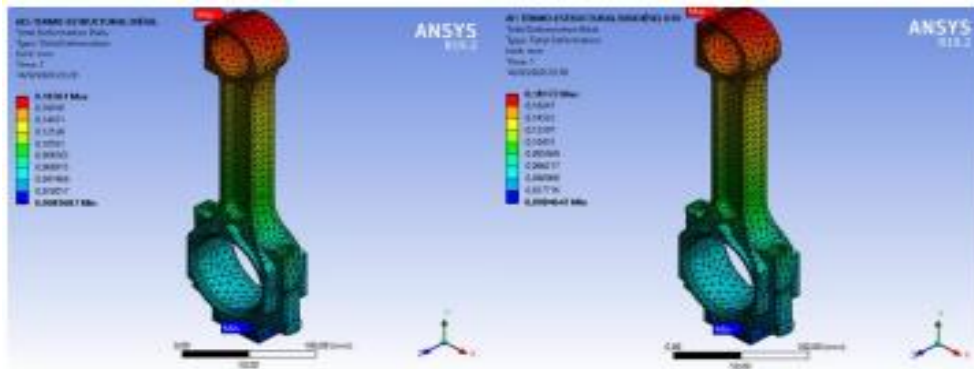


Figura 46

Eficiencia térmica de análisis estructural del cigüeñal de la serie E7A59570

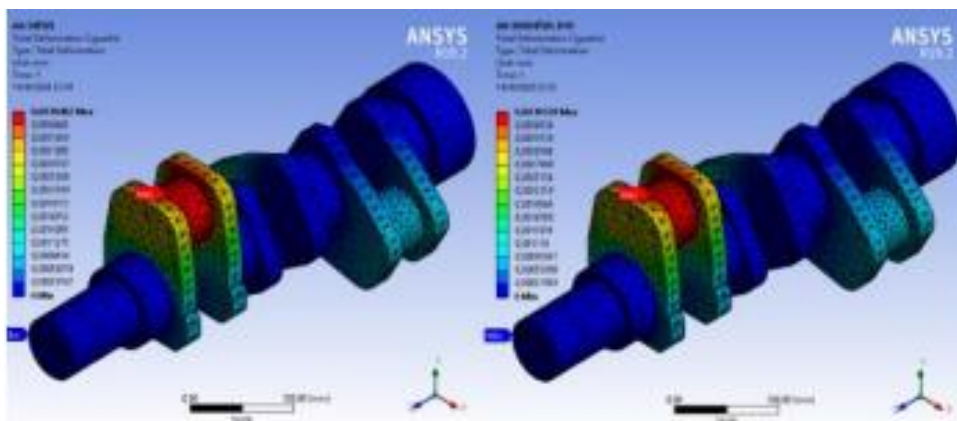
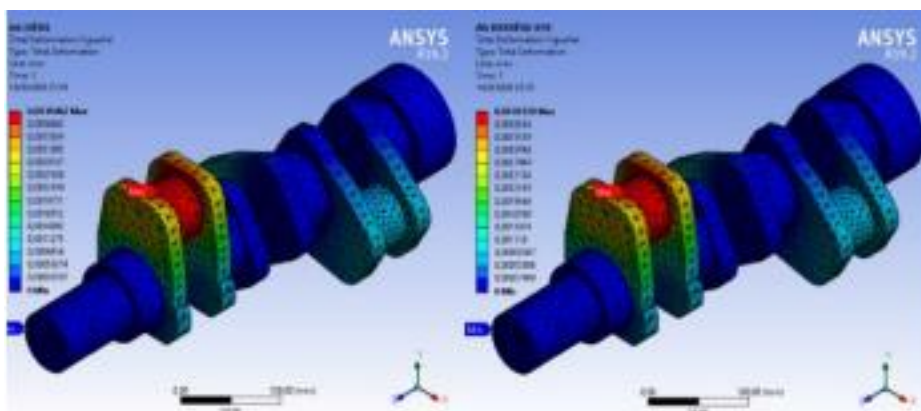


Figura 47

Eficiencia térmica de análisis termo-estructural del cigüeñal de la serie E7A59570



5.4.2.2. Deformaciones, rigidez y tensiones equivalentes asociadas a la eficiencia térmica

Las deformaciones totales obtenidas en el conjunto móvil aumentan al incrementarse la eficiencia térmica del motor, siendo más significativas en el pistón y la biela, componentes directamente expuestos a las cargas térmicas y mecánicas; y no obstante, las magnitudes de deformación se mantienen dentro de límites admisibles, evidenciando una rigidez global adecuada del motor C7.1.

El análisis de tensiones equivalentes de Von Mises muestra que los mayores valores se presentan durante el tiempo de expansión, coincidiendo con el régimen de mayor eficiencia térmica; donde las zonas críticas identificadas corresponden a la cabeza del pistón, el alojamiento del pin y los cuellos del cigüeñal.

Figura 48

Tensión equivalente del análisis estructural de la serie E7A588932

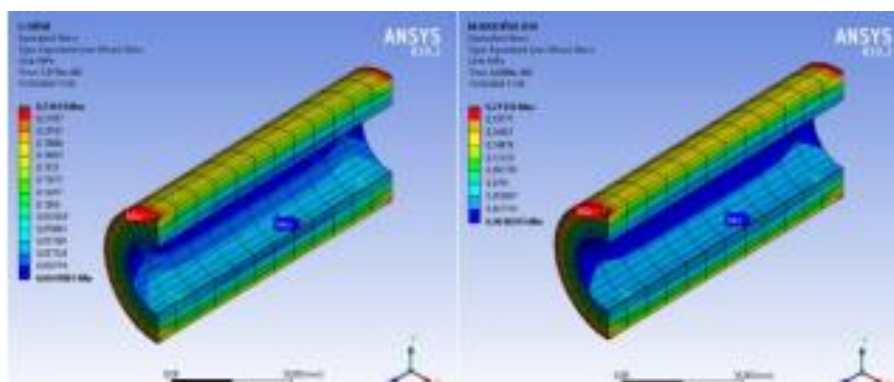
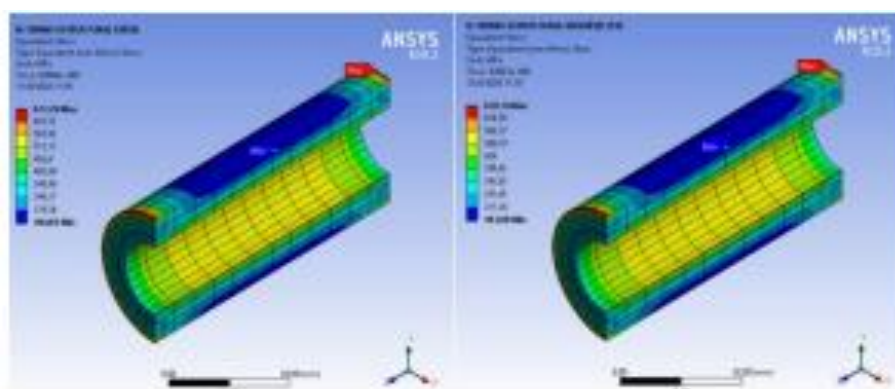


Figura 49

Tensión equivalente del análisis termo-estructural de la serie E7A588932



5.4.2.3. Factor de seguridad del motor en función de la eficiencia térmica

El factor de seguridad de los componentes críticos del motor presenta una disminución moderada en los regímenes de mayor eficiencia térmica, particularmente a 1600 rpm, y, sin embargo, los valores mínimos obtenidos se mantienen por encima de la unidad para las cuatro series analizadas, lo que confirma que el motor opera dentro de márgenes estructurales seguros incluso en las condiciones de mayor aprovechamiento energético.

Este comportamiento demuestra que el diseño del motor Caterpillar C7.1 contempla adecuadamente las exigencias estructurales asociadas a una alta eficiencia térmica.

Figura 50

Factor de seguridad de pistón estático de la serie E7A58896

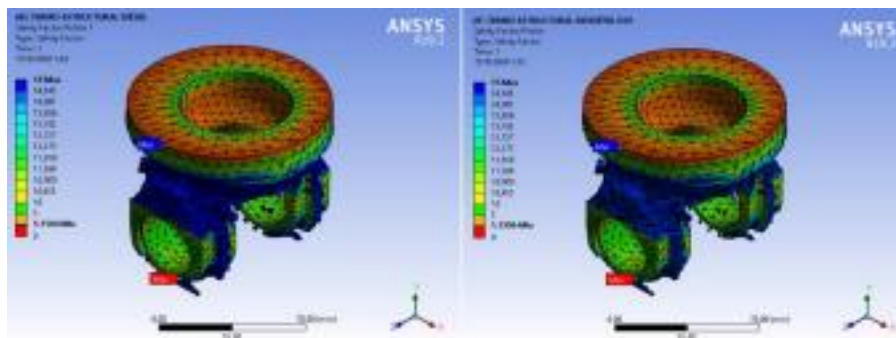
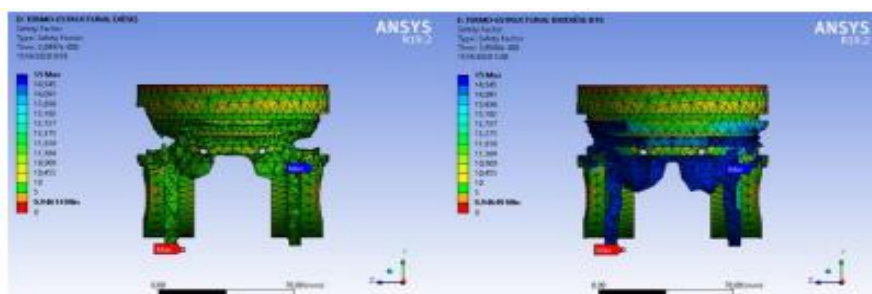


Figura 51

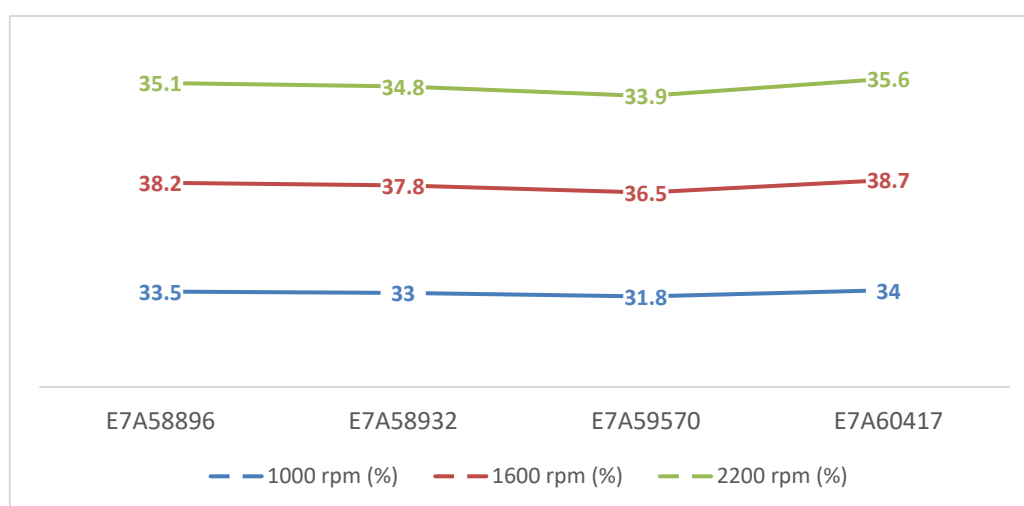
Factor de seguridad de pistón termo estructural de la serie E7A58896



En la Tabla 21 se presentan los valores de eficiencia térmica obtenidos para cada serie del motor Caterpillar C7.1.

Tabla 21*Eficiencia térmica del motor Caterpillar C7.1 por régimen y serie*

Serie del motor	1000 rpm (%)	1600 rpm (%)	2200 rpm (%)
E7A58896	33,5	38,2	35,1
E7A58932	33,0	37,8	34,8
E7A59570	31,8	36,5	33,9
E7A60417	34,0	38,7	35,6

Figura 52*Eficiencia térmica del motor Caterpillar C7.1 en función del régimen de velocidad*

Los resultados evidencian que, en las cuatro series del motor Caterpillar C7.1, la eficiencia térmica presenta un incremento progresivo al aumentar el régimen desde 1000 rpm hasta 1600 rpm, alcanzando sus valores máximos en este último régimen, por lo que este comportamiento indica que el motor opera con un mayor aprovechamiento energético en el régimen intermedio, donde se logra una relación más favorable entre el consumo de combustible y la potencia útil generada.

Al incrementar el régimen hasta 2200 rpm, se observa una disminución de la eficiencia térmica en todas las series; donde esta reducción se asocia al aumento de las pérdidas mecánicas por fricción, así como a mayores pérdidas térmicas debido al incremento de la temperatura de los gases de escape y a una mayor velocidad de los procesos internos del motor.

Desde el punto de vista comparativo, la serie E7A60417 presenta los valores más altos de eficiencia térmica en los tres regímenes analizados, mientras que la serie E7A59570 muestra los valores más bajos; y no obstante, las diferencias entre series se mantienen dentro de rangos moderados, lo que confirma que el desempeño térmico del motor Caterpillar C7.1 es consistente entre distintas unidades del mismo modelo, aun cuando existan variaciones operativas propias del historial de uso.

Finalmente, se realizó un análisis comparativo del comportamiento energético entre las cuatro series en el régimen nominal de 1600 rpm, con el fin de evaluar la consistencia global del motor C7.1, donde la Tabla 22 resume los valores de consumo específico considerados para este régimen

Tabla 22

Comparación del consumo específico a 1600 rpm

Serie	BSFC a 1600 rpm (g/kWh)
E7A58896	218
E7A58932	220
E7A59570	225
E7A60417	215

Las diferencias entre series se mantuvieron dentro de un rango reducido, lo que indica que, pese a variaciones operativas y de historial de uso, el desempeño energético del motor Caterpillar C7.1 es consistente entre distintas unidades del mismo modelo.

CAPÍTULO VI: ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

Los resultados obtenidos permitieron caracterizar el comportamiento operativo del motor Caterpillar C7.1, evidenciando que las series analizadas presentaron regímenes promedio comprendidos entre 1230 rpm y 1430 rpm, con factores de carga entre 24% y 31%, y consumos promedio entre 10.9 L/h y 14.2 L/h; donde la serie E7A59570 presentó el mayor consumo promedio (14.2 L/h), asociado a un mayor régimen de operación (1430 rpm) y mayor carga (31%), lo que confirma que el consumo energético está directamente influenciado por las condiciones operativas del motor; donde este comportamiento coincide con lo reportado por Reategui et al. (2024), quienes determinaron que el consumo de combustible de un motor Caterpillar C9 aumentó progresivamente conforme el régimen de velocidad se incrementó, registrándose valores entre 4.7 L/h y 6.7 L/h al pasar de 800 rpm a 1000 rpm; además, este incremento representa un aumento superior al 42%, evidenciando que el consumo está directamente relacionado con la demanda energética del sistema; de forma similar, en el presente estudio se observó una diferencia de 3.3 L/h entre el menor consumo (10.9 L/h) y el mayor consumo (14.2 L/h), equivalente a un incremento del 30.3%, lo que confirma la relación directa entre régimen de operación, carga aplicada y consumo energético; así mismo, estos resultados son consistentes con lo señalado por Licoa y Ortega (2022), quienes identificaron variaciones superiores al 30% en el consumo de combustible dependiendo de las condiciones operativas del motor; por lo que en ese sentido, el registro experimental de los parámetros operativos permitió validar que el consumo de combustible depende directamente del régimen de velocidad, carga aplicada y condiciones térmicas del motor, constituyendo una base fundamental para el modelamiento energético y análisis de eficiencia.

El modelo termodinámico desarrollado permitió simular el comportamiento energético del motor Caterpillar C7.1 y determinar el consumo específico de combustible en distintos regímenes operativos. Los resultados mostraron que el consumo específico presentó valores entre 215 g/kWh y 270 g/kWh, dependiendo del régimen de velocidad y la serie del motor; donde en el régimen de 1000 rpm, el consumo específico promedio fue de 258.75 g/kWh, mientras que a 1600 rpm se redujo a 219.5 g/kWh, lo que representa una disminución del 15.1%, indicando una mejora significativa en la eficiencia energética. Sin embargo, al incrementarse el

régimen a 2000 rpm, el consumo aumentó nuevamente a un promedio de 237 g/kWh, lo que representa un incremento del 8% respecto al régimen óptimo; ante esto, estos resultados coinciden con lo reportado por Ge et al. (2022), quienes determinaron que el menor consumo específico de combustible en motores diésel se presentó en regímenes intermedios (1500 rpm), debido a una mejor relación entre potencia generada y consumo energético; también, Ibrahim et al. (2023) señalaron que el consumo específico aumenta cuando el motor opera fuera de su régimen óptimo, debido al incremento de pérdidas térmicas y mecánicas; y de manera similar, el modelo desarrollado en esta investigación permitió identificar que el régimen óptimo del motor Caterpillar C7.1 se encuentra en 1600 rpm, donde se registraron los menores valores de consumo específico, alcanzando 215 g/kWh en la serie E7A60417 y 218 g/kWh en la serie E7A58896; por lo que esto demuestra que el modelamiento energético desarrollado fue eficaz para predecir el comportamiento del motor y determinar las condiciones óptimas de operación.

Los resultados mostraron que la eficiencia térmica del motor Caterpillar C7.1 varió entre 31.8% y 38.7%, dependiendo del régimen de operación y la serie del motor; donde el mayor valor de eficiencia térmica se registró a 1600 rpm en la serie E7A60417, alcanzando un valor de 38.7%, mientras que el menor valor se registró en la serie E7A59570 a 1000 rpm, con una eficiencia de 31.8%; dado que esto representa un incremento del 21.7% en la eficiencia térmica al pasar del régimen de baja velocidad (1000 rpm) al régimen óptimo (1600 rpm), lo que demuestra que el motor aprovecha de forma más eficiente la energía del combustible en regímenes intermedios; sin embargo, al aumentar la velocidad a 2200 rpm, la eficiencia disminuyó hasta valores entre 33.9% y 35.6%, lo que representa una reducción promedio del 8.4% respecto al régimen óptimo; donde estos resultados coinciden con lo reportado por Wang et al. (2020), quienes determinaron que la eficiencia térmica de los motores diésel es mayor en regímenes intermedios debido a una mejor combustión y menor pérdida energética; también, Uyumaz et al. (2020) indicaron que la eficiencia energética máxima en motores diésel se alcanza cuando el equilibrio entre consumo energético y generación de potencia es óptimo; y adicionalmente, Muñoz (2023) reportó valores de consumo específico entre 0.60 kg/kWh y 0.64 kg/kWh, observando que el incremento en la carga y velocidad del motor genera una disminución en la eficiencia energética; por lo que estos resultados son consistentes

con los obtenidos en la presente investigación, donde el menor consumo específico (215 g/kWh) coincidió con el mayor valor de eficiencia térmica (38.7%), confirmando la relación inversa entre consumo específico y eficiencia energética.

La simulación energética desarrollada permitió evaluar el comportamiento del motor Caterpillar C7.1 en diferentes condiciones operativas, confirmando que el régimen óptimo de operación se encuentra en 1600 rpm, donde el consumo específico fue mínimo (215–225 g/kWh) y la eficiencia térmica fue máxima (36.5%–38.7%); además, las diferencias entre las series analizadas fueron moderadas, con variaciones máximas del 4.6% en eficiencia térmica y del 8.8% en consumo específico, lo que demuestra que el modelo desarrollado presenta alta consistencia y precisión en la predicción del comportamiento energético del motor; donde estos resultados coinciden con lo reportado por Gamboa (2022), quien demostró que los modelos energéticos permiten mejorar la eficiencia operativa y reducir el consumo de combustible hasta en un 18%, al identificar condiciones óptimas de operación. De forma similar, Hinojosa (2024) determinó que la optimización de los parámetros operativos permitió mejorar el consumo energético en un 5%, lo que confirma la importancia del modelamiento energético en la optimización del rendimiento de motores diésel.

CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. Conclusiones

Respecto al objetivo específico 1, se registraron experimentalmente los parámetros operativos del motor Diesel Caterpillar C7.1, determinándose regímenes promedio comprendidos entre 1230 rpm y 1430 rpm, factores de carga entre 24% y 31%, y consumos promedio entre 10.9 L/h y 14.2 L/h, donde la serie E7A59570 presentó el mayor consumo de combustible con 14.2 L/h a 1430 rpm, mientras que la serie E7A60417 registró el menor consumo con 10.9 L/h, evidenciándose una diferencia de 3.3 L/h equivalente a un incremento del 30.3%, lo que confirmó que el consumo de combustible dependió directamente del régimen de velocidad y de la carga operativa del motor.

Respecto al objetivo específico 2, se desarrolló el modelo termodinámico del motor Diesel Caterpillar C7.1 mediante balances de energía, determinándose que el consumo específico de combustible varió entre 215 g/kWh y 270 g/kWh, evidenciándose que al incrementar el régimen de velocidad de 1000 rpm a 1600 rpm, el consumo específico se redujo de 258.75 g/kWh a 219.5 g/kWh, representando una mejora del 15.1% en la eficiencia energética, mientras que al aumentar el régimen a 2200 rpm, el consumo se incrementó hasta 237 g/kWh, lo que representó un aumento del 8% respecto al régimen óptimo, validando la precisión del modelo energético desarrollado.

Respecto al objetivo específico 3, se evaluó el comportamiento energético del motor mediante simulaciones comparativas, determinándose que el régimen de operación más eficiente fue 1600 rpm, donde se registraron los menores valores de consumo específico de combustible de 215 g/kWh y las mayores eficiencias térmicas de hasta 38.7%, además se identificó que las variaciones entre las cuatro series analizadas fueron moderadas, presentando diferencias máximas de 4.6% en eficiencia térmica y 8.8% en consumo específico, lo que confirmó la consistencia y confiabilidad del modelo energético desarrollado

Y como último objetivo específico, se determinaron los principales indicadores energéticos del motor Caterpillar C7.1, evidenciándose que la eficiencia térmica varió entre 31.8% y 38.7%, registrándose el mayor valor a 1600 rpm en la serie E7A60417

con 38.7%, mientras que el menor valor fue de 31.8% a 1000 rpm en la serie E7A59570, representando un incremento del 21.7% en la eficiencia térmica al operar en el régimen óptimo, confirmándose además una relación inversa entre el consumo específico de combustible y la eficiencia térmica del motor.

Como objetivo general, se realizó el modelamiento energético del motor Diesel Caterpillar C7.1, determinándose que el régimen óptimo de operación fue 1600 rpm, donde se registraron los menores valores de consumo específico de combustible entre 215 g/kWh y 225 g/kWh y la mayor eficiencia térmica de hasta 38.7%, evidenciándose que el consumo específico aumentó hasta 270 g/kWh y la eficiencia térmica disminuyó hasta 31.8% al operar en regímenes no óptimos, lo que confirmó que el modelamiento energético permitió determinar con precisión el comportamiento energético del motor y establecer las condiciones operativas más eficientes para reducir el consumo de combustible y mejorar su desempeño energético.

7.2. Recomendaciones

Se recomienda realizar ensayos experimentales adicionales en un banco dinamométrico bajo condiciones controladas de carga variable, con la finalidad de validar el modelo energético desarrollado en diferentes escenarios operativos, considerando rangos de carga superiores al 31% y regímenes intermedios entre 1000 rpm y 2200 rpm, lo que permitirá mejorar la precisión del modelo y ampliar su aplicabilidad en condiciones reales de operación.

Se recomienda incorporar variables térmicas adicionales como la temperatura de los gases de escape, temperatura del refrigerante y presión de inyección de combustible dentro del modelo energético, con el propósito de evaluar con mayor precisión las pérdidas energéticas del motor y mejorar la estimación de la eficiencia térmica y el consumo específico de combustible.

Se recomienda aplicar el modelo energético desarrollado en condiciones reales de operación en maquinaria pesada o vehículos equipados con motores Caterpillar C7.1, con el fin de comparar los resultados obtenidos mediante simulación con el comportamiento real del motor, permitiendo validar la confiabilidad del modelo bajo condiciones operativas dinámicas.

Se recomienda ampliar el estudio hacia el análisis comparativo con otros modelos de motores Diesel de características similares, así como evaluar el comportamiento energético utilizando diferentes tipos de combustible, como biodiésel o mezclas diésel-biodiésel, con el objetivo de determinar su influencia en el consumo específico de combustible y la eficiencia térmica del motor.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Arias, J., & Covinos, M. (2021). *Diseño y metodología de la investigación*. Perú: Enfoques Consulting EIRL. Obtenido de https://gc.scalahed.com/recursos/files/r161r/w26022w/Arias_S2.pdf

ASM International. (2021). *Manual ASM, Volumen 1: Propiedades y selección: Hierros, aceros y aleaciones de alto rendimiento*. ASM International.

BIT FINANZAS. (21 de Julio de 2025). *BIT FINANZAS CRIPTOMONEDAS Y FINANZAS*. (Comoddities) Recuperado el 26 de Julio de 2025, de <https://bitfinanzas.com/el-consumo-mundial-de-petroleo-alcanza-un-nuevo-record/>

CATERPILLAR. (2025). CAT. Obtenido de https://www.cat.com/es_MX/products/new/power-systems/industrial/industrial-diesel-engines/18279748.html

Chaparro, D., Ramírez, N., Munar, D., García, J., Cammaert, C., & Rincón, S. (2021). Minimizar el consumo de combustibles fósiles, una de las actividades dentro de las mejores prácticas bajas en carbono. *Fedepalma*, 592, 32-33. Obtenido de <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmicultor/article/view/13525>

Cuevas, R., & Nava, I. (2023). Producción de combustibles renovables. *Mundo Nano*, 16(30), 1e-50e. doi:<https://doi.org/10.22201/ceich.24485691e.2023.30.69635>

Fonseca, J., Granizo, J., Castillo, E., & Montufar, P. (2022). Determinación experimental de la eficiencia mecánica de un motor de combustión interna de encendido provocado por medio de las curvas de torque y potencia. *Polo del Conocimiento*, 7(7), 1735-1759. doi:<http://doi.org/10.23857/pc.v7i7>

Gamboa, W. (2022). *Estimación del consumo de combustible de ómnibus interprovinciales por el método de análisis de regresión lineal múltiple basado en parámetros operacionales y estilos de conducción en la ruta Lima - Trujillo*. Lima:

Pontificia Universidad Católica del Perú. Obtenido de <http://hdl.handle.net/20.500.12404/24626>

Ge, J., Yoon, S., & Song, J. (2022). Combustion and emission characteristics of a diesel engine fueled with crude palm oil blends at various idling speeds. *MDPI*, 12(13). doi:<https://doi.org/10.3390/app12136294>

Guerra, J., Morillo, A., Guasumba, J., & Guamán, J. (2021). La gestión de la inyección electrónica de combustible para los motores de encendido por compresión modernos (CRDI). *Polo del Conocimiento*, 6(8), 1062-1083. doi:<http://doi.org/10.23857/pc.v6i8.3000>

Hernández, C., Juárez, V., & Tejeda, J. (2025). Primera Ley de la Termodinámica. *TEPEXI Boletín Científico de la Escuela Superopr Tepeji del Río*, 12(23), 82-84. doi:<https://doi.org/10.29057/estr.v12i23.13634>

Herrera, D., Bermúdez, J., & Castilla, C. (2020). Análisis del desempeño de la potencia y el torque de un motor diésel operando con mezcla de biodiésel de palma. *Revista Ingeniería*, 25(3), 250-264. doi:<https://doi.org/10.14483/23448393.15676>

Hinojosa, E. (2024). *Estudio del desempeño y ajuste de parámetros de operación de motores Diesel aplicando la normativa Euro IV para optimizar su rendimiento en altitudes a más de 3000 msnm*. Cusco: Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco. Obtenido de <http://hdl.handle.net/20.500.12918/9170>

Ibrahim, G., Atak, N., Dogan, B., Yesilyurt, M., & Yaman, H. (2023). A detailed analysis of a diesel engine fueled with diesel fuel-linseed oil biodiesel-ethanol blends in a thermodynamic, economic, and environmental context. *CT&F - Ciencia, Tecnología y Futuro*, 13(2), 39-54. doi:<https://doi.org/10.29047/issn.0122-5383>

Ignacio, M., Vázquez, S. B., & Atilano, A. (2021). Sistemas termodinámicos. *TEPEXI Boletín Científico de la Escuela Superior Tepeji del Río*, 8(16), 34-37. doi:<https://doi.org/10.29057/estr.v8i16.7098>

Li, Z., Wang, Y., Yin, Z., Geng, H., Zhu, R., & Zhen, X. (2021). Effect of injection strategy on a diesel/methanol dual-fuel direct-injection engine. *Applied Thermal Engineering*, 189. doi:<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.116691>

Licoa, J., & Ortega, J. (2022). *Análisis de consumo de combustible en un motor diesel seis cilindros categoría M3 con variables controladas en un ciclo de conducción*. Ecuador: Universidad Politécnica Salesiana Sede Guayaquil. Obtenido de <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/23648>

López, A., Torres, F., Pla, B., Romero, B., & Bravo, D. (2021). Metodología para ingerir el mapa de desempeño y el consumo de combustible de un motor de combustión interna alternativo. *Novasineria*, 5(1), 43-60. doi:<https://doi.org/10.37135/ns.01.09.04>

Molina, J., Solís, J., Masaquiza, Á., & Rocha, J. (2022). Evluación del rendimiento en consumo de combustible y emisiones contaminantel del vehículo segmento A, aplicando la simulación de ciclo IM 240 en la ciudad de Riobamba. *Alfa Publicaciones*, 4(3), 365-388. doi:<https://doi.org/10.33262/ap.v4i3.1.264>

Moreno, H., Pineda, D., & Santos, L. (2022). Evolución e historia de los motores diésel. *Polo del Conocimiento*, 7(10), 744-760. doi:<http://doi.org/10.23857/pc.v7i10>

Mucha, L., Chamorro, R., Máximo, O., & Alania, R. (2021). Evaluación de procedimientos empleados para determinar la población y muestra en trabajos de investigación de posgrado. *Revista científica de ciencias sociales y humanidades*, 12(1), 50-58. doi:<https://doi.org/10.37711/desafios.2021.12.1.253>

Muñoz, M. (2023). *Características del performance de un motor diésel sobrealimentado usando mezclas de biodiesel y diésel para diferentes condiciones de explotación*. Lima: Universidad Tecnológica del Perú. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.12867/11363>

Osinergmin. (Diciembre de 2023). *Perú: demanda nacional de combustibles líquidos por departamento, Diciembre 2023*. Recuperado el 30 de Julio de 2025, de

https://www.osinergmin.gob.pe/seccion/centro_documental/hidrocarburos/SCOP/SCOP-DOCS/2023/01-Demanda-Nacional-Combustibles-Liquidos-Diciembre-2023.pdf

Puma, S. (2021). *Uso de las mezclas diésel-biodiésel-etanol y sus efectos sobre el proceso de combustión, desempeño energético y emisiones contaminantes de un motor de encendido por compresión de 240 kW*. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú. Obtenido de <https://tesis.pucp.edu.pe/server/api/core/bitstreams/7bdc4756-905d-4e7d-8665-6dc07994a0f2/content>

Reategui, C., Alvarado, J., & Garrido, B. (2024). Estudio del consumo de combustible y eficiencia del motor CAT C9 a diversos regímenes de r.p.m. mediante el uso de dinamómetro de pruebas. *Investigación aplicada e innovación*, 18. doi:<https://doi.org/10.71701/revistaii.v.18.2024.96>

Taipe, V., Llanes, E., & Morales, C. C. (2021). Evaluación experimental de un motor de encendido provocado bajo diferentes gasolinas. *INGENIUS*(26), 17-29. doi:<https://doi.org/10.17163/ings.n26.2021.02>

Tuya, R., & Cisneros, D. (2020). *Optimización de las propiedades dinámico-tradicionales del highway truck caterpillar para diferentes condiciones de operación*. Nuevo Chimbote: Universidad Nacional de Santa. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.14278/3646>

Uyumaz, A., Aydogan, B., Yilmaz, E., Solmaz, H., Aksoy, F., Mutlu, I., . . . Calam, A. (2020). Experimental investigation on the combustion, performance and exhaust emission characteristics of poppy oil biodiesel-diesel dual fuel combustion in a CI engine. *Fuel*, 280. doi:<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118588>

Wang, Y., Li, Z., Geng, H., Zhen, X., Liu, M., Xu, S., & Li, C. (2020). Investigation of injection strategy for a diesel engine with directly injected methanol and pilot diesel at medium load. *Fuel*, 266. doi:<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116958>

ANEXOS

Anexo 1.

Especificaciones técnicas del motor

Especificaciones Del Producto Para C7.1



Clasificación De Potencia

Potencia máxima	240 kW
Par máximo	1268 Nm a 1.400 rpm
Velocidad nominal	2.200 rpm
Potencia mínima	129 kW

Normas De Emisiones

Emisiones	Tier 4 final de la EPA de EE.UU./Stage V de la Unión Europea
-----------	--

Generalidades

Configuración del motor	6 cilindros en línea
Calibre	105 mm
Carrera	135 mm
Cilindrada	7 L
Relación de compresión	16.5:1
Aspiración	Posenfriamiento turboalimentado (TA) o serie de posenfriamiento turboalimentado (TTA)
Sistema de combustión	Inyección directa
Rotación desde el extremo del volante	Hacia la izquierda
Postratamiento	DOC +DPF+SCR

Dimensiones Del Motor: Aproximadas

Longitud	1064 mm
Ancho	798 mm

Altura	912 mm
Peso neto seco - Motor de funcionamiento básico sin accesorios opcionales	752 kg

Dimensiones De Postratamiento

Longitud	733 mm
Ancho	769 mm
Altura	455 mm
Peso	107 kg

Dimensiones De Postratamiento*

Diámetro	338 mm
----------	--------

C7.1 Equipos Estándar

Admisión De Aire

Filtros de aire estándar

Sistema De Control

El sistema de control electrónico completo, todos los conectores y mazos de cables son resistentes al agua y están diseñados para resistir entornos difíciles fuera de la carretera.

Las funciones flexibles y configurables del software y la barra colectora SAE J1939 CAN permiten máquina altamente integradas.

Sistema De Enfriamiento

Temperatura del tanque superior 108 °C (226 °F) como estándar para minimizar el tamaño del paquete de enfriamiento

Mezcla de agua y glicol 50/50

La guía sobre el diseño del sistema de enfriamiento se encuentra disponible por medio de su distribuidor para garantizar la confiabilidad del equipo.

Volante Y Caja Del Volante

Amplia variedad de interfaces de transmisión, incluidas las configuraciones SAE No. 1, SAE No. 2 y S.A.E No. 3

Sistema De Combustible

Riel común electrónico de alta presión

Diseño de filtro innovador para garantizar máxima protección del motor

Sistema De Lubricación

Varias opciones de sumideros para diferentes aplicaciones

Generalidades

Pintura: Amarillo Caterpillar, con colores opcionales disponibles a pedido

Equipo De Control De Emisiones Limpias O Postratamiento Tier 4 Final De La EPA De EE.UU., Stage V De La Unión Europea, Japón 2014 (Tier 4 Final)

Módulo de emisiones limpias (CEM) compuesto por el filtro de partículas diésel (DPF) y el catalizador de oxidación para combustible diésel (DOC)

Sistema de reducción de NOx (NRS)

Reducción catalítica selectiva (SCR)

Conexión de tubos flexibles de 3" con opciones rectas de 45° y 90° para la flexibilidad

Anexo 2

Ficha de componentes de estudio del motor

Categoría	Variable técnica	Descripción operativa	Unidad de medida	Rango de evaluación
Velocidad	Régimen de velocidad del motor	Número de revoluciones por minuto que desarrolla el motor bajo diferentes condiciones de carga	Rpm	Mín.: 1000 rpm Nominal: 2200 rpm Máx.: 2500 rpm
	Estado operativo	Clasificación del régimen según uso	Categórico	Ralentí Económico Nominal Máximo
Carga	Porcentaje de carga aplicada	Carga efectiva que soporta el motor respecto a su capacidad máxima de trabajo	%	25% 50% 75% 100%
	Par motor	Momento de fuerza generado por el motor cajo determinada carga	Nm	Variable
Consumo	Consumo horario de combustible	Cantidad de combustible utilizado por hora de operación en cada régimen y carga	L/h	Variable
	Consumo específico de combustible	Relación entre el consumo de combustible y la potencia efectiva desarrollada	g/kWh	200 a 250 g/kWh
Condiciones	Temperatura ambiente	Parámetro ambiental que puede influir en la combustión y eficiencia	°C	20 a 30 °C
	Tipo de combustible utilizado	Especificación del diésel empleado	Categórico	Diésel DB5 S50

