



UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO

CAMPUS IRAPUATO – SALAMANCA

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS

“ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL DESEMPEÑO DE
UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA
ALIMENTADO CON ACEITE PIROLÍTICO DE
RESIDUOS PLÁSTICOS”

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA MECÁNICA

PRESENTA:

Ing. Marlon Yesid Poveda Pachon

DIRECTORES DE TESIS:

Dr. José Manuel Riesco Ávila

Mtro. James Ronald Vera Roza

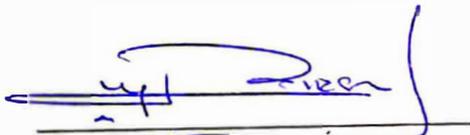
Salamanca, Gto., a 13 de febrero del 2023

**M. en I. HERIBERTO GUTIÉRREZ MARTIN
COORDINADOR DE ASUNTOS ESCOLARES
P R E S E N T E.-**

Por medio de la presente, se otorga autorización para proceder a los trámites de impresión, empastado de tesis y titulación al alumno(a) Marlon Yesid Poveda Pachon del *Programa de Maestría en ingeniería mecánica* y cuyo número de *NUA* es: 826847 del cual soy director. El título de la tesis es: Estudio experimental del desempeño de un motor de combustión interna alimentado con aceite pirolítico de residuos plásticos.

Hago constar que he revisado dicho trabajo y he tenido comunicación con los sinodales asignados para la revisión de la tesis, por lo que no hay impedimento alguno para fijar la fecha de examen de titulación.

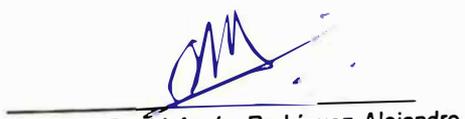
ATENTAMENTE



Dr. José Manuel Riesco Ávila
**DIRECTOR DE TESIS
SECRETARIO**



M. en I. James Ronald Vera Rozo
DIRECTOR DE TESIS



Dr. David Aarón Rodríguez Alejandro
PRESIDENTE



Dr. Alejandro Zaleta Aguilar
VOCAL



Agradecimientos

Agradezco a mi familia por apoyarme en mis decisiones y ser esa motivación de superación personal, especialmente a mi madre y José Torres, quienes siempre han estado presente en todo mi proceso de formación, inculcándome buenos valores y las ganas de ser mejor cada día. A mis hermanos Katherine, Daniel y Frank, quienes a pesar de la distancia me han aconsejado y acompañado.

Agradezco a mi amigo Carlos Pinzón, por el apoyo desinteresado que me brindo desde el primer momento en que inicie con el sueño de mi posgrado, a los consejos dados en momentos de incertidumbre, a las noches y madrugadas que me acompañó escuchándome y apoyándome, así como a los tiempos y espacios que me dedicó para apoyarme en la revisión y redacción de mi tesis.

Agradezco a mi asesor de tesis el Dr. Riesco, quien me asesoró y me dio la oportunidad de trabajar en el grupo de CMT.UG, así como de desarrollar este proyecto de tesis que me gustó mucho y a pesar de las dificultades se logró finalizar exitosamente.

Otro agradecimiento es a mi asesor y amigo James Vera, a quien le estoy infinitamente agradecido por haberme vinculado al posgrado y ser parte de mi crecimiento personal y académico, por los consejos y el acompañamiento durante la realización de mi posgrado. Reconocerle su dedicación y paciencia que tuvo para asesorarme y enseñarme a mejorar mi forma de estudiar, escribir y ver la vida.

Agradezco a Denilson Nava por ser parte del desarrollo de este proyecto, así mismo, a los estudiantes de licenciatura Christian, Carolina y Uriel por el apoyo en algunas actividades solicitadas.

Agradezco a David Rodríguez por sus consejos y las veces que dedico tiempo a explicarme y dar opciones que contribuyeran al mejoramiento del proyecto. Así como por su amistad brindada.

A mis amigos Diana, Yonathan, Francy, Juan Carlos, Darío, Saul, Arantxa, Vania y Cristian que estuvieron en el proceso de la maestría, por su acompañamiento, consejos y momentos vividos.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por la beca (805649) recibida durante la realización de mis estudios de maestría.



Resumen

En el presente trabajo se describe la construcción de un banco de pruebas y el estudio experimental del desempeño de un motor de combustión interna alimentado con aceite pirolítico de residuos plásticos, el cual es obtenido en la planta piloto de pirólisis ubicada en el laboratorio en termofluidos de la Universidad de Guanajuato, campus Irapuato-Salamanca. Como resultado se obtuvo un banco de pruebas totalmente didáctico, el cual fue caracterizado con gasolina comercial. Se obtuvieron las curvas características de potencia, torque y consumo específico para el banco usando gasolina (G), así mismo, se realizaron las pruebas dinamométricas para el aceite pirolítico liviano (LPO) y una mezcla volumétrica al 50% de cada componente (G50LPO50). Los resultados obtenidos se resumieron en las curvas de torque, potencia y consumo específico para los combustibles probados.

La comparación de curvas características de la gasolina comercial y los combustibles alternativos permiten concluir que los parámetros de torque y potencia no se ven afectados por el cambio de combustible, dado que las curvas de torque y potencia son muy similares para los tres combustibles. Por otro lado, las curvas de consumo específico muestran pequeñas variaciones en el rango de velocidades angulares de 2500 a 3200 rpm, pero no son cantidades significantes, las cuales oscilan entre 10% y 12%. Según los datos recopilados existe un aumento de consumo del motor cuando es alimentado con LPO. Por último, no existe fiabilidad en las mediciones de consumo específico para regímenes de giro superiores a 3300 rpm, ya que, para velocidades superiores el motor presenta demasiadas fluctuaciones y vibraciones que alteran el sistema de medición de consumo de combustible, a tal punto de encontrar intercepción entre las desviaciones.

En conclusión, este trabajo muestra la evaluación de combustibles alternativos y su impacto en el desempeño del motor. La información recopilada en este estudio proporciona una base experimental para futuros estudios en el área de motores de combustión interna y combustibles alternativos.



Abstract

This paper describes the construction of a test bench and the experimental study of the performance of an internal feeder motor with pyrolytic oil from plastic waste, which is obtained in the pyrolysis pilot plant located in the thermofluid laboratory of the University of Guanajuato, Irapuato-Salamanca campus. As a result, a totally didactic test bench was obtained, which was characterized with commercial gasoline. The characteristic curves of power, torque and specific consumption for the bench were obtained using gasoline (G), likewise, the dynamometric tests were obtained for the light pyrolytic oil (LPO) and a 50% volumetric mixture of each component (G50LPO50). The results obtained were summarized in the torque, power and specific consumption curves for the tested fuels.

The comparison of characteristic curves of commercial gasoline and alternative fuels allow us to conclude that the torque and power parameters are not affected by the fuel change, since the torque and power curves are very similar for the three fuels. On the other hand, the specific consumption curves show small variations in the range of angular speeds from 2500 to 3200 rpm, but they are not significant quantities, which oscillate between 10% and 12%. According to the data collected, there is an increase in motor consumption when it is fed with LPO. Finally, there is no reliability in the specific consumption measurements for turning mechanisms above 3300 rpm, since, for higher speeds, the engine presents excessive fluctuations and vibrations that alter the fuel consumption measurement system, to the point of finding interception between deviations.

In conclusion, this work shows the evaluation of alternative fuels and their impact on engine performance. The information collected in this study provides an experimental basis for future studies in the area of internal combustion engines and alternative fuels.



Contenido

Capítulo 1 Introducción.....	13
1.1. Reseña histórica de los motores	13
1.2. Petróleo	15
1.3. Revalorización de desechos plásticos.....	17
1.4. Hipótesis.....	19
1.5. Objetivo.....	20
1.6. Resumen por capítulos	20
Capítulo 2 Antecedentes	21
2.1. Motores de combustión interna	21
2.2. Motor de encendido provocado	24
2.3. Combustibles para motores de encendido provocado	26
2.3.1. Alcoholes	26
2.3.2. Aceites pirolíticos de residuos	26
2.4. Tipos de pruebas en motores.....	28
2.5. Resumen	30
Capítulo 3 Construcción de banco dinamométrico para un motor de encendido provocado.....	31
3.1. Motor.....	32
3.2. Torquímetro.....	33
3.3. Sistema de frenado.....	35
3.4. Sistema de adquisición de datos.....	37
3.4.1. Temperatura.....	37
3.4.2. Consumo de combustible	38



3.4.3. Flujo de aire	39
3.5. Resumen	41
Capítulo 4 Obtención de aceite pirolítico liviano.....	42
4.1. Antecedentes.....	42
4.2. Obtención y caracterización del aceite pirolítico	43
4.2.1. Materia prima	43
4.2.2. Metodología de obtención.....	44
4.3. Aceite pirolítico liviano	46
4.4. Resumen	47
Capítulo 5 Resultados	48
5.1. Introducción.....	48
5.2. Materiales y métodos	51
5.2.1. Materiales	51
5.2.2. Caracterización fisicoquímica de los combustibles.....	51
5.2.3. Metodología de pruebas dinamométricas.....	53
5.3. Resultados	53
5.3.1. Caracterización de los combustibles probados	53
5.3.2. Caracterización del banco con gasolina	59
5.3.3. Comparativas de potencia y torque	60
5.3.4. Comparativas de consumo específico	61
5.3.5. Temperaturas.....	63
Conclusiones.....	65
Recomendaciones y trabajos futuros	66
Bibliografía	67
Anexo 1	71



Termopar tipo K	71
NI-9213 National Instruments.....	71
NI USB-9162 National Instruments	72
Galga Extensiométrica o celda de carga	72
Transmisor HX711	73
Sensor MAF	73
Anemómetro de hilo caliente	74
Termopozo DS18D20	74
Anexo 2.....	75
Motor Pretul MOG-65P	75
Torquímetro.....	75
Módulo 721	76
Cojinete de apoyo	76
Banda V A35.....	77
Anexo 3.....	78
Anexo 4.....	81
A.4.1. Código Arduino para la adquisición de parámetros de flujo masico de aire y de combustible.....	81
A.4.2. Sistema de adquisición de temperaturas	82



Lista de figuras

Figura 1. Destilación y refinación de petróleo crudo, Fuente: [12].	16
Figura 2. Crecimiento de la demanda mundial de petróleo por producto entre 2019 y 2025, Fuente: [14].	17
Figura 3. Gestión de los residuos plásticos.	18
Figura 4. Línea de tiempo de evolución del MCI.	21
Figura 5. Evolución del límite de emisiones de gases establecido para motores a gasolina.	23
Figura 6. Esquema del funcionamiento del motor de cuatro tiempos, Fuente: [33].	26
Figura 7. Diagrama esquemático del proceso de pirólisis, Fuente: [35].	27
Figura 8. Clasificación de los diferentes tipos de ensayo en motores, Fuente: [40].	29
Figura 9. Esquema representativo del banco de pruebas, (---) señales.	31
Figura 10. Estructura de motor Pretul MOG-65P.	32
Figura 11. Sistema de admisión de aire.	33
Figura 12. Torquímetro Himmelstein modelo 29004TC.	34
Figura 13. Torquímetro unido a los coples flexibles.	34
Figura 14. Elementos de la flecha de transmisión de potencia.	35
Figura 15. Elementos del sistema de frenado.	36
Figura 16. Montaje del sistema de frenado.	36
Figura 17. Ubicación de termopares sobre la estructura del banco de pruebas.	38
Figura 18. Sensor MAF Nissan Sentra 1.8L 2003.	39
Figura 19. anemómetro HWA2005DL de hilo caliente.	40
Figura 20. Sensor de Temperatura DS18B20 tipo Sonda.	40
Figura 21. Esquema del sistema de admisión de aire con sensor MAF y sistema de medición consumo de combustible.	41



Figura 22. Principales factores que influyen en el producto de la pirólisis, Fuente: [43].	43
Figura 23. Materia prima para pirólisis, Fuente: [36].	44
Figura 24. Esquema de la instalación de la planta de pruebas.	45
Figura 25. CAD del banco de pruebas.	48
Figura 26. Banco de pruebas.	48
Figura 27. a) gasolina, b) G50LPO50, c) LPO	49
Figura 28. Bomba calorimétrica IKA C3000	51
Figura 29. Equipo de laboratorio general.	52
Figura 30. Cromatógrafo Varían 450 GC.	52
Figura 31. Curvas de destilación de las muestras.	54
Figura 32. Análisis de composición química de muestras.	55
Figura 33. Análisis PIANO de las muestras.	57
Figura 34. Comparación de propiedades de las muestras.	58
Figura 35. Curvas características MOG 65P con gasolina	59
Figura 36. Curvas de torque para las muestras.	60
Figura 37. Curvas de potencia para las muestras.	61
Figura 38. Curvas de consumo específico para las muestras.	62
Figura 39. Relación de potencia y consumo específico.	63
Figura 40. Fotografías termográficas sobre la superficie del motor.	64



Lista de tablas

Tabla 1. Composición química de petróleos típicos, Fuente: [10].	15
Tabla 2. Comparativa de límites de emisiones para vehículos pesados, Fuente: [27]. .	22
Tabla 3. Especificaciones técnicas del motor Pretul MOG-65P	32
Tabla 4. Posiciones de termopares en el banco de pruebas.	37
Tabla 5. Caracterización de productos obtenidos en la planta piloto.....	46
Tabla 6. Breve comparación de las propiedades y características de rendimiento en motores de gasolina.....	50
Tabla 7. Comparativa de gasolina comercial y aceite pirolítico liviano	56
Tabla 8. Temperaturas del banco de pruebas para las muestras.....	63



Nomenclatura

ANIPAC	Asociación Nacional de la Industria del Plástico
ASTM	American Society for Testing and Material
C ₂ H ₅ OH	Etanol
C ₃ H ₇ OH	Propanol
C ₄ H ₉ OH	Butanol
CAD	Computer aided design
CH	Cadenas hidrocarbonadas
CH ₃ OH	Metanol
CH ₄	Metano
CO	Monóxido de carbono
CO ₂	Dióxido de carbono
E50LPO50	Mezcla volumétrica 50% gasolina y 50% LPO
EPA	U.S. Environmental Protection Agency
Euro	Normativa europea sobre emisiones
F.S.	Full scale
FAP	Particulate filter
FID	Flame ionization detector
G	Gasolina
GLP	Gas licuado de petróleo
GNC	Gas natural comprimido
H ₂	Hidrógeno
HCCI	Homogeneous charge compression ignition
HC	Hidrocarburos no quemados
HDPE	High-density polyethylene
HEV	Hybrid Electric Vehicles
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
IO	Índice de octano
LDPE	Low-density polyethylene
LEV	Low Emission Vehicle
LPO	Aceite pirolítico liviano
MAF	Mass air Flow
mb/d	Millones de barriles por día
MCI	Motor de combustión interna
MCIA	Motores de combustión interna alternativos
MEC	Motor de encendido por compresión
MEP	Motor de encendido provocado



MON	Motor octane number
Mt	Millones de toneladas
NOM	Norma Oficial Mexicana
NO _x	Óxido de nitrógeno
OH	Grupo hidroxilo
PP	Polypropylene
PIANO	Análisis de parafinas, isoparafinas, aromáticos naftas y olefinas
PM	Material particulado
PMI	Punto muerto inferior
PMS	Punto muerto superior
PPO	Plastic to pyrolytic oil
RON	Research octane number
RVP	Reid vapor pressure
TFE	Temperatura final de ebullición
TIE	Temperatura de inicio de ebullición
TNGA	Toyota New Global Architecture
TPO	Tire pyrolytic oil
VE	Vehículos eléctricos
w/w	peso/peso



Capítulo 1

Introducción

1.1. Reseña histórica de los motores

El estudio de las máquinas y los mecanismos está ampliamente ligado al desarrollo de la sociedad y la construcción de estos puede afectar el transcurso de la humanidad. Esta afirmación puede sonar drástica, no obstante, es cierta y la historia lo ha demostrado. Un ejemplo particular es la máquina de vapor práctica diseñada por James Watt que fue utilizada por la humanidad desde el siglo XVI, produciendo avances en la ciencia, aplicación en la ingeniería y dando lugar al nacimiento de la revolución industrial [1].

En los primeros años las máquinas funcionaban solamente con vapor de agua, sin embargo, en 1860 se desarrolla un motor comercial capaz de generar trabajo mediante la alimentación de la quema de carbón y gas con aire atmosférico [2]. En esta misma época J.J.E Leinor crea el primer mecanismo de combustión por compresión de dos carreras, en la primera media carrera del pistón se genera la admisión del gas y el aire, continuando con el encendido de la mezcla por una chispa, donde la presión generada por los gases quemados es entregada al pistón, completando así medio ciclo, por último, son retirados los gases de la cámara de combustión, finalizando el ciclo. La eficiencia de estos motores era inferior al 5% en sus inicios. A este mecanismo se le denominó motor de combustión interna (MCI), el cual es un conjunto de elementos mecánicos que permiten obtener energía mecánica a partir de la combustión del fluido de trabajo.

Años más tarde, Nicolaus Otto y Eugen Langen introducen al mercado un motor de combustión interna con eficiencia térmica alrededor del 11%, este aumento en la eficiencia se debe a la aceleración del conjunto del pistón y la generación de vacío en el cilindro, sin embargo, el motor era muy pesado. En búsqueda de reducir el peso del motor y aumentar su eficiencia, Otto desarrolla un ciclo de cuatro carreras, admisión, compresión, explosión y escape; logrando elevar la eficiencia hasta un 14% y reduciendo el peso en un 68% aproximadamente.



Este avance tecnológico fue el génesis de la industria de MCI, generando un gran auge en Europa y Estados Unidos. En 1880, Dugald Clerk, James Jobson y Karl Benz desarrollan el motor de dos tiempos, en los cuales los procesos de admisión y escape sucedían al inicio de carrera de compresión y al final de la carrera de potencia, respectivamente. Por otro lado, James Atkinson fabrica un motor de alta eficiencia con baja durabilidad, con el que determina que la eficiencia es función de la relación de expansión, mientras que la relación de compresión está limitada por la ocurrencia de detonaciones (knocking).

Más adelante, en 1892 Rudolf Diesel patenta el motor de encendido por compresión donde el combustible es inyectado al aire calentado por la compresión; cinco años más tarde obtiene el primer prototipo comercial exitoso, este motor permite el uso de altas relaciones de compresión sin el riesgo de detonación y en consecuencia presenta casi el doble de eficiencia que los motores de la época. En 1957, Felix Wankel logró la primera prueba exitosa del motor rotativo [2], [3].

Los motores de combustión interna alternativos (MCIA) que se utilizan en la actualidad se derivan de los construidos por Otto y Diesel, también llamados motores de ciclo Otto y motores de ciclo diésel. Los motores de ciclo Otto o motores de encendido provocado (MEP) utilizan combustibles volátiles como gasolina, alcohol o mezcla de estos dos, además utiliza una chispa de ignición externa. Los motores de ciclo diésel o motores de encendido por compresión (MEC) utilizan como combustible el diésel, por lo que el encendido del combustible inyectado, en condiciones termodinámicas favorables, genera el autoencendido de la mezcla [4].

Además de los ciclos nombrados, desde un punto de vista tecnológico y ambiental, existen estudios sobre la implementación de métodos de combustión potencialmente ventajosos, como la combustión en modo HCCI (Ignición por compresión de carga homogénea), la cual combina las principales cualidades de la ignición por chispa y la ignición por compresión [5]. Así mismo, existen vehículos compuestos por un motor de combustión interna y un motor eléctrico, el término más utilizado para referirse a esta tecnología es vehículos eléctricos híbridos (HEVs) [6].

En la actualidad los MCI y MCIA son ampliamente utilizados en diversos sectores de la sociedad, y su aplicación depende de características como el tamaño, costo, potencia, peso, número de cilindros, tipo de combustible, entre otras. Los motores pequeños de



encendido provocado generalmente son monocilíndricos y empleados en cortadoras de césped, motosierras, motobombas, motores para generación de electricidad, motocicletas y algunas otras aplicaciones [4].

Por otra parte, los motores de múltiples cilindros son principalmente usados en el área del transporte terrestre (ferrocarril, vehículos de carga pesada, autobuses), marítimo y práctica automotriz [4]. Además, los motores alimentados con gas se aplican comúnmente en la industria y centrales eléctricas, también, la industria automotriz hace uso de estos motores para vehículos que funcionan con combustibles alternativos como el gas licuado de petróleo (GLP) o el gas natural comprimido (GNC) [7].

1.2. Petróleo

Diversos investigadores han debatido sobre el origen del petróleo, y han coincidido en que los combustibles fósiles son producto de la descomposición y acumulación de la materia orgánica (animal y vegetal) y ecosistemas microscópicos (algas y plancton) durante millones de años, y debido a las altas presiones y temperaturas las moléculas de carbono e hidrógeno se transformaron en sustancias más líquidas y de alta complejidad. El petróleo tiende a subir a la superficie de manera natural en algunos casos, sin embargo, existe la exploración y perforación para su obtención [8].

El petróleo está formado por compuestos de hidrocarburos y otros que contienen cantidades importantes de nitrógeno, azufre, oxígeno y otros compuestos como metales pesados y biomarcadores (vanadio, níquel) en menor proporción (Ver Tabla 1). Además, tiene componentes naturales como parafinas, naftenos y aromáticos, que también pueden ser producidos mediante procesos de refinación al igual que las olefinas [9].

Tabla 1. Composición química de petróleos típicos, Fuente: [10].

	Petróleo Crudo (%)	Gas Natural (%)
Carbono	82.2 - 87.1	65 - 80
Hidrógeno	11.7 - 14.7	1 - 25
Azufre	0.1 - 5.5	0 - 0.2
Nitrógeno	0.1 - 1.5	1 - 15
Oxígeno	0.1 - 4.5	-----

El petróleo crudo puede convertirse en productos refinados (GLP, gasolina, diésel, asfalto, entre otros) mediante la separación y procesamiento del crudo, el cual es sometido a transformaciones físicas y químicas. La Figura 1 es una representación de la destilación del crudo y refinación de los productos [11].

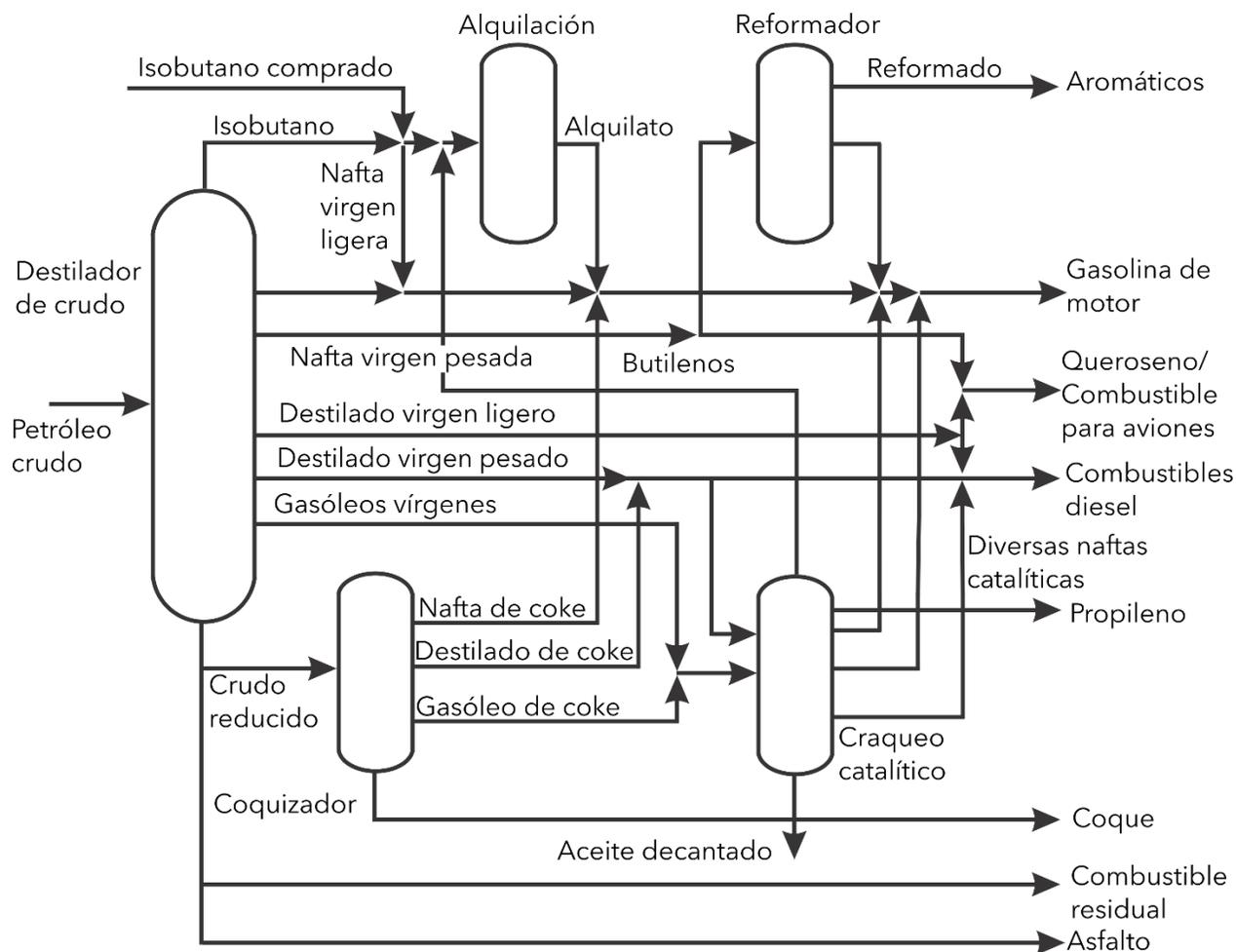


Figura 1. Destilación y refinación de petróleo crudo, Fuente: [12].

Los productos obtenidos de la refinación del petróleo son ampliamente utilizados por la sociedad en diferentes áreas como en el hogar, transporte e industria, más comúnmente como fuentes de energía. Aproximadamente 87% de la energía mundial es obtenida de combustibles fósiles y el 25% de esta energía es utilizada en el transporte e incrementa anualmente [13]. En la Figura 2 se puede observar la dependencia que tiene la sociedad hacia los hidrocarburos obtenidos a partir de petróleo, con una proyección de aumento en la demanda de 1.2 millones de barriles por día (mb/d) de gasolina [14].

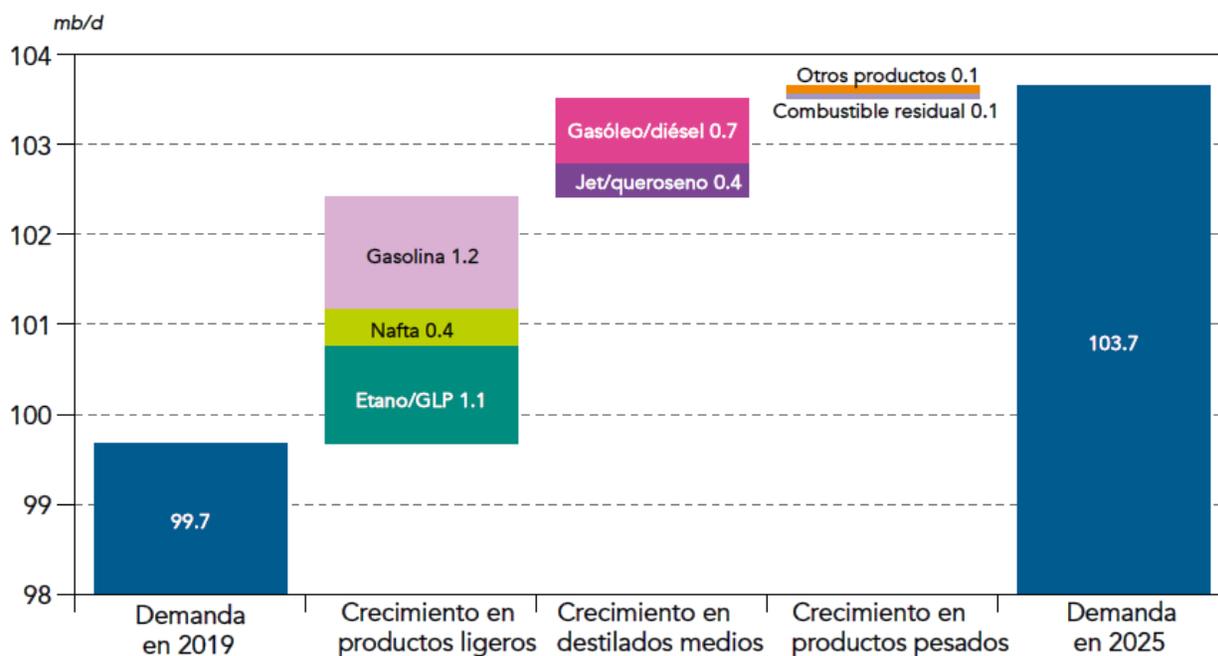


Figura 2. Crecimiento de la demanda mundial de petróleo por producto entre 2019 y 2025, Fuente: [14].

1.3. Revalorización de desechos plásticos

Uno de los principales problemas de nuestra sociedad es la generación y disposición de residuos sólidos, algo que debe ser resuelto en condiciones económicas y respetuosas con el medio ambiente [15]. En los últimos años, una importante cantidad de investigaciones se han enfocado en el desarrollo de nuevas tecnologías que permitan reciclar o reutilizar materiales de desecho como fuente de energía [16].

Las tecnologías del reciclaje de desechos plásticos son del tipo mecánico, químico o biológico (Ver Figura 3). El reciclaje mecánico consiste en la recolección, clasificación, lavado y trituración del material, y peletización [17]. El reciclaje químico consiste en la descomposición de plásticos para generación de energía, además puede ser implementado para desechos heterogéneos y contaminados sin una previa separación o clasificación [18].

Por otro lado, el reciclaje biológico consiste en transformar el residuo plástico en compost o biogás a partir de la acción de microorganismos o moléculas producidos por ellos, sin embargo, este método no es viable para todos los residuos plásticos o polímeros, solo para aquellos que son considerados biodegradables o que presentan

una alta biodegradabilidad. Es necesario aclarar que, si no es posible aplicar algún método de reciclaje, se puede realizar una recuperación de energía a partir de la quema de los desechos aprovechando su energía, o finalmente depositarlos en rellenos sanitarios [19].

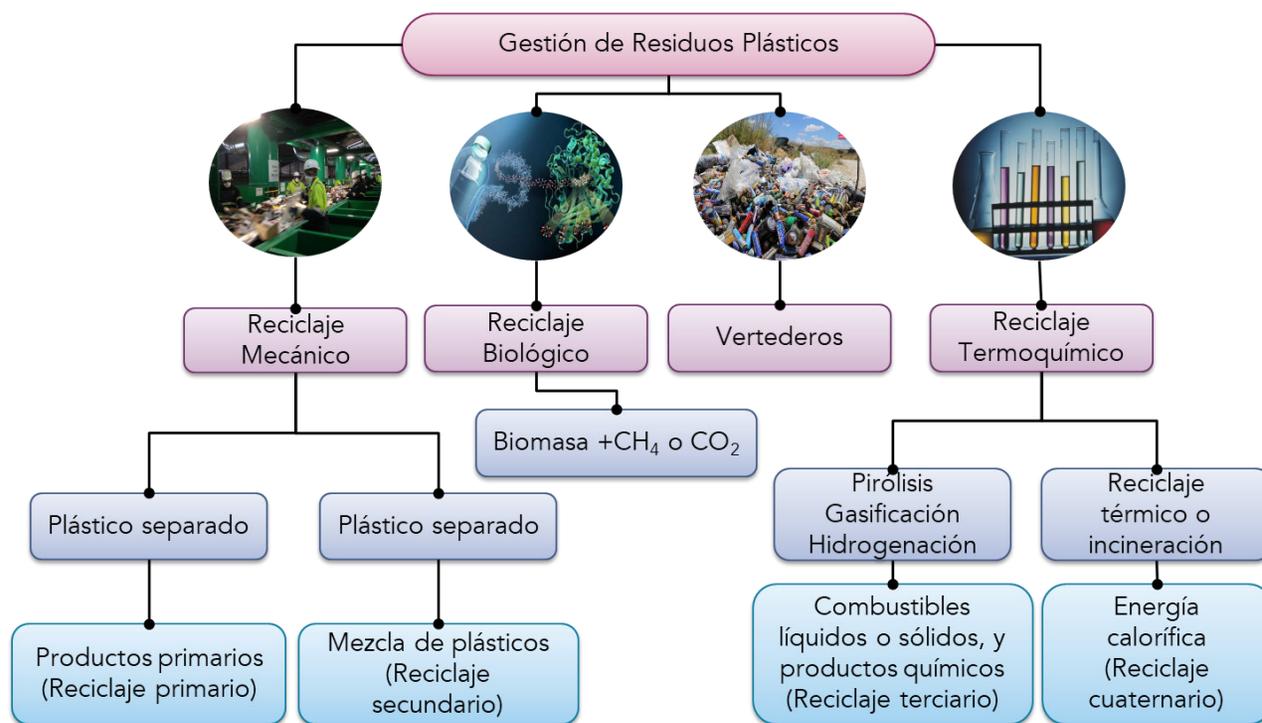


Figura 3. Gestión de los residuos plásticos

Es evidente que los plásticos se han convertido en una parte integral de la economía global y es utilizado casi en todos los sectores industriales, por lo cual, se prevé un aumento de 280% aproximadamente en la producción de plásticos para el 2060 [20].

A medida que aumenta la producción y uso del plástico también lo hace los desechos, los cuales aumentarán de 353 millones de toneladas (Mt) en 2019 a 1014 Mt en 2060. Además, lo preocupante es que los rellenos sanitarios o vertederos seguirán siendo la forma principal para gestionar los desechos plásticos, representando el 50% de todos los residuos en 2060 [20].

De acuerdo con la Asociación Nacional de la Industria del Plástico (ANIPAC), en México se producen alrededor de 7 Mt plásticos y el 48% de estos son de un solo uso. A su vez, en promedio se generan 122 gramos de residuos plásticos por persona diariamente, y



solo se recicla alrededor del 13% de los desechos plásticos según el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) en 2014.

Esta alta contaminación en México es perjudicial a nivel ambiental pues contamina océanos, arrecifes y ecosistemas marinos. Así mismo, ocasiona grandes impactos socioeconómicos, dado que en las zonas contaminadas comúnmente se desarrollan actividades turísticas, las cuales representaron ingresos para el país por 24 800 millones de dólares en 2019 [21].

Existen algunas alternativas que permiten obtener hidrocarburos a partir de polímeros que no son fácilmente reciclables, como la hidrogenación [18], gasificación [22], o pirólisis [23], [24]. Una tecnología que permite convertir los residuos plásticos en hidrocarburos es la pirólisis, es un proceso termoquímico en el que se produce descomposición del material orgánico a temperaturas elevadas en una atmosfera inerte, es decir, en ausencia de oxígeno. El proceso de pirólisis descompone las macromoléculas en productos líquidos, gaseosos y sólidos (carbón residual), permitiendo obtener un combustible que puedan ser usados de manera parcial o total en un MCI [25].

Otra etapa importante en el proceso de pirólisis es el sistema de recolección de los productos; las condiciones en el reactor principalmente definen el rendimiento y la calidad, mientras que la separación define la composición.

El combustible obtenido mediante la pirólisis puede ser utilizado en tractocamiones, barcos, ferrocarril y otros sistemas de carga, disminuyendo la demanda total de petróleo y permitiendo que, junto con otras alternativas a los combustibles convencionales, como los biocombustibles y el gas natural, aporten hasta un 10% de la demanda de combustible para el 2040 [7].

1.4. Hipótesis

Este trabajo plantea la siguiente hipótesis; es posible utilizar combustibles alternativos derivados del fraccionamiento de aceite pirolítico en motores de encendido provocado, ya sea solos o mezclados con combustibles convencionales; permitiendo consigo la reducción de millones de toneladas de residuos plásticos que en la actualidad no pueden ser reciclados por los métodos tradicionales y la disminución del impacto negativo en la biodiversidad de estos residuos.



1.5. Objetivo

Estudiar experimentalmente el efecto del uso de los hidrocarburos líquidos livianos obtenidos de la conversión termoquímica de residuos plásticos (polipropileno (PP), polietileno de alta densidad (HDPE), polietileno de baja densidad (LDPE)) en las prestaciones de un motor de combustión interna de encendido provocado, cuando se usan solo o mezclado con gasolina comercial.

1.6. Resumen por capítulos

Este libro está estructurado en 5 capítulos, el primero presenta una introducción a los MCI y la dependencia que estos han generado hacia los combustibles tradicionales, así mismo, la problemática actual sobre el manejo de residuos plásticos. Por último, presenta una posible solución al manejo de millones de toneladas de residuos plásticos que no pueden ser tratados por métodos tradicionales.

El segundo capítulo está enfocado hacia los MEP, donde se explica su funcionamiento, el tipo de combustible que utiliza y se presenta los tipos de ensayos empleados para la verificación del desempeño.

El tercer capítulo presenta el diseño, selección y construcción de cada uno de los sistemas que componen el banco de pruebas. En el cuarto capítulo se explica el proceso de pirólisis y la obtención de aceite pirolítico liviano.

En el quinto capítulo se muestra los resultados del trabajo, como la caracterización de los combustibles y las curvas características del motor cuando es alimentado con estos, así mismo, se discuten los resultados a lo largo del capítulo. Por último, se presentan conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros.

Capítulo 2

Antecedentes

2.1. Motores de combustión interna

Históricamente la humanidad ha buscado múltiples maneras de adquirir fuentes energéticas a partir de la transformación de recursos naturales como el carbón, petróleo, gas y otros. Estos últimos han sido sometidos a procesos fisicoquímicos derivando en combustibles, los cuales son aprovechados en dispositivos y máquinas para la obtención de calor y/o trabajo [26].

Anteriormente el vapor de agua fue utilizado como propulsor en las máquinas térmicas para el desarrollo de la sociedad antes de la creación del motor de combustión interna, donde el funcionamiento general es la obtención de trabajo a partir del calentamiento y expansión del vapor producto de la transformaciones de presión, temperatura y volumen en el interior de dicha máquina [26].

En la Figura 4 se denotan los eventos más relevantes respecto a la evolución de los MCI; algunos de estos eventos fueron explicados a mayor detalle en el ítem 1.1. Además, de otros sucesos de gran relevancia como el vencimiento de la patente de Diesel en 1908, permitiendo la producción masiva de los motores de encendido por compresión. Por otro lado, los motores Otto y diésel han sido ampliamente estudiados a lo largo de la historia, donde han presentaron mejoras en la combustión, tipo de inyección, rendimiento y en algunos casos funcionan con mezclas de combustibles tradicionales y alternativos [12].

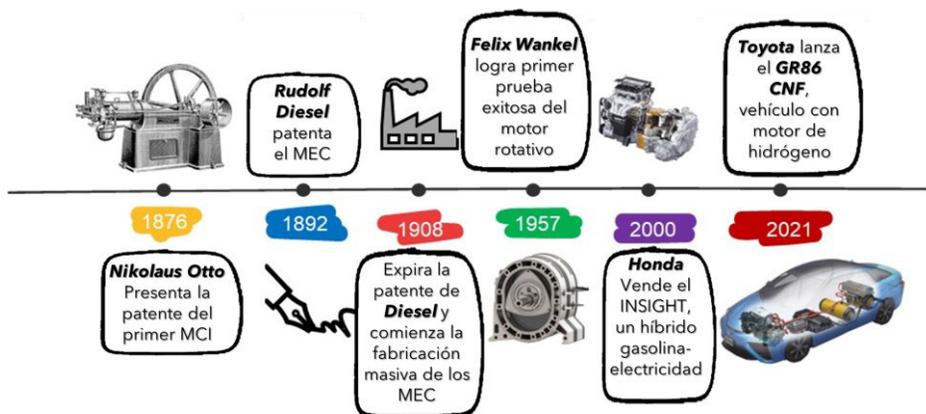


Figura 4. Línea de tiempo de evolución del MCI.



Debido a la contaminación generada por los motores, surgieron algunas normas internacionales que previenen y restringen las emisiones de efecto invernadero, provocando que fabricantes de motores se preocuparan por desarrollar y producir motores con mayor eficiencia y que se ajustaran a las legislaciones anticontaminantes [27]. Desde 2004, el registro para vehículos nuevos se ha regido por la norma de emisiones de escape LEV (Low Emission Vehicle/Vehículo de baja emisión). Además, la Agencia de Protección Ambiental (EPA) estableció límites de emisiones para vehículos de pasajeros y vehículos pesados [27].

Tabla 2. Comparativa de límites de emisiones para vehículos pesados, Fuente: [27].

Etapa	Año de implementación	Límite de emisiones (g/kW-h)				Combustible (ppm)
		NO _x	CO	HC	PM	
EPA 91	1991	6.70	15.50	15.50	0.10	2500
EPA 17	2017	0.20	15.50	1.30	0.01	15

En la Tabla 2 se observa una disminución de los límites para los MEC en los óxidos de nitrógeno (NO_x), el material particulado (PM) y los hidrocarburos no quemados (HC), mientras que para el monóxido de carbono (CO) se mantienen sin cambios [27].

Normativas europeas (Euro) han sido aplicadas desde 1992 hasta la actualidad en búsqueda de mejorar la calidad del aire y reducir la contaminación medioambiental, por ello han evolucionado y modificado los límites aceptables de emisiones de gases progresivamente desde la Euro 1(1992) hasta la Euro 6 (2014) [28].

La norma Euro regula y restringen la emisiones de NO_x, HC, CO y PM en los MCI y los límites dependen del tipo de vehículo, es decir, si es automóvil de gasolina o diésel, vehículo de turismo o de carga pesada, tren, tractor u otro. Además, en la Euro 5 obligaron a instalar filtros de partículas (FAP) a los vehículos diésel y el uso de la inyección electrónica directa en vehículos a gasolina [29].

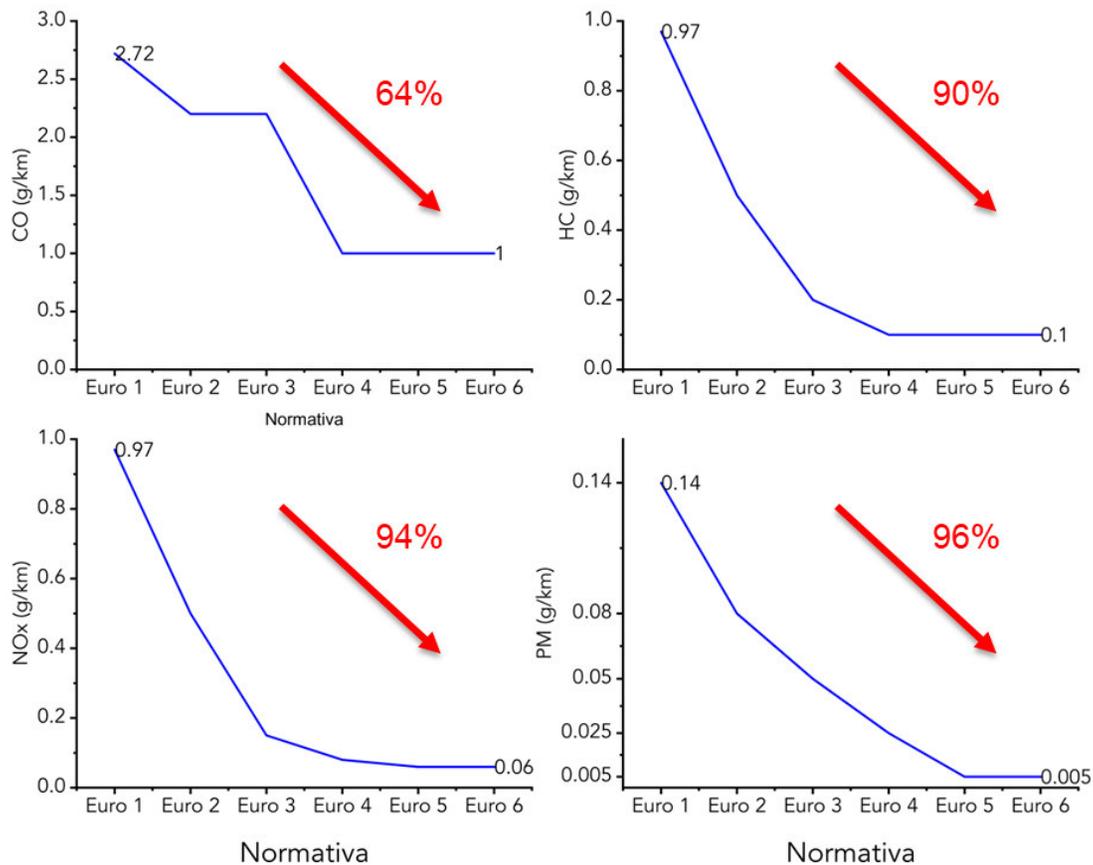


Figura 5. Evolución del límite de emisiones de gases establecido para motores a gasolina.

Actualmente México tiene normas vigentes que regulan las emisiones en vehículos pesados y cumplen el estándar de la Euro 4. Además, están en búsqueda de actualizar los estándares a través de la Norma Oficial Mexicana NOM-044, la cual es una homologación de la Euro 6 [30]. En la Figura 5 se puede apreciar la reducción de los límites permitidos por la Euro en las emisiones de gases en vehículos a gasolina [29].

Las restricciones y normativas han llevado al desarrollo de nuevas tecnologías que se ajustan a los limitantes propuestos por distintas naciones; un ejemplo particular es la industria de motores Toyota, que busca una sociedad sostenible mediante el reto medioambiental con cero emisiones en vehículos nuevos y el desafío de impacto positivo neto a través de la minimización y optimización del uso del agua, desarrollo de una sociedad y sistemas basados en reciclaje y la contribución de una sociedad futura que este en armonía con la naturaleza [31].



Para cumplir con los desafíos propuestos Toyota ha trabajado en TNGA (Toyota New Global Architecture), es cual es un nuevo enfoque para crear automóviles con un gran rendimiento, productos y diseños atractivos. El TNGA ha permitido desarrollar motores de gasolina como el Dynamic Force Engine el cual presenta una alta potencia, combustión de alta velocidad, bajas emisiones, una eficiencia térmica alrededor del 41% y un bajo consumo de combustible [31]. Lo que indica que proyectos como el TNGA pueden ser competitivos en los que respecta a la huella de carbono, emisiones de gases y contaminación ambiental contra tecnologías como los vehículos eléctricos (VE). Pues los VE presentan un mayor consumo energético y generación de dióxido de carbono (CO₂) en el proceso fabricación, en comparación con los vehículos de MCI. Además, requieren una alta demanda de energía eléctrica para la recarga de las baterías. Por último, no se han consolidado estrategias para el reciclaje de baterías de litio, lo que conlleva a un problema ambiental, dado que estas baterías tardan alrededor de 500 años en descomponerse, liberando durante este proceso metales altamente tóxicos [32].

2.2. Motor de encendido provocado

El motor de gasolina es un MCI, en el cual la combustión consiste en la deflagración de una mezcla homogénea aire-combustible realizada normalmente en el conducto de admisión y seguidamente explosiona dentro del cilindro cerrado por un émbolo o pistón movable [4].

La fase de explosión o combustión es ligeramente iniciada antes de que el pistón llegue al punto muerto superior (PMS) en la carrera de compresión, en la cual el motor inflama la mezcla mediante un aporte de energía externo, conocido como la ignición o chispa. Debido a esta chispa se generan reacciones de combustión, que se propagan a cierta velocidad al resto de la cámara por medio de un frente de llama, el cual va quemando la mezcla fresca que encuentra por delante y dejando atrás gases quemados a temperaturas elevadas y una alta presión en la cámara.

Producto de la combustión y la alta presión generada por los gases quemados, el pistón se desplaza desde el PMS hasta el punto muerto inferior (PMI), conociendo esta fase como tiempo de trabajo, es donde se produce el verdadero trabajo del motor. Por último, el movimiento del pistón desde el PMI hacia el PMS permite que los gases



quemados sean expulsados hacia la atmósfera [4]. Este motor puede ser de cuatro o de dos tiempos.

El funcionamiento de estos motores es similar, solo difieren en que el motor de dos tiempos no tiene válvulas, y por tal motivo, el cilindro sólo tiene un orificio para la admisión y otro para el escape. Además, los tiempos de admisión y expansión están unidos, al igual que los tiempos de compresión y escape [33]. Por otro lado, las fases de funcionamiento en un motor de gasolina de cuatro tiempos serán explicadas a continuación,

1. Fase de admisión (Primer Tiempo): Se genera la admisión de la mezcla aire-combustible. El pistón se separa del PMS descendiendo por el cilindro hasta el PMI, generando depresión en el cilindro y permitiendo el llenado con mezcla nueva, sin quemar. A su vez, la válvula de admisión está abierta y la de escape cerrada, como se aprecia en la Figura 6a.
2. Fase de compresión (Segundo Tiempo): El pistón se mueve desde el PMI hacia el PMS, comprimiendo la mezcla fresca, manteniendo cerradas las válvulas de admisión y de escape. Cerca al PMS se provoca la ignición de la mezcla (mediante la chispa), dando inicio al proceso de combustión, como se aprecia en la Figura 6b.
3. Fase de expansión o explosión (Tercer Tiempo) :Debido a la explosión de la mezcla el pistón desciende empezando la segunda revolución del cigüeñal. Durante esta carrera finaliza el proceso de combustión y se realiza el trabajo, por lo tanto, es el momento donde el motor enciende. Cerca al PMI, pero aún en la carrera de expansión, se abre la válvula de escape comenzando la liberación de los gases a la atmósfera, debido a que la presión de los gases es mayor a la atmosférica. Esta evacuación prematura se le denomina escape espontáneo y sucede antes de la carrera de escape, como se aprecia en la Figura 6c.
4. Fase de escape (Cuarto Tiempo): El pistón se desplaza desde el PMI hasta el PMS, manteniendo la válvula de escape abierta, de tal manera que, el movimiento del pistón expulse los gases quemados hacia la atmósfera. Cuando el pistón llega al PMS se cierra la válvula de escape y seguidamente se abre la de admisión, iniciando nuevamente el ciclo, como se aprecia en la Figura 6d.

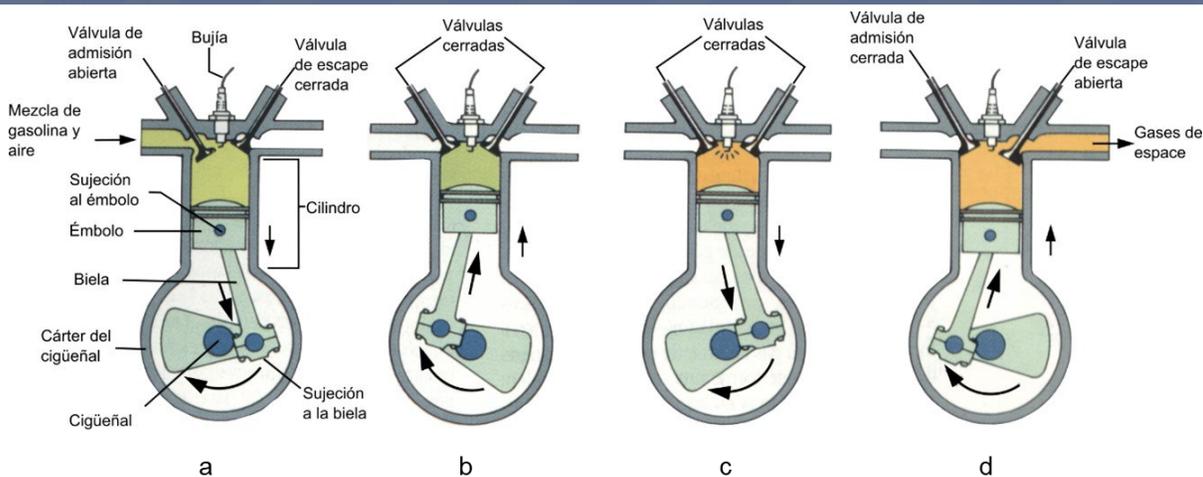


Figura 6. Esquema del funcionamiento del motor de cuatro tiempos, Fuente: [33].

2.3. Combustibles para motores de encendido provocado

Se ha estudiado la aplicación de combustibles alternativos en MEP, en búsqueda de reducir la dependencia al petróleo, mitigar la contaminación de gases efecto invernadero producto de la quema de combustibles fósiles y mejorar el desempeño del motor. Diversas materias se han utilizado como fuente de combustión, tales como alcoholes, biocombustibles, aceites pirolíticos de residuos, gases y mezclas de combustibles alternativos con gasolina comercial [7].

2.3.1. Alcoholes

Los alcoholes son ampliamente utilizados por diversas industrias para la producción de textiles, alimentos y bebidas, productos de aseo, cosméticos, pinturas y pueden ser usados en procesos de combustión, particularmente en MCI. Estos pueden ser usados puros o mezclados con combustibles convencionales. Los alcoholes están compuestos por cadenas hidrocarbonadas (CH) donde un átomo de hidrógeno es reemplazado por un grupo hidroxilo (OH) y su obtención puede ser a partir de derivados del petróleo o masa biológica. Actualmente, los alcoholes utilizados en los motores son el metanol (CH_3OH), etanol ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$), propanol ($\text{C}_3\text{H}_7\text{OH}$) y butanol ($\text{C}_4\text{H}_9\text{OH}$) [34].

2.3.2. Aceites pirolíticos de residuos

Estos combustibles son obtenidos de diversas materias primas (residuos sólidos urbanos, neumáticos, aceite de motor, plásticos, residuos de madera, entre otros) a través del

proceso de pirólisis. Los residuos son introducidos en un reactor y calentados a altas temperaturas, que permiten su degradación. Generalmente, las temperaturas de calentamiento seleccionadas buscan maximizar la obtención de producto líquido [35]. Sin embargo, es recomendable que se realicen procesos de destilación y fraccionamiento, lo que permite un mayor aprovechamiento del aceite pirolítico obteniendo productos con valor comercial, tales como combustibles de media y baja destilación (Ver Figura 7).

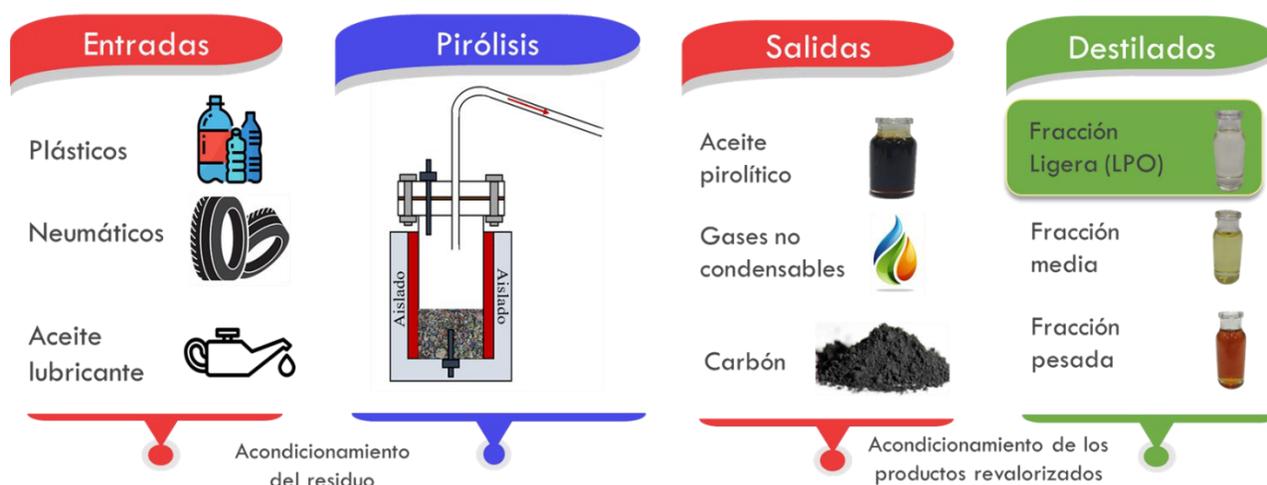


Figura 7. Diagrama esquemático del proceso de pirólisis, Fuente: [35].

Diversos investigadores han estudiado la conversión termoquímica de residuos para la obtención de aceite pirolítico. **Riesco et al.** [36] han estudiado la pirólisis de mezclas residuos plásticos de polipropileno (PP), polietileno de baja densidad (LDPE) y polietileno de alta densidad (HDPE), logrando un rendimiento líquido del 69% en peso. En la práctica, por cada kilogramo de residuos se logra recuperar 0.85 L de aceite pirolítico. Además, después de fraccionar el aceite, consiguen 21.12% en peso de fracción ligera con un índice de octano (92.2) y poder calorífico (44.4 MJ/kg) similar a los valores de la gasolina comercial; 56.52% en peso de fracción media con un índice de cetano (57.2) y poder calorífico (46.17 MJ/kg) y 22.36% en peso de fracción pesada similar a un combustóleo [36].

Por otra parte, **Villamizar** [37] produce aceite pirolítico utilizando como materia prima aceite lubricante usado en un MCI, variando la velocidad de calentamiento (15.9, 19.2, 22.5 °C/min) y la temperatura de pirólisis (390 y 420 °C). A partir del desarrollo del



diseño experimental factorial 2^2 con puntos medios en sus caras, concluye que los rendimientos de los productos líquidos están directamente relacionados con la temperatura de pirólisis. Además, reporta un rendimiento máximo de producto líquido liviano de 52.2%, a una temperatura de pirólisis de 420 °C y velocidad de calentamiento de 22.5 °C/min. También, informa que no existe influencia de la velocidad de calentamiento en el poder calorífico y la generación de productos sólidos [37].

Por último, **Mikulski et al.** [38] realizan un revisión sobre la aplicación de aceite pirolítico de neumáticos de desecho (TPO) en MCI, encontrando que este aceite cuenta con un poder calorífico de 43 MJ/kg el cual es similar al diésel, por lo que puede ser utilizado directamente en MEC y barcos. Además, mediante las técnicas actuales de pirólisis para neumáticos, es posible proporcionar rendimientos medios de crudo del 50%, sin necesidad de aportes energéticos externos.

Sin embargo, el uso del TPO como combustible genera un impacto negativo de gases de efecto invernadero, ya que elimina hasta 1.6 kg CO₂/kg TPO y puede llegar a emitir más NO_x, CO e hidrocarburos no quemados en comparación con el diésel. Otras limitaciones de su uso en el sector automotriz son la viscosidad, punto de inflamación, contenido de azufre, número de cetano y fracción de hidrocarburos poliaromáticos [38].

2.4. Tipos de pruebas en motores

La verificación de un motor es necesaria para definir un buen desempeño, descartar fallas y evitar accidentes durante su funcionamiento, por tal motivo, existen diversos tipos de ensayos en MCI, como los de producción, los cuales se realizan en motores fabricados en serie, y sirven para comprobar que las características correspondan a las de los prototipos y al mismo tiempo elaborar un periodo de rodaje o asentamiento del motor [39].

Asimismo, los ensayos de homologación se realizan para comprobar las prestaciones de un motor frente a organismos oficiales, suelen realizarse bajo ciertas normativas internacionales (DIN, ISO, SAE, UNE, entre otras), las cuales describen la metodología del ensayo. A su vez, los ensayos de recepción son los ejecutados a solicitud del usuario, y éstos pueden ser normativos o no. Sin embargo, estos tipos de ensayos no son de interés en este caso estudio.

Por otro lado, los ensayos de investigación y desarrollo son realizados en espacios apropiadamente equipados, con la finalidad de caracterizar el motor o sus componentes [39].

Estas pruebas permiten el estudio de fenómenos físicos, químicos y fisicoquímicos. Las principales pruebas experimentales para la caracterización de un motor son las que permiten determinar el par motor, potencia, presión en cámara, consumo de combustible, rendimientos, composición de gases y pérdidas de calor [39].

Existe otra categorización la cual depende de la forma de ejecución del ensayo y puede clasificarse en tres grandes grupos. Primeramente, en ensayos con combustión, estos se realizan con el motor funcionando normalmente y estabilizado en unas condiciones; permite obtener resultados más apegados a la realidad y reflejan los parámetros reales. Sin embargo, se dificulta medir ciertos parámetros en condiciones de funcionamiento. Por otro lado, los ensayos sin combustión utilizan una fuerza externa para arrastrar el motor, permiten estudiar las pérdidas mecánicas y el movimiento de la carga en el interior del cilindro, pero difieren de las condiciones de funcionamiento reales. Por último, el tercer tipo de ensayo es sobre modelos, permiten simular algunos procesos del motor en un banco de ensayo especial, facilitando la toma de medidas y datos.

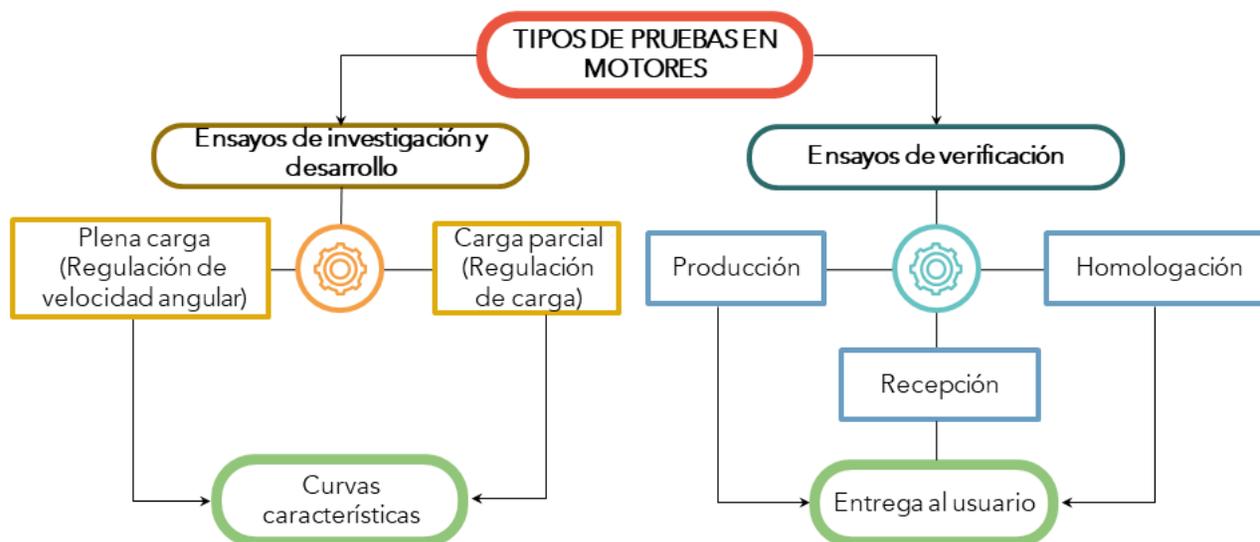


Figura 8. Clasificación de los diferentes tipos de ensayo en motores, Fuente: [40].



La determinación de estos parámetros permite la obtención de las curvas características, no obstante, existen dos formas de obtenerlas. Una es a plena carga, donde se hace un barrido de regímenes de giro con el máximo grado de carga, y otra donde se hace a cargas parciales, es decir, a un régimen dado se va modificando el grado de carga [40].

Como se puede observar en la Figura 8, los ensayos de investigación y desarrollo permiten la obtención de las curvas características, la cuales definen el comportamiento de los motores mediante tres curvas: curva de potencia del motor, curva de torque del motor y curva de consumo específico del motor [4].

2.5. Resumen

El desarrollo del MEP ha evolucionado a lo largo de la historia, con diversos investigadores trabajando para mejorar su rendimiento a través de la modificación de sus parámetros geométricos y operacionales, así como del reemplazo parcial o total del combustible. Estas mejoras son necesarias para cumplir con las normativas de emisiones, rendimiento del motor y combustibles impuestas por diversos países. Para verificar el cumplimiento de estas normas y evaluar el rendimiento del motor, se construyen bancos de pruebas. Este trabajo en particular presenta la construcción de un banco de pruebas para evaluar el rendimiento del MEP cuando es alimentado con un combustible pirolítico liviano.

Capítulo 3

Construcción de banco dinamométrico para un motor de encendido provocado

Para el estudio experimental del desempeño de un MCI alimentado con aceite pirolítico de residuos plásticos, se diseña y construye un banco dinamométrico que permita determinar las curvas características del motor.

El banco de pruebas esta constituido por tres sistemas principales, motor, torquímetro y sistema de frenado, los cuales permiten obtener parámetros esenciales como el par o torque al freno, potencia y consumo específico. En el motor se miden variables de entrada y de salida, como flujo de aire, flujo de combustible y temperatura de los gases de escape. El torquímetro entrega velocidad angular y torque. Por último, el sistema de frenado es el encargado de variar las velocidades sobre el motor.

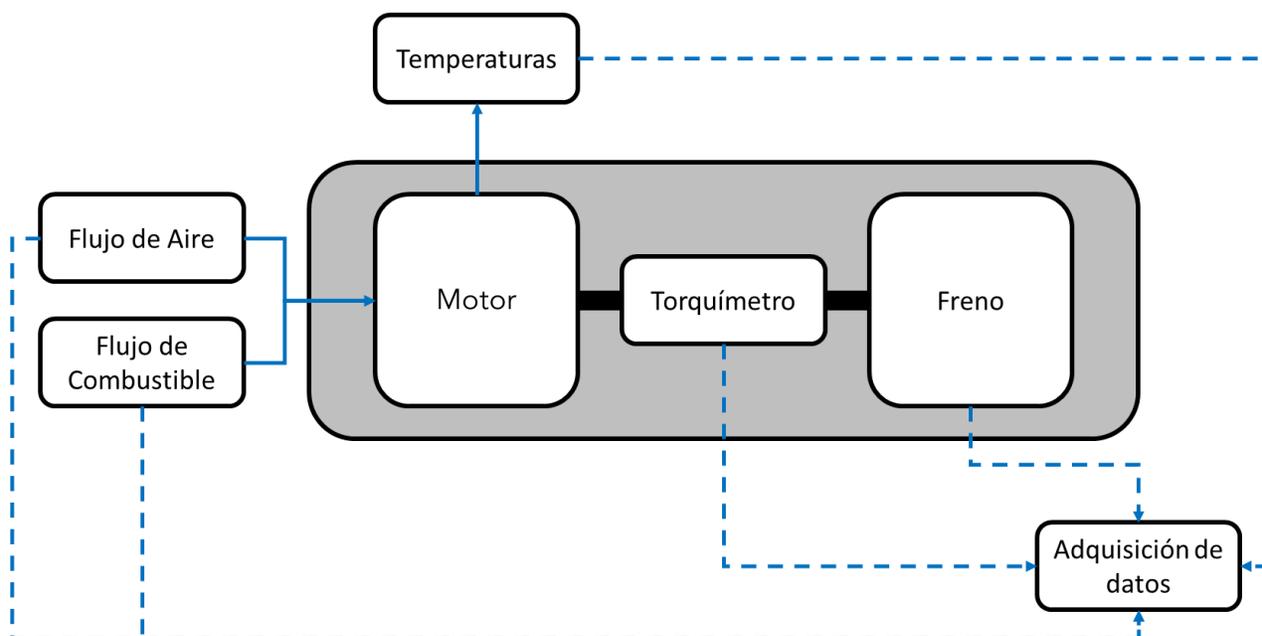


Figura 9. Esquema representativo del banco de pruebas, (---) señales.

3.1. Motor

El motor a gasolina marca Pretul tiene una estructura de motor OHV (Over Head Valves) a 4 tiempos de alto desempeño. Algunas de sus especificaciones se pueden presentar en la Tabla 3 así como en el Anexo 2.

Tabla 3. Especificaciones técnicas del motor Pretul MOG-65P

Ítem	Especificación
Tipo	Gasolina, monocilíndrico, 4 tiempos
Refrigeración	Aire
Velocidad nominal de rotación	3 600 rpm
Potencia nominal	6.5 hp – 4 847 W
Consumo de combustible	0.7 L/h
Sistema de alimentación	Inyección directa
Cilindraje	196 cm ³
Relación de compresión	8.5:1
Peso	13 kg

El motor Pretul MOG-65P (Ver Figura 10-a) es ampliamente usado en motobombas, máquinas para construcción, equipamiento para jardinería, moto cultivadores, hidrolavadoras, entre otros. Por otro lado, los fabricantes recomiendan un rango de operación entre 2000 y 3600 rpm, para garantizar un correcto funcionamiento y prolongar la vida útil del equipo. Sin embargo, para el montaje del motor en el banco dinamométrico es necesario modificar su estructura, retirando el depósito de combustible, exhosto y filtro de aire como se visualiza en la Figura 10-b.

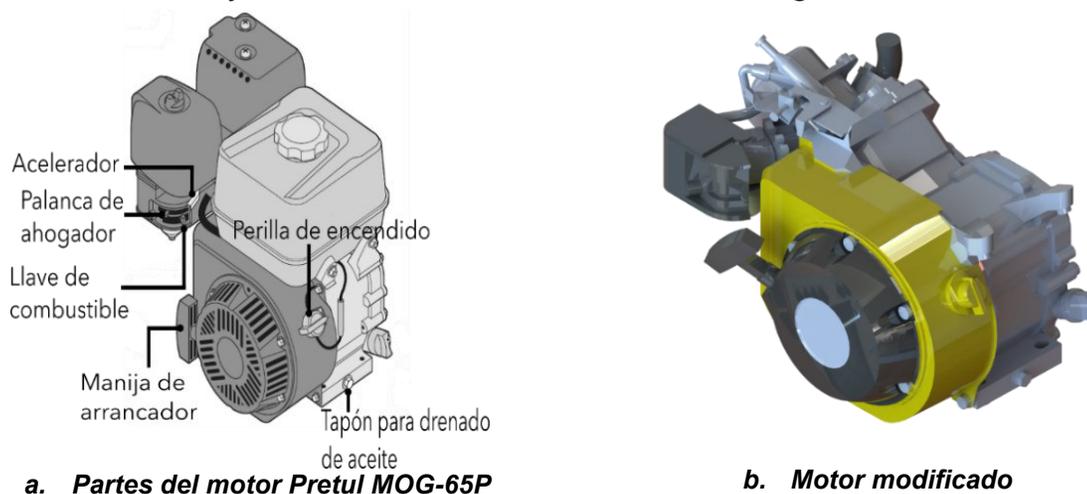


Figura 10. Estructura de motor Pretul MOG-65P

La reestructuración de los sistemas de admisión de aire, combustible y escape de gases tienen como objetivo facilitar la cuantificación de estos parámetros en el motor. Para el sistema de admisión se acopla un depósito de remanso (Ver Figura 11), con la finalidad de amortiguar las inevitables oscilaciones de presión producidas por el proceso de renovación de la carga de motor.

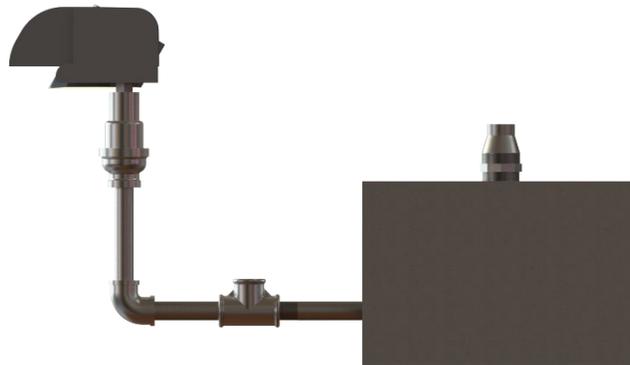


Figura 11. Sistema de admisión de aire.

El sistema de admisión de combustible es modificado de tal forma que permita cuantificar másicamente el consumo por unidad de tiempo. También es modificado el sistema de escape de gases con el propósito de medir múltiples temperaturas de estos. Estos sistemas serán explicados a detalle en el ítem 3.4.

3.2. Torquímetro

Para la medición de parámetros como el torque y la velocidad angular, se utiliza un torquímetro Himmelstein modelo 29004TC (Ver Figura 12) que se encuentra disponible en el laboratorio de termofluidos de la Universidad de Guanajuato, en el Campus Irapuato- Salamanca. Este instrumento presenta una alta precisión y exactitud en un amplio rango de operación, lo que permite una medición confiable del torque con una desviación de la medida de ± 0.05 % F.S. Además, cuenta con un módulo de lectura digital y comunicación serial con la computadora, facilitando la obtención de estos dos parámetros experimentales. La especificaciones de este equipo se encuentran en el Anexo 2.



Figura 12. Torquímetro Himmelstein modelo 29004TC

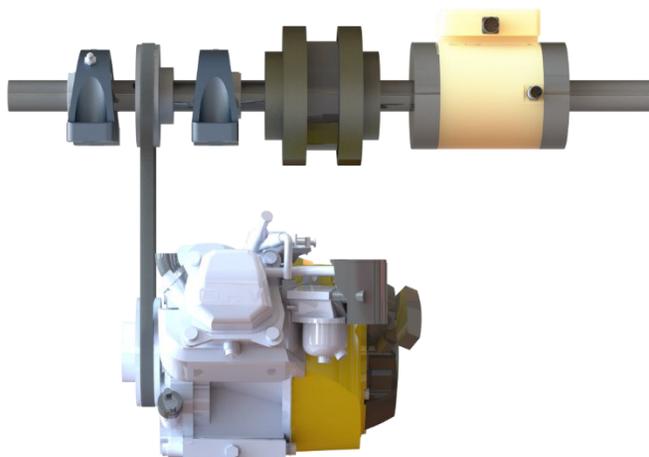
Para la transmisión de movimiento entre el motor, torquímetro y freno en el banco de pruebas, el fabricante del torquímetro recomienda el uso de coples flexibles a las salidas este, con la finalidad de transmitir la potencia sin fluctuaciones y vibraciones, así como corrigiendo desalineamientos axiales y radiales (Ver Figura 13). Por tal motivo, se implementan coples flexibles quadra-flex de la marca Martin, este cople es fabricado en hule termoplástico moldeado (TPR), no requiere lubricación, de instalación fácil y rápida.



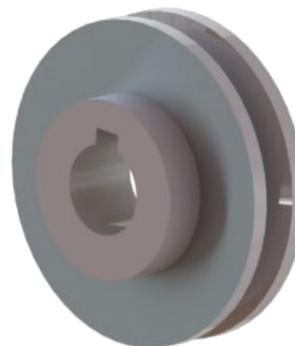
Figura 13. Torquímetro unido a los coples flexibles.

El sistema de transmisión de potencia seleccionado permite entregar al torquímetro el movimiento generado por el motor, como se aprecia en la Figura 14-a. Está constituido por dos poleas con diámetro exterior igual (4 ½ in), debido a la necesidad de tener una relación de transmisión de 1:1 entre el torquímetro y el motor (Ver Figura 14-b). Los diámetros internos de las poleas son maquinados a las dimensiones del eje del motor (¾ in) y a la flecha que conecta al torquímetro (1 ¼ in). Esta última esta sujeta a la estructura del banco por medio de dos cojinetes de apoyo, también conocidos como chumaceras (Ver Figura 14-c). Además, las poleas son conectas por una banda trapezoidal tipo V de tamaño comercial A35 (Ver Figura 14-d). Las especificaciones

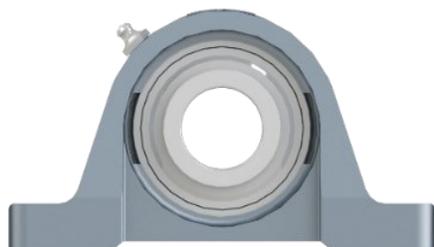
técnicas y comerciales de los dispositivos y elementos mencionados anteriormente se encuentran disponibles en los Anexo 1.



a. Sistema de conexión Motor-Torquímetro



b. Polea en el eje del motor



c. Cojinete de apoyo



d. Banda V A35

Figura 14. Elementos de la flecha de transmisión de potencia.

3.3. Sistema de frenado

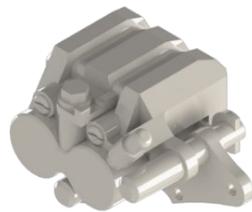
Para generar una carga al motor se utiliza el sistema de frenado de una motocicleta (Ver Figura 15). Se opta por este sistema porque tiene la capacidad de detener parcialmente el motor, fácil adquisición y bajo costo.



a. Bomba de freno



b. Disco



c. Caliper



d. Soporte del freno

Figura 15. Elementos del sistema de frenado.

Para acoplar el freno al banco de pruebas fue necesario construir un soporte metálico que permitiese el acople con seguridad de la estructura al caliper. La sujeción del eje de frenado a la estructura del banco se realiza mediante dos chumaceras de 1 ¼ in de diámetro, y se acopla al torquímetro a través del cople flexible. El acoplamiento final del sistema de frenado se puede apreciar en la Figura 16.



Figura 16. Montaje del sistema de frenado.



3.4. Sistema de adquisición de datos

Los datos del banco de pruebas son adquiridos en tres archivos tipo Excel, donde la recolección de datos de torque y rpm son capturados usando el software **SHC M700 v4.194®**, el cual es proporcionado por la empresa Himmelstein. Por otro lado, las mediciones de flujo másico de aire y consumo de combustible son adquiridas en un archivo Excel mediante el software **PLX-DAQ®**; el cual mediante un macro de Excel permite la captura de datos seriales. Así mismo, el almacenamiento y la captura en tiempo real de datos en una hoja de cálculo de Excel. Por último, las temperaturas del banco de pruebas son adquiridas y monitoreadas mediante el software **LabVIEW®** (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench), el cual es una plataforma y entorno de desarrollo para diseñar aplicaciones, con un lenguaje de programación enfocada a objetos.

3.4.1. Temperatura

En el banco de pruebas se miden múltiples temperaturas con termopares tipo K (Ver Anexo 1) en diferentes lugares, estas son adquiridas mediante el módulo NI-9213 de National Instruments (Ver Anexo 1), y opera usando el software controlador NI-DAQmx que es compatible con el software **LabVIEW®**. Este sistema de National Instruments permite medir y guardar las diferentes temperaturas del banco, las temperaturas medidas son descritas en la Tabla 4.

Tabla 4. Posiciones de termopares en el banco de pruebas.

Medición de Temperatura	Cantidad
Superficie del motor	3 (A, B, C)
Gases de escape	2 (D, E)
Admisión de aire	2 (F, G)
Sistema de frenado	1 (H)

Los termopares mencionados previamente son ubicados en el banco de pruebas como se muestran en la Figura 17. Los termopares A, B y C se encuentran sobre la superficie del motor, donde A esta cerca la zona de escape de gases, B cerca a la bujía y C en la base del motor. Los termopares D y E están ubicados a lo largo del sistema de escape

de gases, donde E se encuentra en la salida de la cámara de combustión, siendo el primer termopar y el que registra la temperatura más elevada. Así mismo, D se encuentra sobre el exhosto. Los termopares de admisión de aire se encuentran a la entrada del tanque de remanso (F) y dentro de este (G). Por último, el H se encuentra en contacto con el disco de freno.

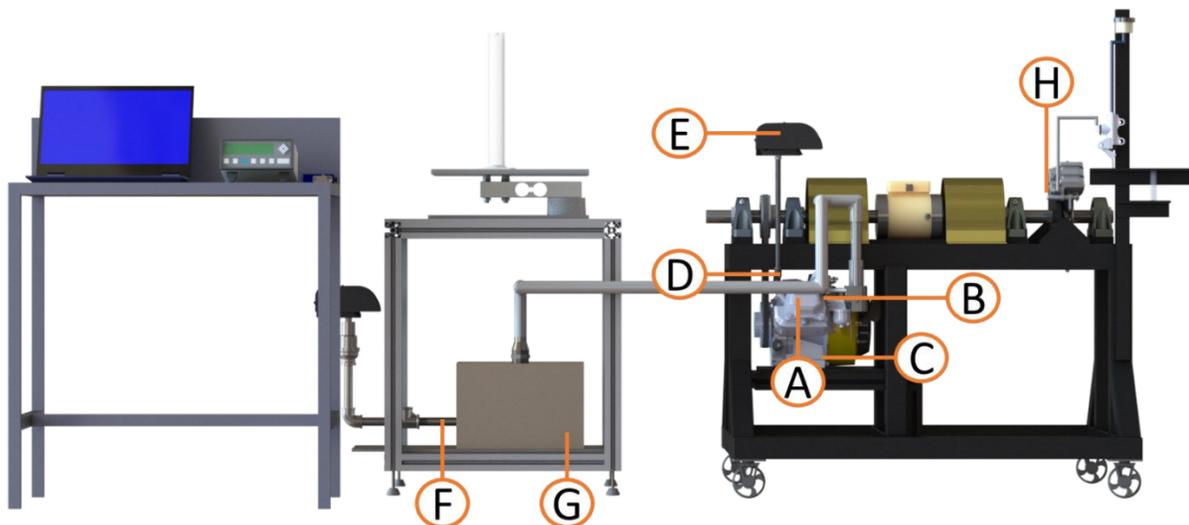


Figura 17. Ubicación de termopares sobre la estructura del banco de pruebas.

Las temperaturas cuantificadas tienen el objetivo de prevenir un posible daño en la operación del motor. Además, las obtenidas en la superficie del motor y en los gases de escape son útiles para análisis energéticos, como por ejemplo análisis de tasas de liberación de calor, eficiencia térmica, entre otros. Este tipo de análisis no serán motivo de este trabajo de maestría.

3.4.2. Consumo de combustible

Debido a la falta de un equipo que permitiese la adquisición de masa de combustible al motor, se realiza la construcción de una balanza mediante una galga extensiométrica de 1kg. Esta es conectada a un transmisor de carga HX711. Este transmisor permite la conexión al Arduino uno donde se realizan la adquisición y envío al Excel. Las especificaciones técnicas de estos dispositivos se encuentran en Anexo 1.

3.4.3. Flujo de aire

El flujo másico de aire es medido a través de la comunicación serial entre un sensor MAF (Mass Air Flow, por sus siglas en inglés) y el software *PLX-DAQ*, usando Arduino Uno y un sensor de temperatura DS18B20.

3.4.3.1. Sensor MAF

El sensor de flujo de aire es un dispositivo utilizado en los vehículos, es importante para el correcto funcionamiento de un vehículo, pues está ubicado entre el colector de admisión y el filtro de aire, y es el encargado de informar sobre la cantidad de aire aspirado a la computadora; debido a esta señal la computadora puede medir la carga de trabajo, y a su vez, puede determinar la cantidad de combustible inyectado.



Figura 18. Sensor MAF Nissan Sentra 1.8L 2003

Para la medición del flujo másico de aire en el banco de pruebas se adapta un sensor MAF Nissan Sentra 1.8L (Figura 18), es alimentado con una señal de 5V por medio de una fuente de voltaje, las especificaciones técnicas se encuentran en el Anexo 1.

La señal de salida del sensor MAF es una lectura de voltaje la cual permite determinar la velocidad de flujo de aire. Para la estandarización de la velocidad del aire se utilizó un anemómetro HWA2005DL de hilo caliente (Ver Figura 19), donde se obtuvo un rango de velocidades de admisión de aire con el anemómetro y al mismo tiempo se determinaron los voltajes en el sensor MAF.



Figura 19. anemómetro HWA2005DL de hilo caliente.

Seguidamente se realiza la curva de ajuste entre la velocidad del aire del anemómetro y la señal de voltaje del MAF, logrando obtener una correlación que permite convertir la señal de voltaje en velocidad del aire de admisión (Ver Ecuación 1).

$$Vel_{aire_{MAF}} = -0.802 - 0.24V + 1.245V^2 \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde V es el voltaje.

3.4.3.2. Sensor de Temperatura DS18B20

La sonda térmica es módulo que permite transmitir la lectura de una temperatura a un dispositivo electrónico en forma de señal eléctrica. Dependiendo del rango de temperaturas y estabilidad es la selección del tipo de sonda. Para la medición de la temperatura en la admisión de aire se utiliza un sensor DS18B20 (Ver Figura 20), sus especificaciones se encuentran en el Anexo 1.



Figura 20. Sensor de Temperatura DS18B20 tipo Sonda

Ubicando los elementos descritos en los ítems 3.4.2 y 3.4.3 sobre el microcontrolador de Arduino Uno, se tiene el sistema de admisión de aire y combustible completo como se puede apreciar en la Figura 21.

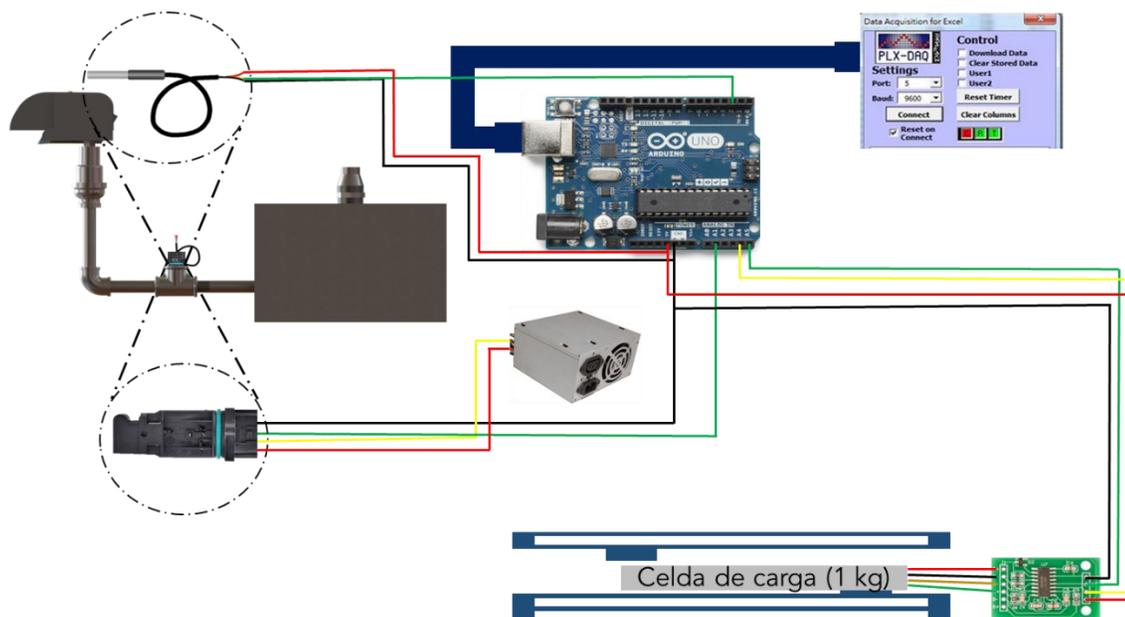


Figura 21. Esquema del sistema de admisión de aire con sensor MAF y sistema de medición consumo de combustible

3.5. Resumen

La construcción del banco dinamométrico para el MEP es una herramienta que permite el estudio del desempeño del motor. A lo largo del capítulo se presentan los diversos sistemas del banco, los cuales tienen la finalidad de facilitar la cuantificación de parámetros como consumo de combustible, admisión de aire, torque, velocidad angular y temperaturas sobre el banco de pruebas. La recolección de datos es realizada en archivos tipo Excel y el tratamiento de estos permite la construcción de las curvas características



Capítulo 4

Obtención de aceite pirolítico liviano

4.1. Antecedentes

En los últimos años se ha investigado y desarrollado técnicas como la pirólisis, la cual permite tratar los residuos urbanos como un método alternativo al reciclaje tradicional y así reducir la acumulación de desechos [41]. Esta técnica alterna permite tratar diferentes desechos industriales (lodos de aguas residuales), urbanos (desechos plásticos), piezas no metálicas de automóviles (neumáticos), entre otros [42].

La pirólisis es un proceso de degradación termoquímica de una sustancia en ausencia de oxígeno, es decir, con atmosfera inerte, o con baja presencia de esta. Donde la sustancia se descompone por calor, evitando que se presente la reacción de combustión. Las temperaturas de trabajo de pirólisis suelen estar entre 300°C a 800°C; sin embargo, estas dependen de la materia prima y del tipo de producto que se desea obtener [35].

Este proceso de degradación termoquímica, clasificado como reciclado terciario, puede generar tres tipos de productos, gaseosos, líquidos y sólidos. Todos estos productos pueden ser aprovechados como combustibles alternativos en diferentes áreas industriales tales como plantas eléctricas, generación de energía, plantas cementeras o como combustible para vehículos [43].

Dependiendo de la materia prima y las condiciones operacionales como temperatura, presión y tipo de reactor, se logra obtener una amplia gama de productos como gases, cuyos elementos son CO, CO₂, hidrógeno (H₂) y metano (CH₄), líquidos (hidrocarburos) básicamente aceites, fenoles y alquitranes, residuos sólidos como el carbón y metales pesados [42].

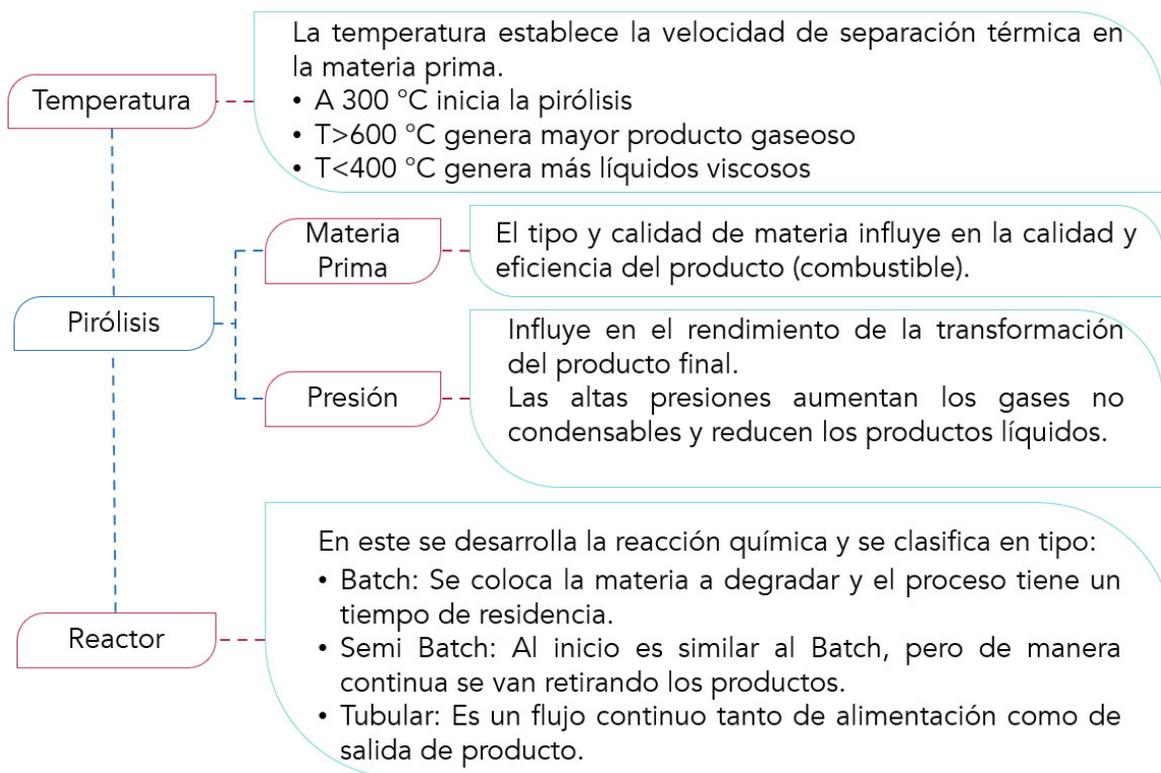


Figura 22. Principales factores que influyen en el producto de la pirólisis, Fuente: [43].

4.2. Obtención y caracterización del aceite pirolítico

4.2.1. Materia prima

La materia prima usada para el proceso de pirólisis son residuos plásticos provenientes del reciclado mecánico del PP, HDPE y LDPE, los cuales son procedentes de la empresa Recicla.Lo ubicada en el estado de Guanajuato, México. Esta materia prima, además de contener mezclas aleatorias del PP, LDPE y HDPE presenta visualmente poca presencia de etiquetas, material suspendido y en general, materiales no plásticos (Ver Figura 23). El correcto tratamiento de este residuo puede ser por procesos termoquímicos o almacenamiento como disposición final, por lo que su costo es muy inferior respecto a cualquier otro residuo plástico. Al tratarse este residuo se logra una revalorización de este, dado que se obtienen productos combustibles comerciales a un menor costo.

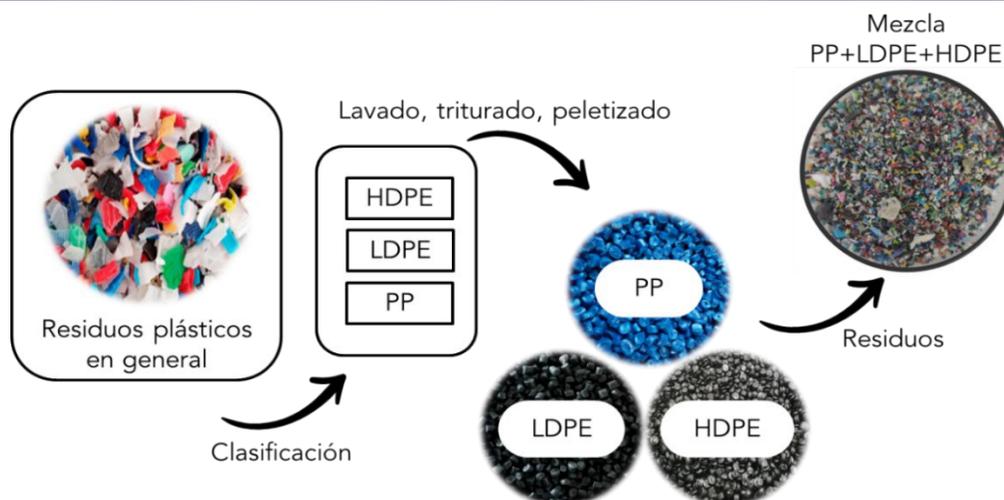


Figura 23. Materia prima para pirólisis, Fuente: [36].

4.2.2. Metodología de obtención

El proceso de pirólisis se lleva a cabo en una planta piloto diseñada para el procesamiento de residuos plásticos ubicada en el laboratorio de termofluidos de la Universidad de Guanajuato, en el Campus Irapuato- Salamanca. La planta está constituida por cuatro unidades principales, la primera es un horno que contiene en su interior un reactor tipo batch semicontinuo. Inicialmente pueden ser cargados hasta 25 kg de materia prima, el conjunto horno-reactor es calentado a una temperatura de aproximadamente 550 ± 20 °C mediante gas LP. Después del horno, se encuentran las otras tres unidades, las cuales son separadores de hidrocarburos verticales gas-líquido.

El primer separador (Tanque A) está conectado a la salida del reactor y es donde se condensan los aceites pirolíticos pesados, en este tanque se utiliza un quemador de alto flujo para mantener una temperatura de 375 ± 10 °C; los gases no condensados a esta temperatura continúan hacia el segundo separador (Tanque B), el cual se mantiene a una temperatura de 180 ± 10 °C y es donde el aceite pirolítico mediano se condensa.

El tercer separador (Tanque C) es donde se condensa todos los gases restantes a una temperatura ambiente de 20 ± 3 °C, almacenando en este el producto denominado aceite pirolítico liviano. Por último, los gases no condensados en los tanques A, B y C son lavados en una trampa de gases, este filtro los libera de manera controlada quemándolos. Todo el montaje descrito es presentado en la Figura 24.

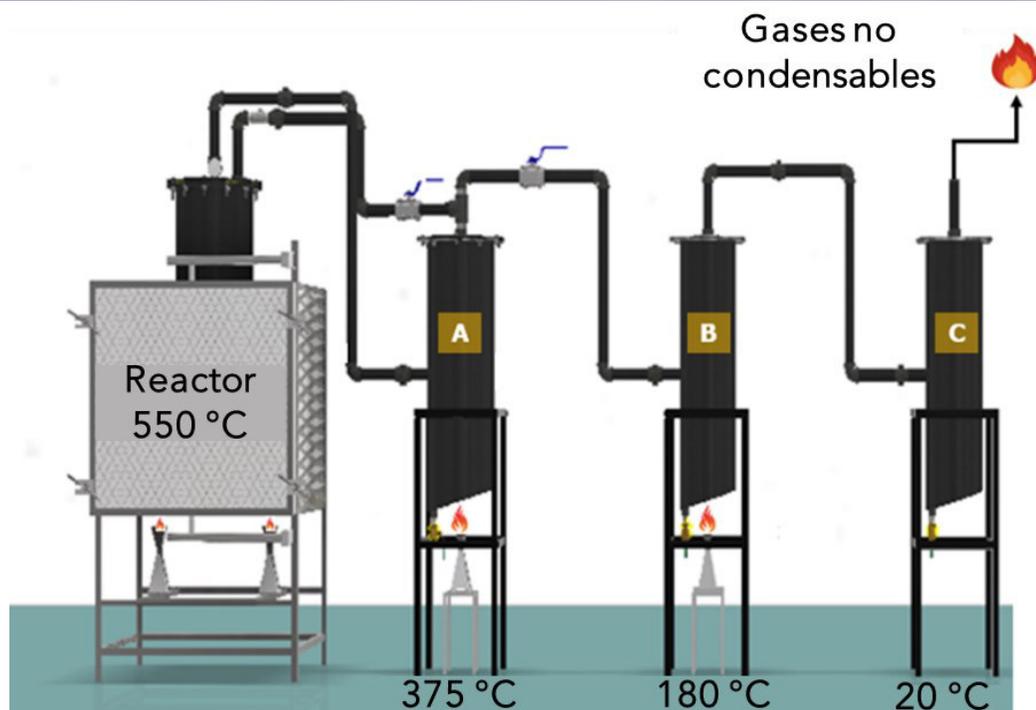


Figura 24. Esquema de la instalación de la planta de pruebas.

El proceso de pirolisis produce varios productos, en el reactor se obtiene carbón con un rendimiento alrededor del 7.2 ± 1.2 % w/w y un poder calorífico de 16 210 kJ/kg. El tanque A recupera el 23.2 ± 1.1 % w/w de la masa inicial y contiene un producto sólido a temperatura ambiente (20 ± 5 °C) con una densidad de alrededor de 925 ± 1 kg/m³, un poder calorífico de 45 820 kJ/kg y una composición rica en carbonos superiores a los 15, debido a eso es denominado aceite pirolítico pesado.

El tanque B recolecta el 41.6 ± 1.8 % w/w de la masa inicial y tiene un producto con una densidad de 800 ± 1 kg/m³, 45 740 kJ/kg de poder calorífico y una composición rica en carbonos de los 11 a 14, por lo que se denomina aceite pirolítico mediano.

El tanque C obtiene el 19.6 ± 1.6 % w/w de la masa inicial y contiene un producto con densidad de 745 ± 1 kg/m³, poder calorífico de 45 395 kJ/kg y una composición rica en carbonos de los 3 a 10, por lo tanto, se denomina aceite pirolítico liviano. Los gases no condensables abarcan el 8.4 ± 2.3 % en peso de la masa inicial.

Estos gases no son analizados durante la experimentación, ya que se queman para evitar acumulaciones y la suspensión de estos. Todos estos resultados mencionados anteriormente son presentados en la Tabla 5.

Tabla 5. Caracterización de productos obtenidos en la planta piloto.

Producto	Rendimiento [% w/w]	C ₃ -C ₁₀ [% w/w]	C ₁₁ -C ₁₄ [% w/w]	C ₁₅ -C ₃₀ [% w/w]	Densidad [kg/m ³]	Poder Calorífico [kJ/kg]
Carbón	7.2±1.2	-	-	-	-	16 210
Pirolítico pesado*	23.2±1.1	2.69±0.01	15.06±0.01	68.86±0.01	925±1	47 820
Pirolítico mediano*	41.6±1.8	22.46±0.01	49.07±0.01	26.44±0.01	800±1	45 740
Pirolítico liviano*	19.6±1.6	94.26±0.01	5.150±0.01	0.5900±0.01	745±1	45 395
Gases no condensables	8.4±2.3	-	-	-	-	-

*Producto líquido (Aceite)

4.3. Aceite pirolítico liviano

El aceite pirolítico liviano es obtenido del tanque C, por lo que contiene productos condensables entre 20 a 180 °C, este fraccionamiento presenta propiedades similares a la gasolina comercial. Inicialmente, el aceite liviano obtenido de la planta de pruebas es sometido a un proceso posterior de destilación en un reactor batch semicontinuo. Este craqueo es realizado con el objetivo de eliminar las posibles impurezas y excesos de aceite mediano que se hubiesen podido arrastrar desde el tanque B al tanque C por las corrientes de gases no condensables. El aceite liviano es destilado a una temperatura de 180 °C, seguidamente se le retiran los sedimentos mediante un papel filtro N°1 Whatman, el cual retiene partículas sólidas hasta de 11 µm. El filtrado del LPO presenta baja presencia de partículas sólidas como se puede apreciar en la Figura 33.

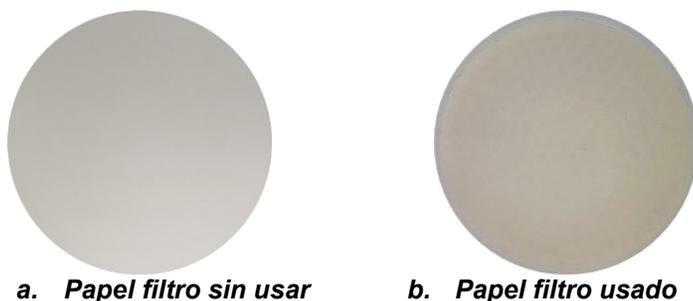


Figura 33. Comparación del papel Whatman

La caracterización fisicoquímica del aceite liviano será presentada en el ítem 5.2.2.



4.4. Resumen

La pirólisis es un proceso de reciclaje químico que permite obtener productos de valor agregado, como combustibles, a partir de residuos plásticos. En este trabajo se obtiene aceite pirolítico liviano a partir de mezclas aleatorias del PP, LDPE y HDPE en una planta piloto diseñada para el procesamiento de residuos plásticos ubicada en el laboratorio de termofluidos de la Universidad de Guanajuato, en el Campus Irapuato- Salamanca. El LPO es obtenido en el tanque C con temperaturas condensables entre 20 a 180 °C, sin embargo, después de la obtención de este en la planta piloto se somete a un proceso de destilación y filtrado con la finalidad de retirar impurezas. Este aceite liviano será el combustible alternativo para utilizar en el banco de pruebas.

Capítulo 5

Resultados

5.1. Introducción

Finalizada la construcción del banco de pruebas y la obtención del aceite pirolítico liviano, se procede a la caracterización con gasolina comercial y el desarrollo experimental con el combustible alternativo. En la Figura 25 se muestra el CAD del banco de pruebas y en la Figura 26 una fotografía de la estructura final.



Figura 25. CAD del banco de pruebas.



Figura 26. Banco de pruebas.

Así mismo, en la Figura 27 se muestran los combustibles utilizados para el desarrollo de este proyecto.

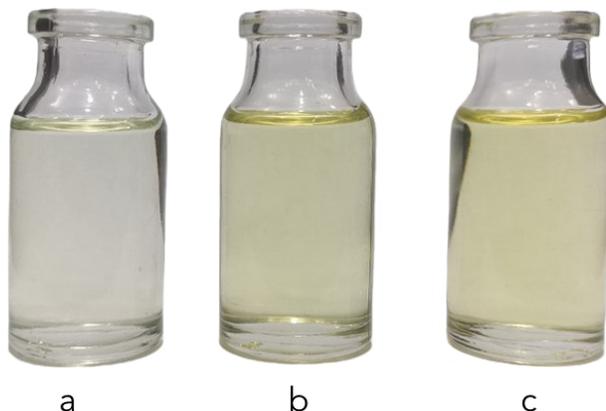


Figura 27. a) gasolina, b) G50LPO50, c) LPO

Uno de los principales desafíos al momento de realizar un reemplazo parcial o total del combustible en el motor, es evaluar el rendimiento y el desempeño que puede esperarse. Es importante tener en cuenta que la sustitución del combustible puede alterar la potencia, el torque y el consumo específico del motor. Debido a lo anterior, diversos investigadores han reportado observaciones relacionadas con el cambio de combustible en los motores, donde los parámetros principales analizados incluyen las curvas características de potencia, torque y consumos específicos.

Así como las propiedades del combustible, tasa de liberación de calor, presión en cámara, emisiones generadas, entre otros. En la Tabla 6 se muestra una revisión general sobre las tendencias presentadas bajo algunas pruebas de combustión con combustibles alternativos; tanto biocombustibles, como derivados de la pirólisis [44]–[49]

El comportamiento más destacado es un aumento en la densidad y disminución en el poder calorífico de los combustibles alternativos. Mientras que parámetros como el torque y el consumo son estratificados, esto puede deberse a propiedades como la viscosidad o el índice de octano (IO).



Tabla 6. Breve comparación de las propiedades y características de rendimiento en motores de gasolina.

Tipo de combustible	Rendimiento			Propiedades			Referencia	
	Torque	Potencia	Consumo específico	Densidad	Poder calorífico	Viscosidad		RON-MON IO
15% PPO +85% Gasolina			↑	↑	↓	↑	↓	[44]
15% PPO 5% Etanol+80% Gasolina			↑					
50% Gasolina + 50% Butanol		↑	↑	↑	↓		↓	[45]
75% Gasolina + 25% Butanol		↑	↑	↑	↓		↓	
80% Gasolina + 20% Etanol		↓	↑	↑	↓	↑	↑	[46]
60% Gasolina + 40% Etanol		↓	↑	↑	↓	↑	↑	
40% Gasolina + 60% Etanol		↓	↑	↑	↓	↑	↑	
100% Aceite pirolítico de HDPE			↓	↑	↑		↓	[47]
100% Aceite pirolítico de LDPE			↓	↑	↑		↓	
100% Aceite pirolítico del PP			↓	↑	↑		↓	
100% Aceite pirolítico de PS			↓	↑	↓		↓	
90% Gasolina + 10% Acetona	↑	↑	↑	↑	↓	↓	↑	[48]
93% Gasolina + 7% Acetona	↑	↑	↑	↑	↓	↓	↑	
97% Gasolina + 3% Acetona	↑	↑	↑	↑	↓	↓	↑	
97% Gasolina + 3% Etanol	↑	↑		↑	↓		↑	
93% Gasolina + 7% Etanol	↑	↑		↑	↓		↑	
90% Gasolina + 10% Etanol	↑	↑		↑	↓		↑	
97% Gasolina + 3% Metanol	↑	↑		↑	↓		↑	
93% Gasolina + 7% Metanol	↑	↑		↑	↓		↑	
90% Gasolina + 10% Metanol	↑	↑		↑	↓		↑	[49]
97% Gasolina + 3% (Etanol y Metanol)	↑	↑		↑	↓		↑	
93% Gasolina + 7% (Etanol y Metanol)	↑	↑		↑	↓		↑	
90% Gasolina + 10% (Etanol y Metanol)	↑	↑		↑	↓		↑	

La gasolina comercial es el combustible de referencia utilizado para comparar los parámetros.

5.2. Materiales y métodos

5.2.1. Materiales

En el banco de pruebas se estudia como diferentes combustibles afectan el rendimiento en un MEP; se utilizan tres tipos de combustibles: gasolina comercial (G) distribuida por G500, ubicada en la ciudad de Salamanca, Guanajuato; aceite pirolítico liviano (LPO), el cual fue descrito en el ítem 4.3 y una mezcla volumétrica 50% gasolina comercial y 50% aceite pirolítico liviano denominada G50LPO50.

5.2.2. Caracterización fisicoquímica de los combustibles

La caracterización de los combustibles utilizados en este proyecto se realiza bajo las normas ASTM, en los equipos e infraestructura disponibles en el laboratorio de Combustibles y Motores Térmicos de la Universidad de Guanajuato (CMT.UG), los cuales se presentan a continuación:

Bomba calorimétrica: El poder calorífico de las muestras es obtenido mediante una bomba calorimétrica IKA modelo C 3000 (Ver Figura 28), equipada con un sistema de enfriamiento IKA KV 600. La bomba calorimétrica trabaja en modo isoperibólico bajo la ASTM D240.



Figura 28. Bomba calorimétrica IKA C3000

Equipo de laboratorio general: La obtención de la viscosidad fue mediante el uso de un viscosímetro tipo Cannon-Fenske (Ver Figura 29-a) y la norma ASTM D445. La gravedad

específica es determinada utilizando un densímetro marca Robsan (Ver Figura 29-b) y la norma ASTM D1298.

Unidad de destilación ASTM D 86: La curvas de destilación de las muestras son obtenidas bajo la norma ASTM D86 (Ver Figura 29-c). Las temperaturas se obtuvieron para muestras de 100 mL a presión atmosférica.



a. **Viscosímetro
Cannon-Fenske**



b. **Densímetro Robsan**



c. **Unidad de destilación
ASTM D86**

Figura 29. Equipo de laboratorio general.

Cromatógrafo de gases: La composición química e identificación de parafinas, iso-parafinas, aromáticos, naftas y olefinas (PIANO) se realiza bajo la normativa ASTM D6729 en un cromatógrafo Varían 450 GC (Ver Figura 30), una columna de 100 m * 0.25 mm ID * 0.25 μ m, flujo de 3 mL/min, usando un estándar C₇-C₃₀ de alcanos saturados. El inyector Split-type es fijado a una temperatura de 280 °C y el detector tipo FID a 340 °C. Además, la rampa de calentamiento del horno fue de 40 °C durante tres minutos, seguido de una velocidad de 20 °C/min hasta llegar a 320 °C.



Figura 30. Cromatógrafo Varían 450 GC



5.2.3. Metodología de pruebas dinamométricas

Para el desarrollo de las pruebas dinamométricas en el motor descrito en el ítem 3.1, se utilizan los equipos y softwares de adquisición de datos mencionados en el ítem 3.4. Inicialmente, se conecta el computador a los dispositivos de cuantificación y medición de parámetros, se tara el módulo 721, y se verifica la comunicación serial para la transmisión de datos. Seguidamente se enciende el motor y se deja operar por un tiempo de 5 minutos en vacío a un régimen permanente, esto se hace con la finalidad de generar una estabilidad en el motor.

Transcurrido el tipo de estabilización, se acelera el motor a velocidad máxima y se adquieren datos por 30 segundos, luego se frena el motor hasta un régimen de giro de 3000 rpm y se recolectan los datos. Posteriormente, se retira la carga y se deja por 20 segundos para lograr enfriamiento del sistema de frenado.

Esta operación es repetida en regímenes de giro de 2800, 2600 y 2400 rpm. Este procedimiento es repetido de manera continua, hasta obtener tres lecturas de todo el barrido de velocidades de rotación.

La prueba descrita permite la obtención de parámetros de torque, velocidad angular, flujo másico de admisión de aire y combustible. Así como las temperaturas en el banco de pruebas (Ver Figura 17).

5.3. Resultados

5.3.1. Caracterización de los combustibles probados

Las temperaturas de destilación al 10% y 50% de volumen recuperado para el LPO y G50LPO50 registran valores superiores respecto a los presentados por la gasolina comercial como se aprecia en la Figura 31. El peso molar es un factor influyente en la variación del rango de temperaturas de destilación, para el LPO y la mezcla G50LPO50, dado que tienen valores de 116.80 y 95.52 g/mol, respectivamente. Mientras que, la gasolina tiene un peso molar de 86.49 g/mol.

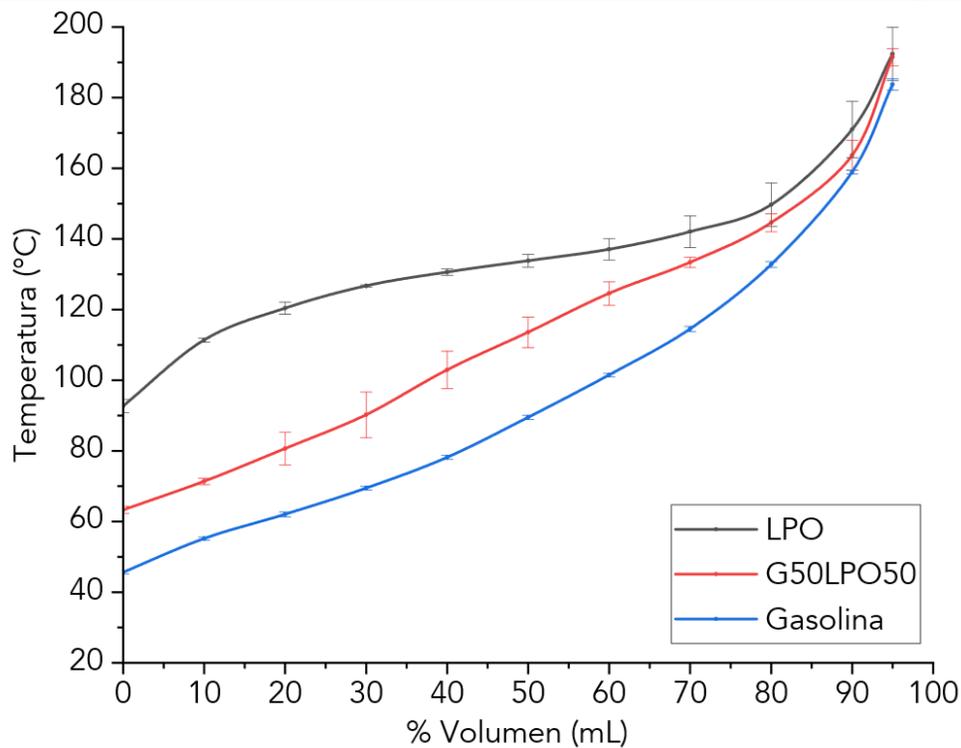


Figura 31. Curvas de destilación de las muestras.

Se puede verificar esta tendencia presentada a través del análisis cromatográfico de conteo de carbonos (Ver Figura 32), donde se evidencia mayor presencia de monómeros C_8 y C_9 para el LPO y la mezcla G50LPO50 que en la gasolina. El conteo de carbonos para gasolina presenta 61.85% de monómeros entre C_3 y C_7 , indicando que alrededor del 60% del volumen destilado alcanza la temperatura de ebullición del heptano, la cual es 98.4 °C. Además, reporta 28.87% de monómeros tipo C_8 y C_9 , siendo la fracción más pesada de la gasolina, donde la molécula del nonano tiene una temperatura de ebullición de 150.8 °C.

El LPO presenta 71.87% del conteo de carbonos en monómeros entre C_8 y C_9 y 15.95% entre C_4 y C_7 , por tal motivo, el LPO debe presentar un rango de temperaturas de ebullición y un peso molar superior al de la gasolina el cual se evidencia en la Figura 34.

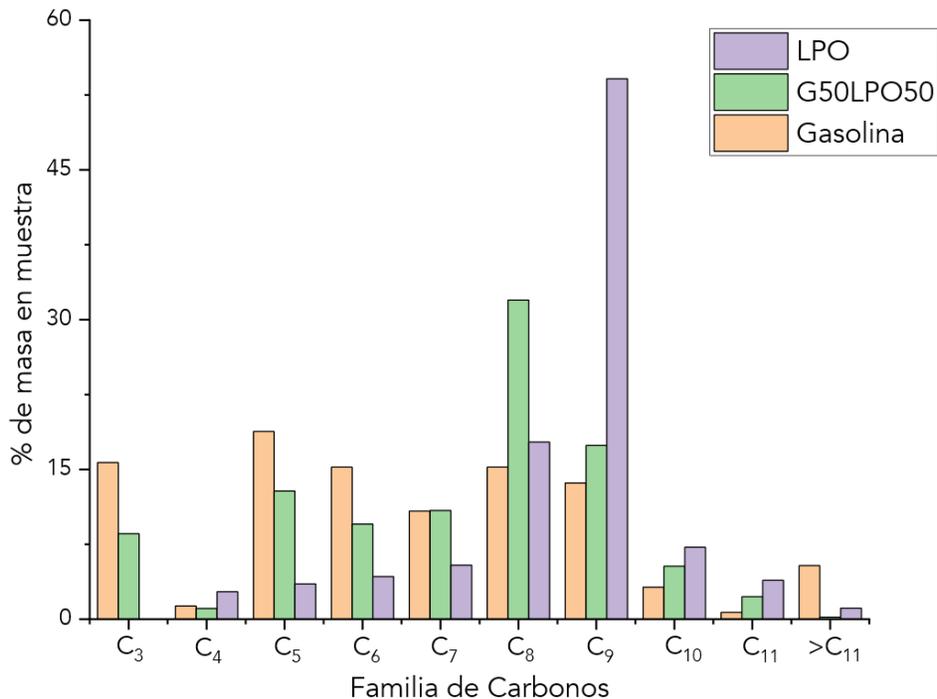


Figura 32. Análisis de composición química de muestras.

Propiedades como la densidad y viscosidad cinemática son muy semejantes; el LPO presenta una gravedad específica de 0.745 y la gasolina de 0.725. Así mismo, una viscosidad cinemática de 0.923 mm²/s y 0.694 mm²/s, respectivamente. Los valores obtenidos concuerdan con los reportados por **Zsolt Dobó et al.** [47] quienes han estudiado las propiedades fisicoquímicas de los productos de pirólisis de HPDE, LDPE y PP con un rango de fraccionamiento de 20 a 200 °C, encontrando densidades de 0.750, 0.762 y 0.744 respectivamente. Así mismo, **Songchai Wiriyaumpaiwong et al.** [50] reportan una gravedad específica de 0.767 y una viscosidad cinemática de 1.06 mm²/s para el producto de pirólisis de la mezcla de residuos plásticos no identificados.

El poder calorífico presenta un valor de 46.05 MJ/kg para el LPO y 43.61 MJ/kg para la gasolina, por lo que se esperaría que el proceso de combustión del LPO genere mayor energía. **Zsolt Dobó et al.** [47] reportan los poderes caloríficos superiores de los aceites pirolíticos de HDPE (45.8 MJ/kg), LDPE (45.3 MJ/kg) y PP (47.1 MJ/kg), encontrando poca variación entre ellos. Se observa que el poder calorífico de los aceites pirolíticos de plásticos presenta un valor similar a los combustibles comerciales, esto se debe a que



los plásticos son hidrocarburos, y dependiendo de la composición del polímero plástico original su valor oscilara entre los 38 y 46 MJ/kg [51].

Otra propiedad de gran importancia es la presión de vapor Reid (RVP), la cual es un indicador de la volatilidad del combustible. Si la RVP es alta, el combustible se evapora con mayor dificultad, ocasionando pérdida de potencia, aumento de emisiones contaminantes y problemas de arranque en frío. La adición de compuestos oxigenados al combustible aumenta la RVP y disminuye las temperaturas de ebullición [52]. Las propiedades de los tres combustibles caracterizados son reportos en la Tabla 7.

Tabla 7. Comparativa de gasolina comercial y aceite pirolítico liviano

Prueba	Unidades	Método	Gasolina ^a	G50LPO50	LPO
Peso molar	g/mol	ASTM D6729	86.49	95.52	116.80
Gravedad específica a 20 °C	-	ASTM D1298	0.725	0.736	0.745
Índice de octano	-	ASTM D6729	91.05	85.35	62.10
Viscosidad cinemática (40 °C)	mm ² /s	ASTM D445	0.591	0.650	0.781
Apariencia ASTM	-	ASTM D4176	Brillante	Brillante	Brillante
Poder calorífico	MJ/kg	ASTM D240	43.12	44.89	46.04
Destilación D-86 TIE*	°C	ASTM D86	45.6	63.3	92.7
Destilación D-86 al 10%	°C	ASTM D86	55.2	71.4	111.4
Destilación D-86 al 50%	°C	ASTM D86	89.5	113.6	133.8
Destilación D-86 al 90%	°C	ASTM D86	158.9	163.7	171
Destilación D-86 TFE**	°C	ASTM D86	183.7	191.5	192.4

TIE*: Temperatura inicio de ebullición, TFE**: Temperatura fin de ebullición, ^a Gasolina comercial G500

Además, el análisis PIANO (Ver Figura 33) permite comparar la composición química de los combustibles usados en este proyecto, donde se evidencia una distribución equitativa porcentual de la composición química de la gasolina en los diferentes compuestos. La muestra de gasolina presenta 15.66% de iso-parafinas, 21.71% de Iso-olefinas y 16.05% de oxigenados.

El LPO presenta 64.03% de presencia de iso-parafinas, 10.10% de iso-olefinas y 3.51% de oxigenados. La alta presencia de parafinas en el LPO aumenta la tendencia a la detonación, esto se debe a que las parafinas presentan cadenas de carbonos demasiado largas y de enlaces sencillos (alcanos), los cuales son demasiados débiles. Por lo tanto, a las parafinas se le denominan combustibles no sensibles, donde la sensibilidad es la diferencia entre el RON y el MON, e indica de la capacidad de un combustible para producir energía en el motor[12].

Así mismo, la gasolina presenta 41.77% de compuestos en la familia de olefinas, mientras que el LPO 14.32%, siendo el factor de disminución del octanaje (Ver Figura 34), dado que las olefinas son combustibles de mayor sensibilidad y son las principales contribuyentes al octanaje en la gasolina reformulada [53].

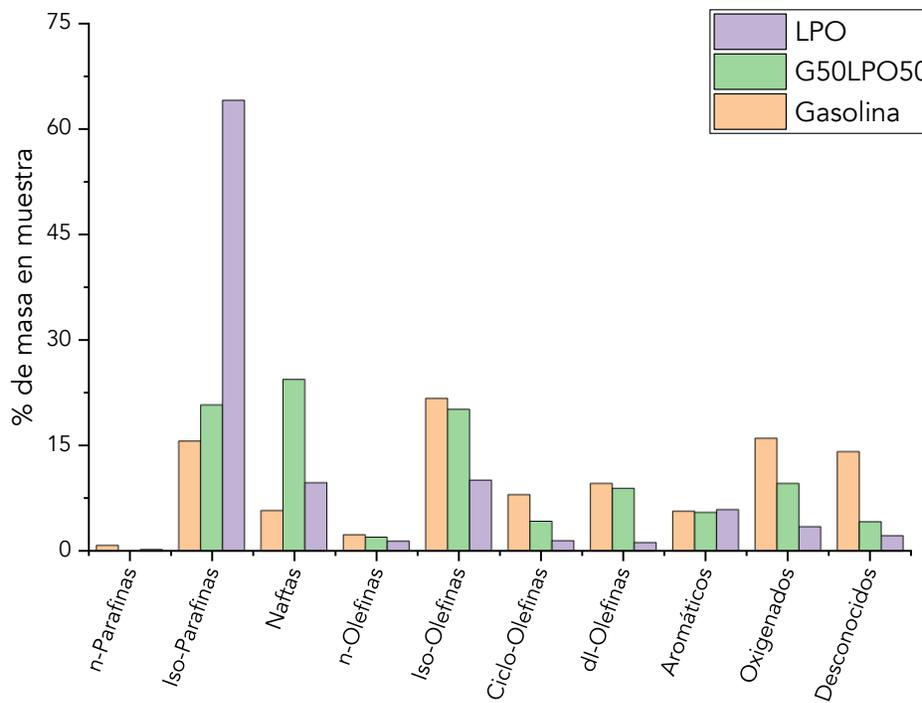


Figura 33. Análisis PIANO de las muestras.

La mínima presencia de oxigenados en el LPO en comparación con la gasolina se debe a que no ha sido reformulado. Generalmente, la composición química de la gasolina comercial se ve alterada por aditivos que buscan aumentar el octanaje, evitar la corrosión y hacerla más resistente a las bajas temperaturas, y el aceite liviano y la mezcla solo han sido destilados.

La presencia de aromáticos es baja y muy similar para ambos combustibles, siendo de 5.71% para la gasolina y 5.93% para el LPO. Los valores obtenidos son similares a los reportados por *Dabelstein et al.* [54] quienes mencionan que la gasolina obtenida de una primera destilación contiene un 5% de aromáticos. Así mismo, la baja presencia de aromáticos es un factor positivo para la combustión, pues una alta presencia de aromáticos aumenta significativamente las emisiones de gases contaminantes [53].

El G50LP50 no es discutido, pues todas sus propiedades están dentro del rango entre los combustibles individuales (G y LPO).

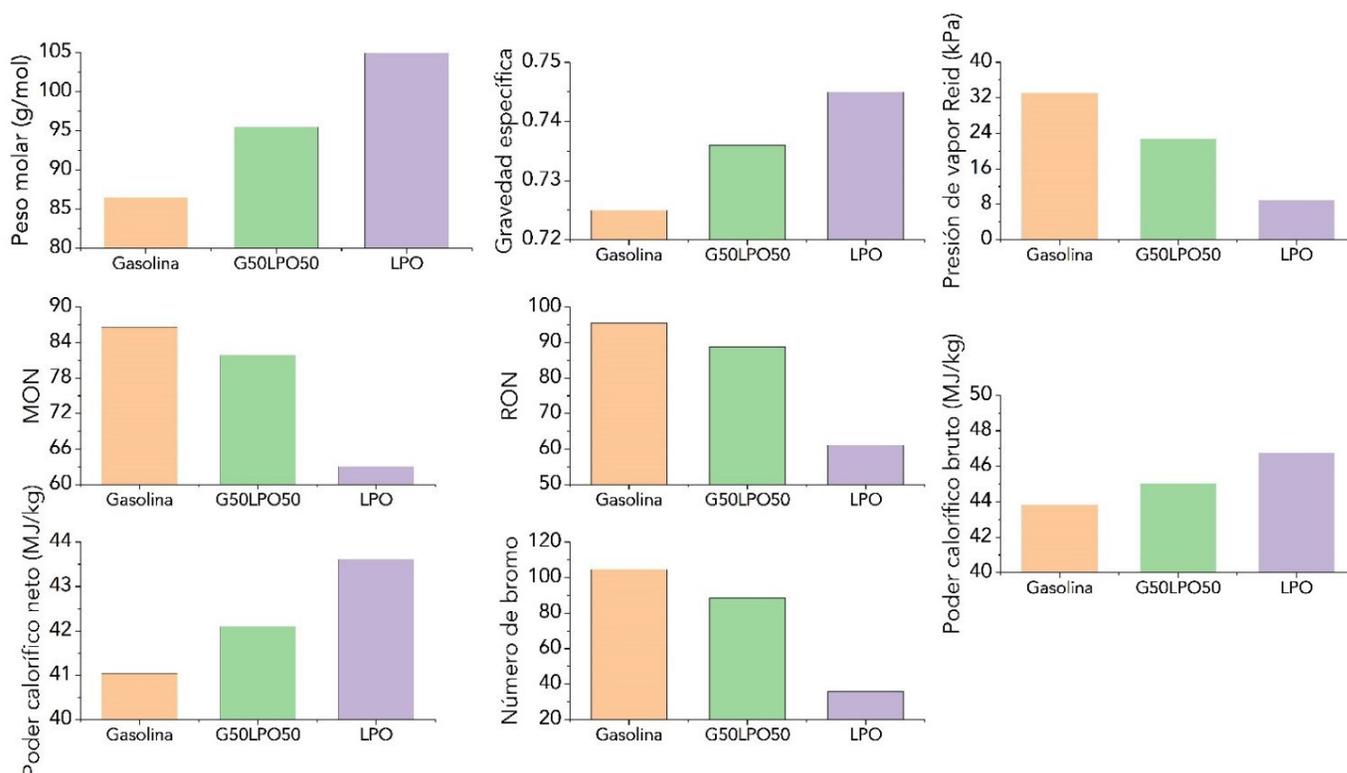


Figura 34. Comparación de propiedades de las muestras.

5.3.2. Caracterización del banco con gasolina

El banco de pruebas fue inicialmente caracterizado con gasolina comercial, obteniendo las curvas características de potencia, torque y consumo específico. Se realizaron tres pruebas para la construcción de las curvas, encontrando repetibilidad en las pruebas y generando una confianza en la medición de los parámetros. Los resultados obtenidos proporcionaron una base sólida para las comparaciones en el ítem 5.3.3 y para establecer un estándar en la medición de rendimiento del motor.

En la Figura 35 se aprecia que la curva de consumo específico presenta mayores desviaciones en las mediciones, pero la curva obtenida es característica de un MEP.

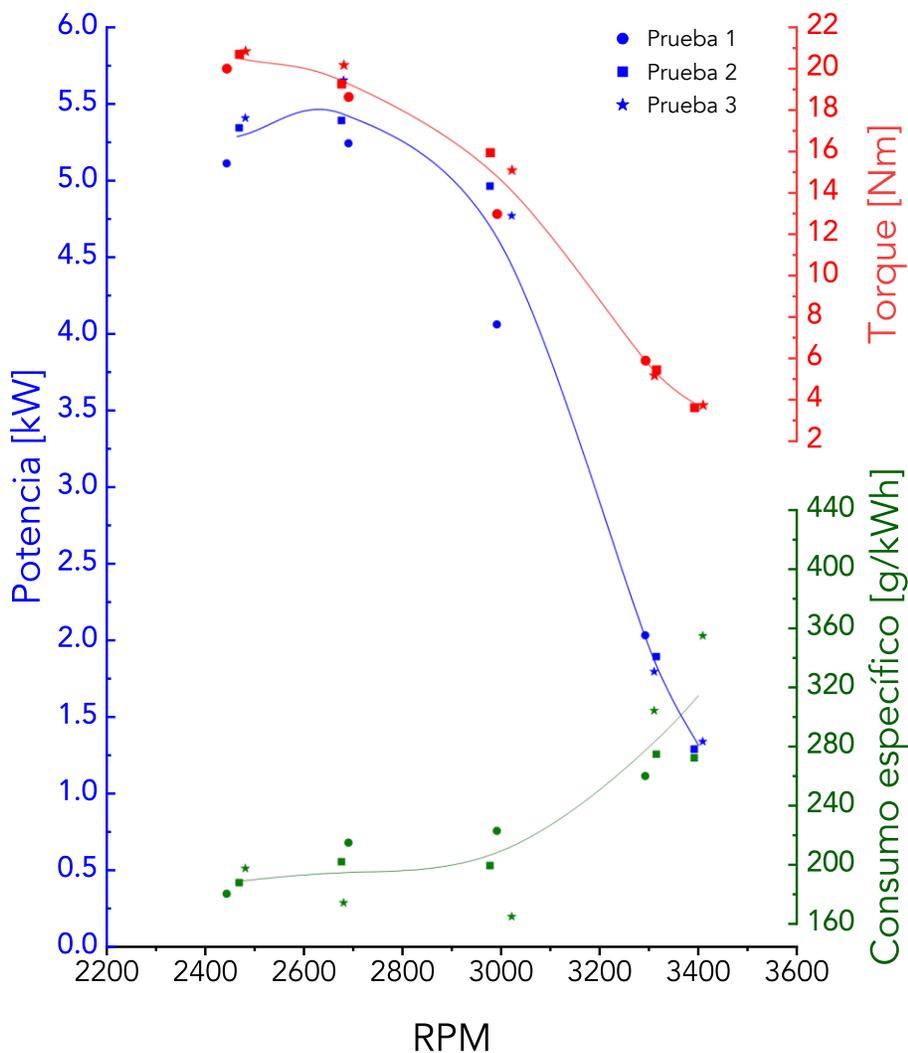


Figura 35. Curvas características MOG 65P con gasolina

5.3.3. Comparativas de potencia y torque

En la Figura 36 se puede observar que las curvas de torque para los tres combustibles reportados describen un comportamiento similar, donde las curvas de gasolina y LPO tienen valores de torque del mismo orden en todo el rango de regímenes de giro. Así mismo, la curva de mezcla G50LPO50 está por encima de los combustibles puros, presentado valores de torque superiores en todos los regímenes de giro. Las tres curvas presentan una tendencia decreciente de torque a velocidades de rotación mayores, siendo un comportamiento similar al reportado por *Elfasakhany* [48].

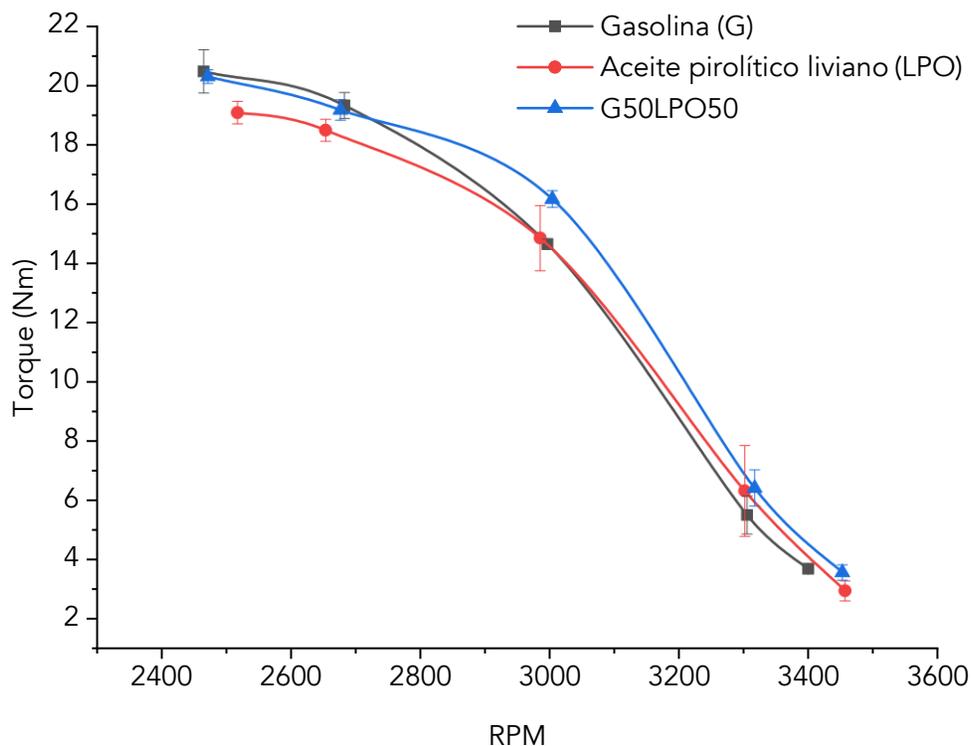


Figura 36. Curvas de torque para las muestras.

Visualizando la Figura 37 se puede afirmar que las curvas de potencia presentan un comportamiento similar a las curvas de torque, esto se debe a que existe una relación entre estos parámetros. Dado que la potencia es calculada para cada torque y velocidad angular obtenida experimentalmente. Así mismo, el combustible que presenta un mejor desempeño de torque y potencia es la mezcla de G50LPO50.

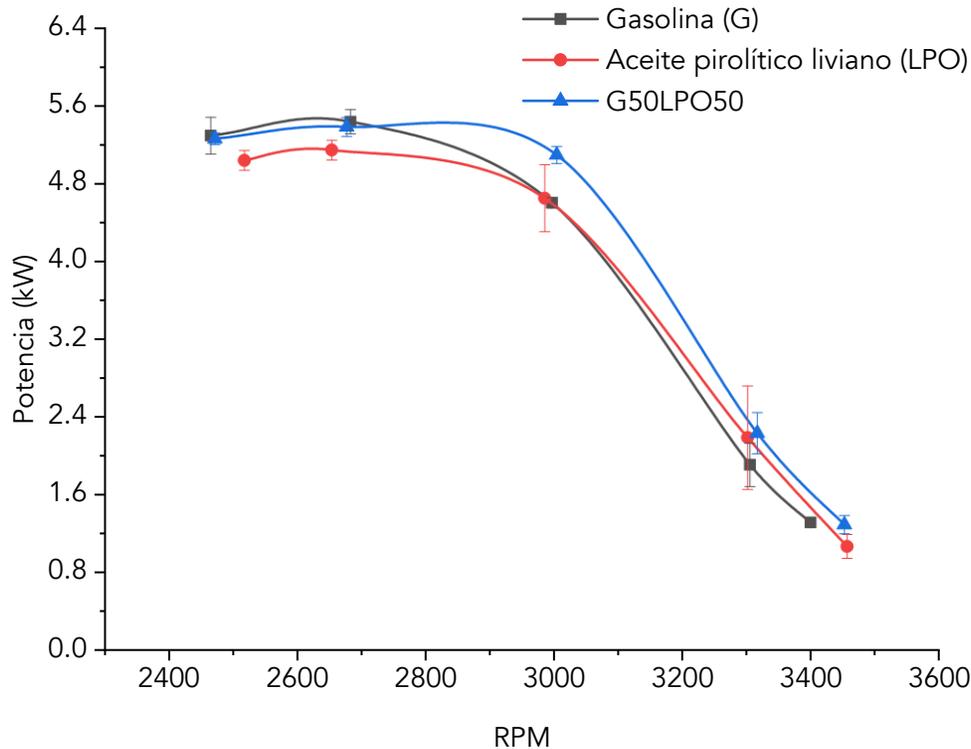


Figura 37. Curvas de potencia para las muestras.

5.3.4. Comparativas de consumo específico

Las pruebas de consumo específico de combustible presentan valores experimentales similares en las velocidades de rotación de 2300 rpm a 3300 rpm. Particularmente., las velocidades de rotación mayores a 3400 rpm muestran desviaciones considerablemente elevadas, consecuencia de vibraciones y fluctuaciones del motor.

En la Figura 38 se observa que las curvas de gasolina y mezcla G50LPO50 se encuentran superpuestas en el intervalo de 2500 a 3300 rpm, evidenciando la similitud de comportamiento. También, el motor consume más combustible en el rango de giro de 2500 a 3300 rpm cuando es alimentado con LPO, con un aumento de hasta el 15% a una velocidad de 3000 rpm.

Aunque se espera que el consumo específico disminuya con un combustible de mayor poder calorífico, particularmente en estos experimentos no se observa dicha tendencia, pues el consumo depende de otras propiedades. Tales como la densidad, viscosidad, rango de ebullición, octanaje, composición química, entre otras.

Múltiples estudios confirman que el aumento de la densidad en el combustible tiende a generar un incremento en el consumo específico, esto se debe a que un combustible más denso proporciona una mayor cantidad de energía por unidad de volumen [55]. Por lo tanto, los combustibles con densidades más bajas pueden mejorar el rendimiento [56]. Así mismo, la viscosidad es una de las propiedades esenciales del combustible, una alta viscosidad puede generar gotas de gran tamaño, ocasionando una combustión ineficiente, además, de presentar problemas al fluir por los ductos [55].

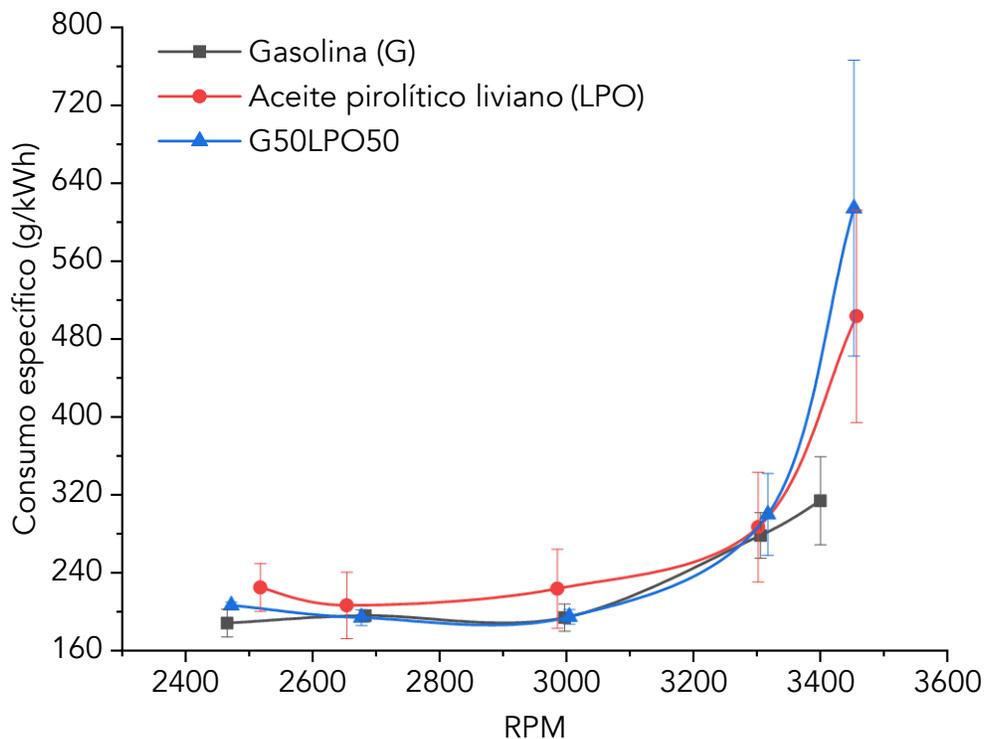


Figura 38. Curvas de consumo específico para las muestras.

En la Figura 39 se muestra la relación entre el consumo de combustible y la potencia entregada por el motor. Se observa que los experimentos llevados a cabo con la gasolina presentan un menor consumo con respecto a los del LPO. Además, se evidencia que a medida que aumenta la potencia hay una disminución en el consumo para ambos combustibles. Los comportamientos de la experimentación presentada presentan tendencias similares a las reportadas por *Kareddula y Puli* [44], quienes estudiaron la influencia de alimentar un motor multicilíndrico Maruti 800 con aceite pirolítico de residuos plásticos y mezclas aceite pirolítico-gasolina.

En el Anexo 3 se presenta las curvas de potencia, torque y consumo específico individualizadas, donde se puede apreciar la repetibilidad de las pruebas para cada combustible.

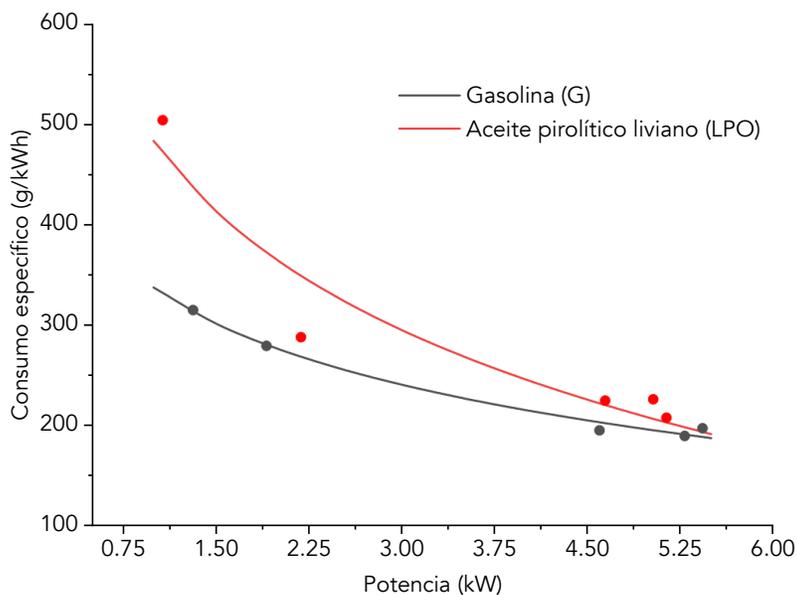


Figura 39. Relación de potencia y consumo específico.

5.3.5. Temperaturas

Se obtuvieron las temperaturas de los puntos especificados en la Figura 17 para cada una de las pruebas de los diferentes combustibles. Las temperaturas de las tres pruebas para cada combustible son promediadas y reportadas en la Tabla 8.

Tabla 8. Temperaturas del banco de pruebas para las muestras.

Ubicación	Gasolina	G50LPO50	LPO
Superficie del motor (A)	125.3	127.5	126.9
Superficie del motor (B)	82.0	87.6	89.6
Superficie del motor (C)	55.4	49.9	55.6
Emisiones de gases (E)	392.4	518.6	493.4
Emisiones de gases (D)	628.2	646.7	615.5
Admisión de aire (F)	27.6	18.4	22.2
Admisión de aire (G)	26.7	20.4	23.5
Freno (H)	36.1	34.5	35.4

En la Tabla 8 se puede apreciar que las temperaturas superficiales del motor no se ven afectadas por el tipo de combustible; dado que, no presentan gran diferencia en los valores obtenidos. Sin embargo, es evidente el aumento de la temperatura en los gases de escape para la mezcla G50LPO50 y el LPO.

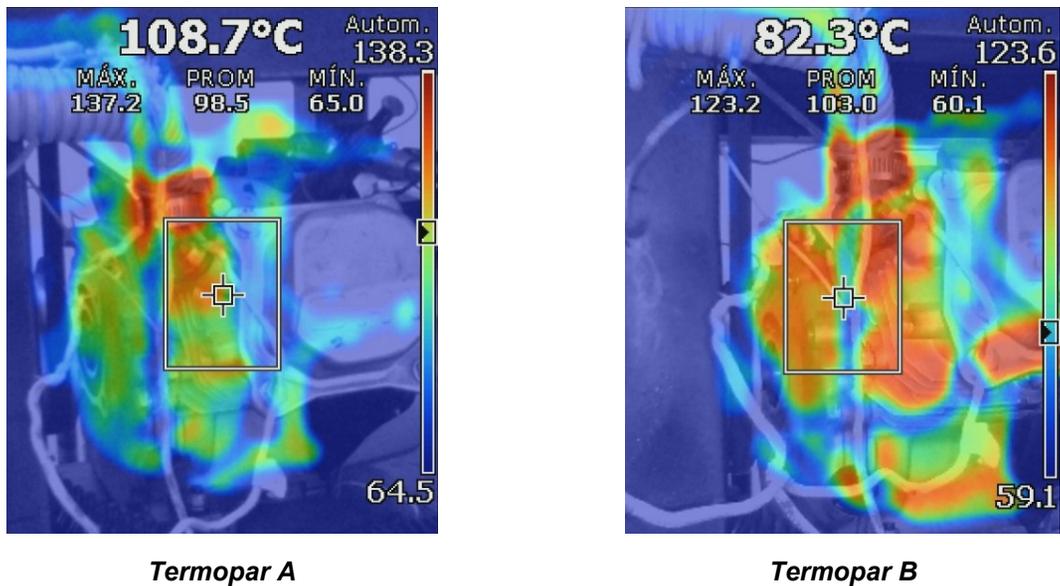


Figura 40. Fotografías termográficas sobre la superficie del motor.

Las imágenes termográficas son una herramienta valiosa en la verificación de mediciones realizadas por termopares. En este caso específico, la Figura 40 es utilizada para corroborar los valores obtenidos en la Tabla 8. Esta figura muestra una representación visual de la información recolectada por los termopares A y B y permite verificar la exactitud de las mediciones.



Conclusiones

- Se diseñó, construyó y probó un banco dinamométrico que permite la determinación de las curvas de potencia par y consumo, con el cual se logra determinar el desempeño de un motor de encendido provocado. Este equipo contribuye a la formación de estudiantes e investigadores proporcionando una herramienta de fácil uso y disponibilidad inmediata en la caracterización de combustibles alternativos.
- Se obtuvo de aceite pirolítico liviano a partir de la conversión termoquímica de residuos plásticos del PP, HDPE y LDPE. En propiedades como el poder calorífico y la gravedad específica presentan valores muy similares a la gasolina comercial, así como una apariencia brillante. Sin embargo, la composición química presenta cambios notorios entre los combustibles, donde el LPO cuenta con gran cantidad de parafinas y pocas olefinas, siendo un factor de disminución encontrando un bajo índice de octano (62.1); respecto a la gasolina comercial de 91.
- La composición química mostró que para el LPO un 71.87% de monómeros entre C8 y C9, mientras que la gasolina en este mismo rango solo posee el 28.87%; siendo 2.5 veces mayor este tipo de moléculas. Esta diferencia de monómeros genera que el LPO tenga un peso molar y rango de temperaturas de ebullición superior a la gasolina.
- Se caracterizó con la gasolina el banco construido comprobando la funcionalidad y confiabilidad del banco de pruebas, encontrando bajas desviaciones en los parámetros medidos en el motor. Además, se probaron los combustibles alternativos de LPO y G50LPO50 encontrando que los resultados experimentales de torque, potencia y consumo específico no proporcionan una medida cuantitativa precisa del impacto de los combustibles.



Recomendaciones y trabajos futuros

- El banco de pruebas tiene una flexibilidad para la experimentación con diferentes combustibles líquidos, por lo que se recomienda la investigación y estudio de otros combustibles con el fin de analizar el desempeño del motor de encendido provocado.
- Se sugiere la automatización del banco de pruebas, con la finalidad de aumentar la precisión de los resultados, minimizando errores humanos y garantizando consistencia en la ejecución de las pruebas experimentales.
- Se recomienda el análisis de los combustibles propuestos en este trabajo en diferentes configuraciones y parámetros mecánicos del motor.
- El uso de un freno hidráulico puede permitir tener mayor control de las velocidades y cargas del motor, por tal motivo, se sugiere la implementación de un freno de este tipo.
- Mejorar la transmisión de potencia para evitar las pérdidas mecánicas en el sistema.
- Existen múltiples estudios del efecto de los combustibles alternativos en la ignición en cámara y la variación de la presión en esta. Este fenómeno puede ser analizado en el banco de pruebas construido al instrumentarle un sensor de presión en cámara.
- Como trabajo futuro se planea la escritura de un artículo sobre las propiedades fisicoquímicas del LPO.
- Se sugiere la compra e implementación de un analizador de gases para el banco de pruebas.



Bibliografía

- [1] H. Heaton, "Industrial Revolution", en *Routledge Library Editions: Industrial Revolution*, 2021, pp. 31–52.
- [2] J. B. Heywood, *Internal Combustion Engine (ICE) Fundamentals*. 1988.
- [3] Y. Sánchez Ortiz, "Modelagem e análise numérica da combustão de óleo vegetal in-natura em motores a combustão interna de ignição por compressão", 2017.
- [4] A. Rovira de Antonio y M. Muñoz Domínguez, *Motores de Combustión Interna*. Madrid, 2015.
- [5] H. Wang, D. DelVescovo, R. D. Reitz, y M. Yao, "Numerical Study of RCCI and HCCI Combustion Processes Using Gasoline, Diesel, iso-Butanol and DTBP Cetane Improver", *SAE Int. J. Engines*, vol. 8, núm. 2, pp. 831–845, 2015, doi: 10.4271/2015-01-0850.
- [6] D. G. Chele Sancan, "Vehículos híbridos, una solución interina para bajar los niveles de contaminación del medio ambiente causados por las emisiones provenientes de los motores de combustión interna", *INNOVA Res. J.*, vol. 2, núm. 12, pp. 1–10, 2017, doi: 10.33890/innova.v2.n12.2017.527.
- [7] G. Kalghatgi, "Is it really the end of internal combustion engines and petroleum in transport?", *Appl. Energy*, vol. 225, núm. February, pp. 965–974, 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.05.076.
- [8] G. I. Andrade Pérez y D. N. Garzón Palacios, *Biodiversidad y petróleo Retos para transformar el futuro*. Bogotá D. C., 2021.
- [9] E. Lorenzo García y A. Morato Medina, *Geología Del Petroleo*, vol. 1, núm. 11. 2018.
- [10] A. I. Levorsen, *Geología del Petróleo*. 1980.
- [11] MathPro, "Introducción a la refinación del petróleo y producción de gasolina y diesel con contenido ultra bajo de azufre", 2011. [En línea]. Disponible en: http://www.theicct.org/sites/default/files/ICCT_RefiningTutorial_Spanish.pdf.
- [12] J. B. Heywood, "Internal combustion engine fundamentals / John B. Heywood.", *Intern. Combust. Engine Fundam.*, pp. 1–37, 1988.
- [13] R. Nayab et al., "Sustainable biodiesel production via catalytic and non-catalytic transesterification of feedstock materials – A review", *Fuel*, vol. 328, núm. July, p. 125254, 2022, doi: 10.1016/j.fuel.2022.125254.
- [14] Organization of the Petroleum Exporting Countries - OPEC, "2020 World Oil Outlook 2045", 2020. [En línea]. Disponible en: https://www.opec.org/opec_web/en/publications/340.htm.
- [15] S. Kasa, L. Yao, P. Bhada-Tata, y F. Van Woerden, *What a Waste 2.0 A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*, vol. 148. 2018.
- [16] M. M. Hasan, M. G. Rasul, M. M. K. Khan, N. Ashwath, y M. I. Jahirul, "Energy recovery from municipal solid waste using pyrolysis technology: A review on current status and developments", *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 145, núm. March, p. 111073, 2021, doi: 10.1016/j.rser.2021.111073.
- [17] K. Ragaert, L. Delva, y K. Van Geem, "Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste", *Waste Manag.*, vol. 69, pp. 24–58, 2017, doi: 10.1016/j.wasman.2017.07.044.
- [18] M. Menossi, J. M. Milanese, y L. J. Rovetto, "Hidrogenación de poli - olefinas a alta presión", *Rev. Fac. Ciencias Exactas, Físicas y Nat.*, vol. 4, núm. 2, pp. 33–41, 2017.
- [19] H. Jeswani et al., "Life cycle environmental impacts of chemical recycling via pyrolysis of mixed plastic waste in comparison with mechanical recycling and energy recovery", *Sci. Total Environ.*, vol. 769, 2021, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.144483.



- [20] *Global Plastics Outlook*. OECD, 2022.
- [21] O. O. Rivera-Garibay, L. Álvarez-Filip, M. Rivas, O. Garelli-Ríos, E. Pérez-Cervantes, y N. Estrada-Saldívar, "Impacto de la contaminación por plásticos en Áreas Naturales Protegidas mexicanas", *Green-Peace*, vol. 53, núm. 9, pp. 1689–1699, 2020.
- [22] A. R. Y. Ruíz Martínez y M. G. Neira Velázquez, "Gasificación de polímeros por plasma", *Plast. Technol. México*, 2020.
- [23] M. Mancheno, S. Astudillo, P. Arévalo, I. Malo, T. Naranjo, y J. Espinoza, "Aprovechamiento energético de residuos plásticos obteniendo combustibles líquidos, por medio del proceso de pirólisis", *La Granja Rev. ciencias la vida*, vol. 23, núm. 1, pp. 53–59, 2016, doi: 10.17163/lgr.n23.2016.06.
- [24] J. Aguado Alonso, D. Serrano, J. Escola, y L. Briones, "El papel de la Química en la valorización de los residuos plásticos", *An. la Real Soc. Española Química*, vol. 107, núm. 1, pp. 76–83, 2011.
- [25] J. M. Riesco Ávila et al., "Caracterización del proceso de pirólisis de aceite usado de motor", *Verano la Cienc. Univ. Guanajuato*, vol. 10, núm. 2395–9797, pp. 1–9, 2021.
- [26] J. Gaviria Ríos, J. Mora Guzmán, y J. Agudelo, "Historia motores de combustión", *Rev. Fac. Ing.*, núm. 26, pp. 68–78, 2002.
- [27] L. G. Sánchez, M. de J. Fabela, O. Flores, J. R. Hernández, D. Vázquez, y M. E. Cruz, "Revisión de la Normativa Internacional sobre Límites de Emisiones Contaminantes de Vehículos de Carretera", Sanfandila, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt562.pdf>.
- [28] Cesvi Colombia S.A., "Autocrash Edición No. 54-ABC del cuidado de la pintura del automóvil", *Autocrash*, Medellín, pp. 38–39, mar. 2019.
- [29] H. Rodríguez Galbarro, "Normas Euro de Control de Emisiones de Vehículos y Eficiencia Energética". <https://ingemecanica.com/legisla/legemisiones.html> (consultado ene. 05, 2023).
- [30] ICCT, "Actualización de la NOM-044. Información para la toma de decisiones", 2017.
- [31] K. Yamaji, M. Tomimatsu, I. Takagi, A. Higuchi, T. Yoshida, y E. Murase, "New 2.0L I4 Gasoline Direct Injection Engine with Toyota New Global Architecture Concept", en *SAE Technical Papers*, 2018, vol. 2018-April, pp. 1–10, doi: 10.4271/2018-01-0370.
- [32] Volvo, "Carbon footprint report Volvo C40 Recharge", pp. 1–51, 2021.
- [33] Editorial-CEP, "El motor de gasolina: funcionamiento, elementos, refrigeración, combustible y engrase", en *Temario oficial primera-segunda conductor extremadura*, 2001, pp. 155–176.
- [34] M. Gökteş, M. Kemal Balki, C. Sayin, y M. Canakci, "An evaluation of the use of alcohol fuels in SI engines in terms of performance, emission and combustion characteristics: A review", *Fuel*, vol. 286, núm. 2021. 2021, doi: 10.1016/j.fuel.2020.119425.
- [35] J. R. Flores Iralda, G. M. Gómez Gómez, L. A. Conejo Rodríguez, X. U. Huerta Jacobo, D. Nava Sosa, y J. M. Riesco Ávila, "Propiedades fisicoquímicas de combustibles alternativos obtenidos mediante pirólisis de residuos", *Verano la Cienc. Univ. Guanajuato*, vol. 16, pp. 1–6, 2022.
- [36] J. M. Riesco Avila, J. R. Vera Rozo, D. A. Rodríguez Valderrama, D. M. Pardo Cely, y B. Ramón Valencia, "Effects of heating rate and temperature on the yield of thermal pyrolysis of a random waste plastic mixture", *Sustainability*, vol. 14, núm. 15, p. 9026, 2022, doi: 10.3390/su14159026.
- [37] J. E. Cuadros Villamizar, "Caracterización del proceso de pirólisis de aceites de motor usado", Universidad de Pamplona, 2021.
- [38] M. Mikulski, M. Ambrosewicz-Walacik, J. Hunicz, y S. Nitkiewicz, "Combustion engine applications of waste tyre pyrolytic oil", *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 85, p. 100915, 2021, doi: 10.1016/j.pecs.2021.100915.



- [39] F. Payri y M. Muñoz, *Motores de combustión interna alternativos*. .
- [40] A. Melgar Bachiller, *Introducción a los motores de combustión interna alternativos*. Valladolid, 2011.
- [41] M. M. Vargas Vilca, "Evaluación de la pirólisis térmica y de la catalítica usando zeolitas volcánicas como catalizador de desechos plásticos", Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, 2020.
- [42] A. E. Mendoza, "Caracterización del proceso de conversión de residuos plásticos en combustible por medio de pirólisis", *Tesis- Repos.*, pp. 1–106, 2016, [En línea]. Disponible en: <http://www.repositorio.ugto.mx/bitstream/20.500.12059/116/1/387385.pdf>.
- [43] I. J. Braulio y A. Pinos, *Obtención de combustibles a partir de Tereftalato de Polietileno (PET) a escala de laboratorio mediante procesos de pirólisis y gasificación*. 2020.
- [44] V. K. Kareddula y R. K. Puli, "Influence of plastic oil with ethanol gasoline blending on multi cylinder spark ignition engine", *Alexandria Eng. J.*, vol. 57, núm. 4, pp. 2585–2589, 2018, doi: 10.1016/j.aej.2017.07.015.
- [45] I. E. Yousif y A. M. Saleh, "Butanol-gasoline blends impact on performance and exhaust emissions of a four stroke spark ignition engine", *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 41, núm. November 2022, p. 102612, 2023, doi: 10.1016/j.csite.2022.102612.
- [46] S. V. Kumbhar y S. A. Khot, "Experimental investigations of ethanol-gasoline blends on the performance, combustion, and emission characteristics of spark ignition engine spark ignition (S.I) engine with partial addition of n-pentane", *Mater. Today Proc.*, núm. xxxx, 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2022.11.284.
- [47] Z. Dobó, Z. Jakab, G. Nagy, T. Koós, K. Szemmelveisz, y G. Muránszky, "Transportation fuel from plastic wastes: Production, purification and SI engine tests", *Energy*, vol. 189, 2019, doi: 10.1016/j.energy.2019.116353.
- [48] A. Elfasakhany, "Performance and emissions analysis on using acetone–gasoline fuel blends in spark-ignition engine", 2016.
- [49] A. Elfasakhany, "Investigations on the effects of ethanol–methanol–gasoline blends in a spark-ignition engine: Performance and emissions analysis", *Eng. Sci. Technol. an Int. J.*, vol. 18, núm. 4, pp. 713–719, 2015, doi: 10.1016/j.jestch.2015.05.003.
- [50] S. Wiriyaumpaiwong y J. Jamradloedluk, "Distillation of Pyrolytic Oil Obtained from Fast Pyrolysis of Plastic Wastes", *Energy Procedia*, vol. 138, pp. 111–115, 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.10.071.
- [51] W. Nurdiyana Wan Mansor et al., "A Review of Plastic-derived Diesel Fuel as a Renewable Fuel for Internal Combustion Engines: Applications, Challenges, and Global Potential", *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 1013, núm. 1, 2022, doi: 10.1088/1755-1315/1013/1/012014.
- [52] S. Babazadeh Shayan, S. M. Seyedpour, y F. Omimi, "Effect of oxygenates blending with gasoline to improve fuel properties", *Chinese J. Mech. Eng. (English Ed.)*, vol. 25, núm. 4, pp. 792–797, 2012, doi: 10.3901/CJME.2012.04.792.
- [53] J. H. Badia, E. Ramírez, R. Bringué, F. Cunill, y J. Delgado, "New Octane Booster Molecules for Modern Gasoline Composition", *Energy and Fuels*, vol. 35, núm. 14, pp. 10949–10997, 2021, doi: 10.1021/acs.energyfuels.1c00912.
- [54] W. Dabelstein, A. Reglitzky, A. Schütze, K. Reders, y A. Brunner, "Automotive Fuels", *Ullmann's Encycl. Ind. Chem.*, pp. 1–41, 2016, doi: 10.1002/14356007.a16_719.pub3.
- [55] M. S. M. Zaharin, N. R. Abdullah, H. H. Masjuki, O. M. Ali, G. Najafi, y T. Yusaf, "Evaluation on physicochemical properties of iso-butanol additives in ethanol-gasoline blend on performance and emission characteristics of a spark-ignition engine", *Appl. Therm. Eng.*, vol. 144, pp. 960–971,



- 2018, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2018.08.057.
- [56] J. Badra, A. Zubail, y J. Sim, "Numerical Investigation into Effects of Fuel Physical Properties on GCI Engine Performance and Emissions", *Energy and Fuels*, vol. 33, núm. 10, pp. 10267–10281, 2019, doi: 10.1021/acs.energyfuels.9b02340.

Anexo 1

Datasheet de componentes del esquema eléctrico y de control

Termopar tipo K

ANSI Color Code: Positive Wire, Yellow;
Negative Wire, Red; Overall, Yellow

Extension Grade
CHROMEGA®/ALOMEGA®
Duplex
ANSI Type KX **KX**

To Order Visit omega.com/exgg_rsx_wire for Pricing and Details

Insulation	AWG No.	Model Number	Type Wire	Insulation		Max. Temp*		Nominal Size mm (in)	Wt.kg/300m (lb/1000')†	
				Conductor	Overall	°C	°F			
Glass	16	EXGG-K-16	Solid	Glass Braid	Glass Braid	200	392	2.2 x 3.3 (0.085 x 0.130)	9 (17)	
	Neoflon PFA	20	EXTT-K-16	Solid	PFA	PFA	200	392	2.2 x 3.9 (0.086 x 0.152)	8 (16)
		24	EXTT-K-24	Solid	PFA	PFA	200	392	1.7 x 3.0 (0.068 x 0.116)	4 (9)
Polyvinyl	14	EXPP-K-14	Solid	Polyvinyl	Polyvinyl	105	221	3.4 x 7.3 (0.134 x 0.288)	13 (28)	
		EXPP-K-16	Solid	Polyvinyl	Polyvinyl	105	221	3.1 x 5.3 (0.123 x 0.207)	10 (22)	
		EXPP-K-18S	7 x 24	Polyvinyl	Polyvinyl	105	221	5.5 x 5.7 (0.199 x 0.226)	10 (22)	
	20	EXPP-K-18S	7 x 26	Polyvinyl	Polyvinyl	105	221	3.5 x 5.2 (0.138 x 0.205)	8 (16)	
		EXPP-K-20	Solid	Polyvinyl	Polyvinyl	105	221	2.4 x 3.8 (0.095 x 0.151)	6 (12)	
		EXPP-K-20S	7 x 28	Polyvinyl	Polyvinyl	105	221	3.1 x 4.4 (0.123 x 0.175)	6 (12)	
	24	EXPP-K-24	Solid	Polyvinyl	Polyvinyl	105	221	1.9 x 3.0 (0.075 x 0.120)	2 (4)	
		EXPP-K-24S	7 x 32	Polyvinyl	Polyvinyl	105	221	2.1 x 3.4 (0.082 x 0.134)	4 (9)	
		Neoflon FEP	16	EXFF-K-16	Solid	FEP	FEP	200	392	2.2 x 3.9 (0.086 x 0.152)
FEP	20	EXFF-K-20	Solid	FEP	FEP	200	392	1.7 x 2.9 (0.068 x 0.116)	4 (9)	
	24	EXFF-K-24	Solid	FEP	FEP	200	392	1.4 x 2.3 (0.056 x 0.092)	3 (6)	

Omega, 2023, 01, 02. Catálogo termopar tipo K, https://assets.omega.com/pdf/cable-and-wire/thermocouple-and-rtd-wire-and-cable/EXGG_RSX_WIRE.pdf

NI-9213 National Instruments

Input Characteristics

Number of channels	16 thermocouple channels, 1 internal autozero channel, 1 internal cold-junction compensation channel	
ADC resolution	24 bits	
Type of ADC	Delta-Sigma	
Sampling mode	Scanned	
Voltage measurement range	±78.125 mV	
Temperature measurement ranges	Works over temperature ranges defined by NIST (J, K, T, E, N, B, R, S thermocouple types)	
Timing Mode	Conversion Time (Per Channel)	Sample Rate ^[1] (All Channels ^[2])
High-resolution	55 ms	1 S/s

NI National instruments, 2023, 01, 02. Datasheet de la NI-9213, <https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/ni-9213-specs/page/overview.html>



NI USB-9162 National Instruments



Letter of Volatility
NI USB-9162

Manufacturer: National Instruments

Board Assembly Part Numbers (Refer to Procedure 1 for identification procedure):

Part Number and Revision	Description
192558D-01L or later	USB-9162

Volatile Memory

Target Data	Type	Size	Battery Backup	User Accessible	System Accessible	Sanitization Procedure
None						

Non-Volatile Memory (incl. Media Storage)

Target Data	Type	Size	Battery Backup	User Accessible	System Accessible	Sanitization Procedure
Module-specific firmware	CPLD	Lattice LC4064V	No	No	Yes	None
Firmware	EEPROM	2 kB	No	No	Yes	None

NI National instruments, 2023, 01, 02. Datasheet de la NI-9162, <https://www.ni.com/pdf/manuals/378256a.pdf>

Galga Extensiométrica o celda de carga

Capacidad de Nominal - kg	1, 2, 5, 10, 20, 30
Material	Aluminio Anodizado
Sensibilidad de mv/v	2 +/- 10%
Error combinado - % salida nominal	< 0,03
Creep de capacidad de nominal - % salida nominal	20 min: < 0,03 08 hrs: < 0,05
Cero inicial - % salida nominal	+/- 1
Temperatura de trabajo útil - °C	- 5 a + 60
Temperatura de trabajo compensada - °C	0 a + 50
Error excentricidad de conformidad OIML	> 3.000 divisiones
Efecto de la temperatura- ppm/°C de la salida nominal	en el cero: < 30 en la calibración : < 10
Máx. sobrecarga s/ alteraciones - % cap. nominal	150
Sobrecarga de ruptura - % cap. nominal	300
Excitación VCC o VCA	máxima: 15 recomendada: 10
Resistencia eléctrica entrada - ohms	405 +/- 10
Resistencia eléctrica salida - ohms	350 +/- 1
Resistencia de aislación (50 VCC máx.) - megaohms	> 5.000
Deflexión máxima - mm a cap. nominal	< 1
Grado de protección (IEC 529)	IP67
Plataforma máxima - mm	200 x 200 270 x 270

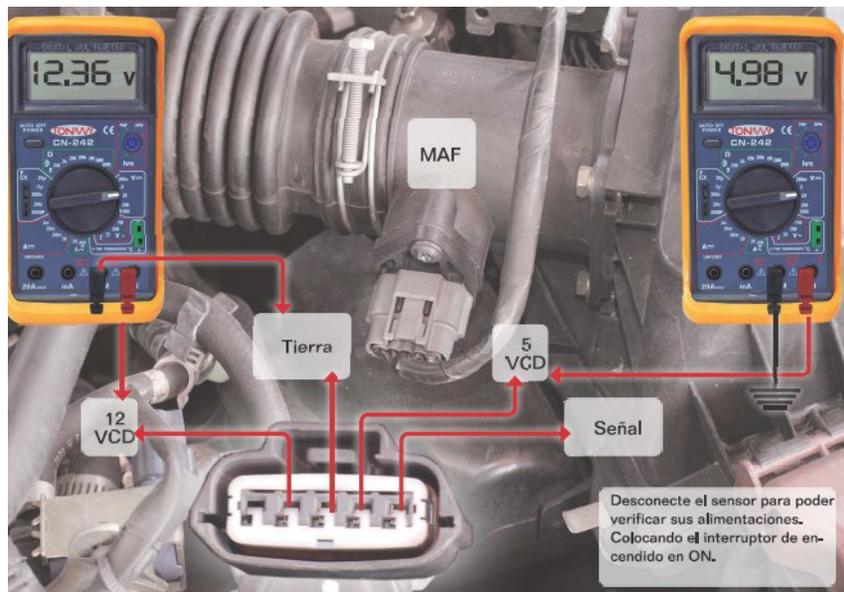
Caípe Automatización, 2023, 01, 02. Características generales de las celdas de carga, https://www.caípe.com.ar/docs/especificaciones_celda_de_carga.pdf

Transmisor HX711

Pin #	Name	Function	Description
1	VSUP	Power	Regulator supply: 2.7 ~ 5.5V
2	BASE	Analog Output	Regulator control output (NC when not used)
3	AVDD	Power	Analog supply: 2.6 ~ 5.5V
4	VFB	Analog Input	Regulator control input (connect to AGND when not used)
5	AGND	Ground	Analog Ground
6	VBG	Analog Output	Reference bypass output
7	INA-	Analog Input	Channel A negative input
8	INA+	Analog Input	Channel A positive input
9	INB-	Analog Input	Channel B negative input
10	INB+	Analog Input	Channel B positive input
11	PD_SCK	Digital Input	Power down control (high active) and serial clock input
12	DOUT	Digital Output	Serial data output
13	XO	Digital I/O	Crystal I/O (NC when not used)
14	XI	Digital Input	Crystal I/O or external clock input, 0: use on-chip oscillator
15	RATE	Digital Input	Output data rate control, 0: 10Hz; 1: 80Hz
16	DVDD	Power	Digital supply: 2.6 ~ 5.5V

Sparkun, 2023, 01, 02. Características generales del amplificador HX711, <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/1132222/AVIA/HX711.html>

Sensor MAF



Nissan, 2023, 01, 02. Manual de computadoras y módulos automotrices Nissan Sentra motor 1.8 L ECU terminales, <https://pdfcoffee.com/11-ecm-nissan-sentra-18-112-pinespdf-4-pdf-free.html>

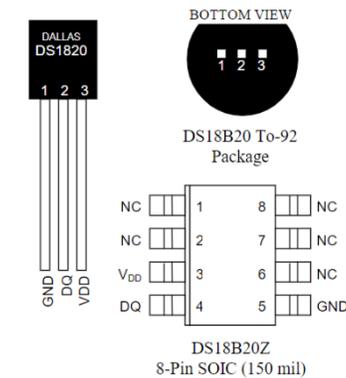
Anemómetro de hilo caliente

Circuito	Caracterizado con un chip de circuito microprocesador LSI
Pantalla	LCD tamaño: 58mm x 34mm
Unidad de Medición	Velocidad de Aire: m/S (metros por segundo) Km/h (kilómetros por hora) Ft/min (pies por minuto) Knot (millas náuticas por hora) Mile/h (millas por hora) Corriente de Aire: CMM (m ³ /min., metro cubico por min.) CFM (m ³ /min., pie cubico por min.) Temperatura de Aire: °CF Termómetro Tipo K/J °CF
Tiempo muestreo del registro de datos	2 segundos a 8 horas, 59 minutos, 59 segundos
Estructura del Sensor	Velocidad de Aire y Corriente : Termisor pequeño tipo grano de cristal. Temperatura de Aire : Termistor. Termómetro Tipo K / J. Termopar
Compensación de temperatura	Temperatura automática. compensación por el termómetro tipo K/J.
Retención de datos	Mantiene la lectura en la pantalla.

Twilight, 2023, 01, 02. Twilight instrumentos de medición industrial, Anemómetro de filamento

caliente LT-YK2005AH, [https://twilight.mx/ficha-tecnica/LT-YK2005AH-71-LT-YK2005AH H%20FT%20.pdf](https://twilight.mx/ficha-tecnica/LT-YK2005AH-71-LT-YK2005AH%20FT%20.pdf)

Termopozo DS18D20



PIN DESCRIPTION

GND - Ground
DQ - Data In/Out
V_{DD} - Power Supply Voltage
NC - No Connect

Dallas semiconductor, 2023, 01, 02. Programmable Resolution 1-Wire® Digital Thermometer, <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/58557/DALLAS/DS18B20.html>

Anexo 2

Especificaciones de Equipos

Motor Pretul MOG-65P

Technical Data		PRETUL®	
	MOG-65P	MOG-130P	
Code •	28114	28115	
Description •	Gasoline Engine		
Motor Cylinders •	196 cm ³ (cc)	389 cm ³ (cc)	
Motor Rated Power •	6.5 Hp	13 Hp	
Max. Torque •	11.8 Nm	25 Nm	
Diameter / Type shaft •	3/4" whit keyseat	1" whit keyseat	
Motor Type •	4-stroke OHV		
No Load Speed •	3 600 RPM		
Fuel •	Gasoline		
Gas Tank Capacity •	0.63 gal	1.25 gal	
Fuel Consumption •	0.7 L/h	1.5 L/h	
Oil Type •	SAE 10W/30		
Noise Level •	< 94 dB		
Weight •	28.6 lb	63.9 lb	
	Low oil level sensor		

Pretul, 2023,01,02. Instructivo de motor a gasolina MOG65P, <https://www.truper.com/admin/descargables/manual/28114-28115-02-INSTRUCTIVE.pdf>

Torquímetro

General Specifications	Code N Standard Performance	Code C ³ Enhanced Performance
Nonlinearity (end point method, % of F.S.):	< ± 0.10	< ± 0.05
Hysteresis (% of F.S.):	< ± 0.10	< ± 0.05
Nonrepeatability (% of F.S.):	< ± 0.05	< ± 0.02
Accuracy (combined nonlinearity, hysteresis and non-repeatability, % of F.S.):	< ± 0.1	< ± 0.07
Stability, 6 Months (% of F.S.):	< ± 0.15	< ± 0.10
Rotational Effect on Zero (% of F.S.):	< ± 0.05	< ± 0.02
Calibration Accuracy* (% of F.S. @ 75 deg. F., traceable to NIST):	< ± 0.05	< ± 0.02
Temperature Effects:		
Zero (% of F.S./deg. F.):	< ± 0.002	< ± 0.001
Span (% of Rdg./deg. F.):	< ± 0.002	< ± 0.001
Compensated Range:		+ 75 to + 175 deg. F.
Minimum Usable Range:		- 25 to + 185 deg. F.
Storage Range:		- 65 to + 225 deg. F.
Output (nominal):		1.5 mV/V
Zero Balance:		< ± 1% of F.S.
Excitation Voltage:	3 - 6 volts rms, 3 kHz ± 10%, sine wave capable of driving a 90 ohm bridge.	
Readout:	A strain gage carrier amplifier with the stated excitation. Use Himmelstein Series 700 and 66000 Instruments or Models 6-201, 6-202, 61201, or AC11, AC21 and AC23 for optimum performance.	

Himmelstein, 2023, 01, 02. MCRT 29000T Series Non-Contact mV/V Output Strin Gge Torquemeters, http://www.instronics.ca/ins_pdf/b709c.pdf

Módulo 721

BULLETIN 371E

Model 721 Mechanical Power Instrument
Use With a mV/V Strain Gage Sensor and a Frequency Output Sensor



Superb instrument for mV/V torque, force, and pressure sensors, and frequency producing speed, flow and velocity transducers

- **reads, displays, processes and outputs**
 - shaft torque, speed, power
 - pump/motor head, flow, fluid power
 - drawbar force, velocity, power
- **fast, rock solid readings with high noise immunity**
 - 2000 samples/sec. for torque, head or drawbar force input
 - 1 millisecond response for speed, flow or velocity input
- **6 digit engineering unit display with legends and 0.01% resolution**
- **RS232, RS422 or RS485 serial communication**
- **auto-scaled $\pm 5V$ and/or $\pm 10V$ analog outputs**
- **no pots, batteries, fans, maintenance, or external power supplies**

Himmelstein, 2023, 01, 02. Model 721 Mechanical Power Instrument, http://www.instruments.ca/ins_pdf/B371E.pdf

Cojinete de apoyo

Dimensiones

Altura del centro (soporte de pie)	30.2 mm
Ancho del rodamiento, total	27.4 mm
Ancho total del soporte	32 mm
Distancia del centro entre los orificios para tornillos	97 mm
Diámetro del eje	15.875 mm

Rendimiento

Capacidad de carga dinámica básica	9.56 kN
Capacidad de carga estática básica	4.75 kN
Note	Limiting speed with shaft tolerance h6
Velocidad límite	9 500 r/min

SKF, 2023, 01, 02. Unidad de rodamientos de bolas con soporte de pie con soporte de acero

prensado y aro interior prolongado, <https://www.skf.com/mx/products/mounted-bearings/ball-bearing-units/pillow-block-ball-bearing-units/productid-P%201.1%2F4%20TF>



Banda V A35

Valores de conversión / Conversion values / Valeurs de conversion / Umrechnungswerte

Perfil Profile Profil	Sección Cross sectio Section Querschnitt	Ancho inferior correa Lower belt span argeur inférieure courroie Keilriemenbreite innen	Ancho primitivo Original span Largeur primitive Ausgangsbreite	Desarrollos de correa / Belt lengths / Développements de courroie / Keilriemenlängen				Diámetro mínimo de la polea Minimum pulley diameter Diamètre minimum de la poulie Mindestdurchmesser der Riemenscheiben (mm)	Peso por Weight per Poids par Gewicht pro (≈ kg/m)
				Desarrollo nominal Nominal length Développement nominal Nennlänge	Desarrollo ext. Ext. length Développement ext. Länge außen	Desarrollo de ref. Ref. length Développement de réf. Ref.-Länge	Desarrollo int. Interior length Développement intérieur Länge innen		
Z	10,0 x 6	5,9	8,5		$L_3 \approx L_1 + 38$ $L_3 \approx L_2 + 16$	$L_2 \approx L_1 + 38$ $L_2 \approx L_3 + 16$	-	50	0,064
A	13,0 x 8	7,5	11,0	Desarrollo de referencia Reference length Développement de référence Referenzlänge	$L_3 \approx L_1 + 50$ $L_3 \approx L_2 + 20$	$L_2 \approx L_1 + 50$ $L_2 \approx L_3 + 20$	-	71	0,109
B	17,0 x 11	9,4	14,0		$L_3 \approx L_1 + 69$ $L_3 \approx L_2 + 29$	$L_2 \approx L_1 + 69$ $L_2 \approx L_3 + 29$	-	112	0,196
C	22,0 x 14	12,3	19,0		$L_3 \approx L_1 + 88$ $L_3 \approx L_2 + 30$	$L_2 \approx L_1 + 88$ $L_2 \approx L_3 + 30$	-	180	0,324

TransLink Power Transmission, 2023, 01, 02. Correas trapeciales clásicas, https://www.translinkpt.com/wp-content/uploads/2018/02/bandas_trapezoidales.pdf



Anexo 3

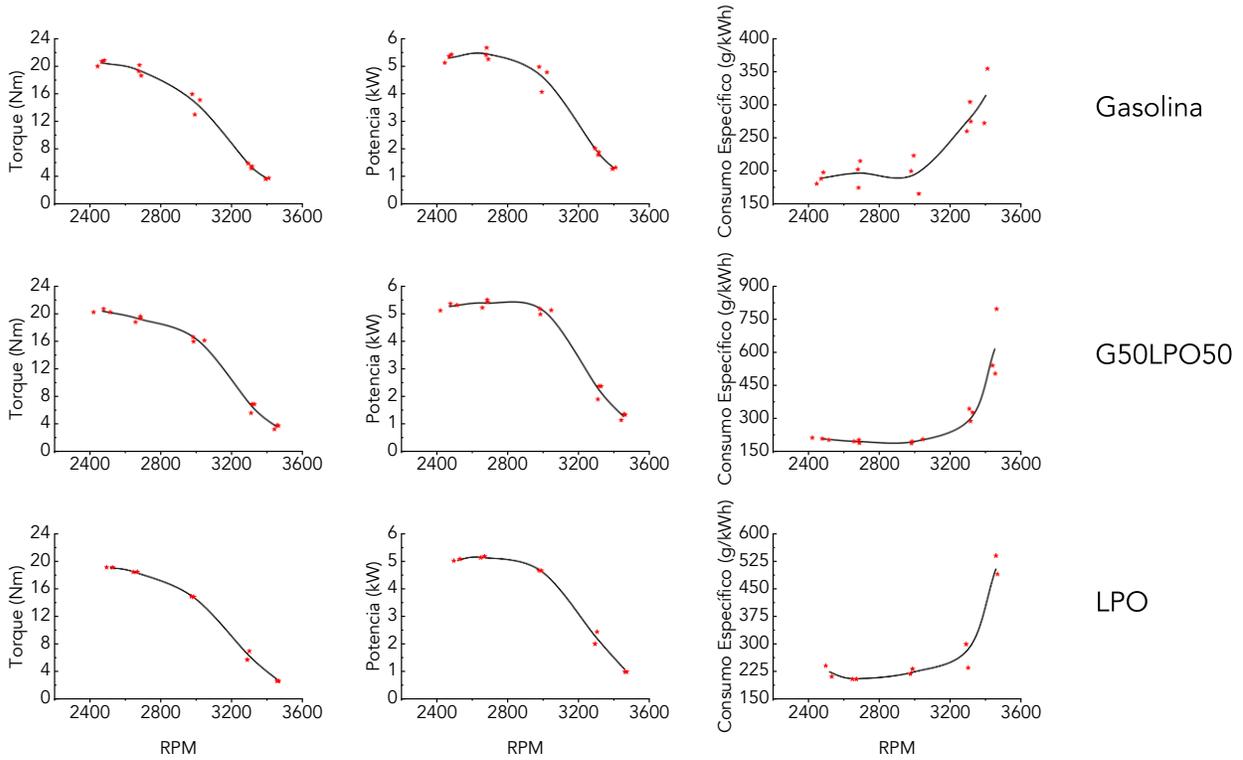


Figura A.3.1. Repetibilidad en la experimentación.

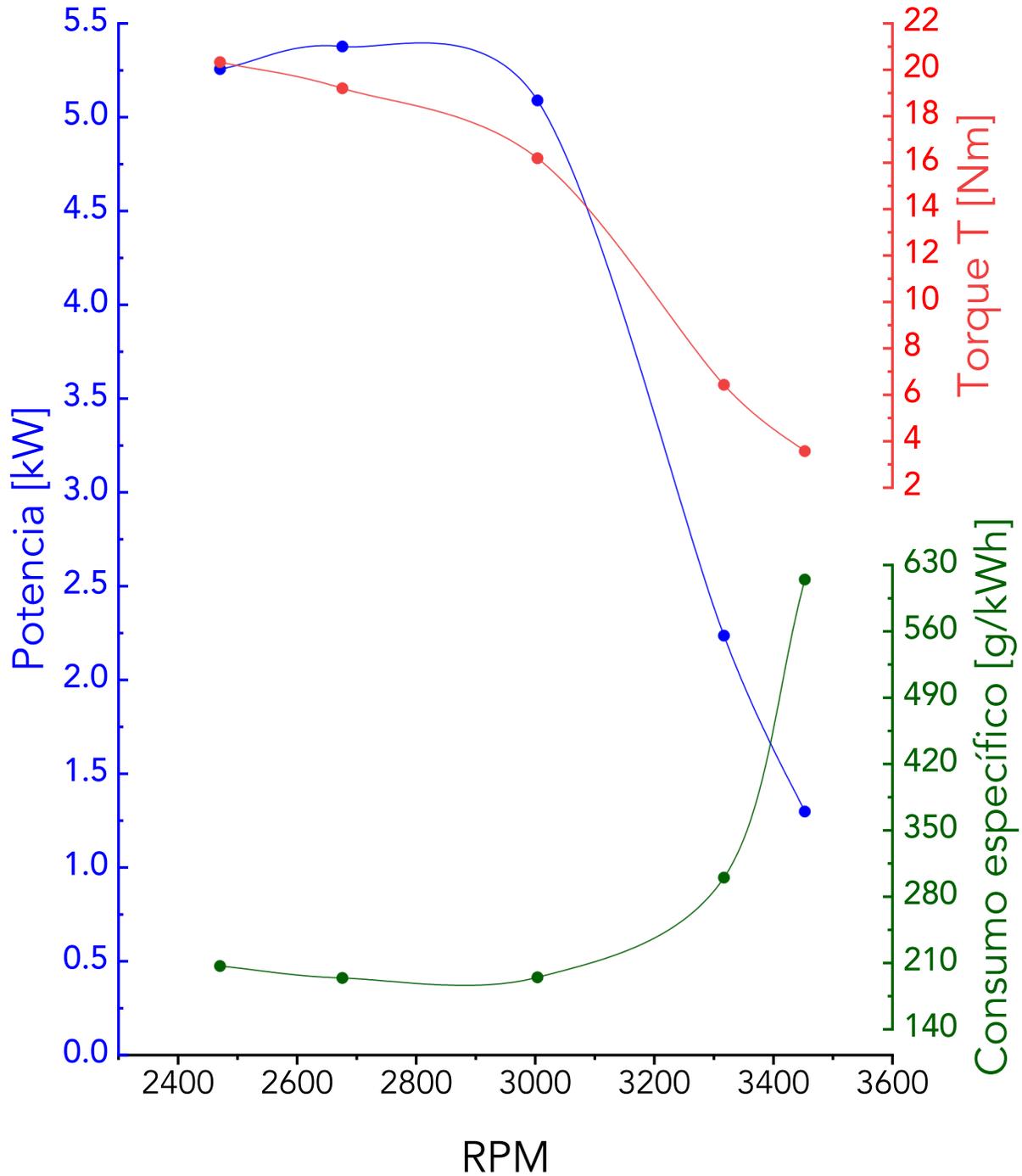


Figura A.3.2. Curvas características MOG 65P con G50LPO50

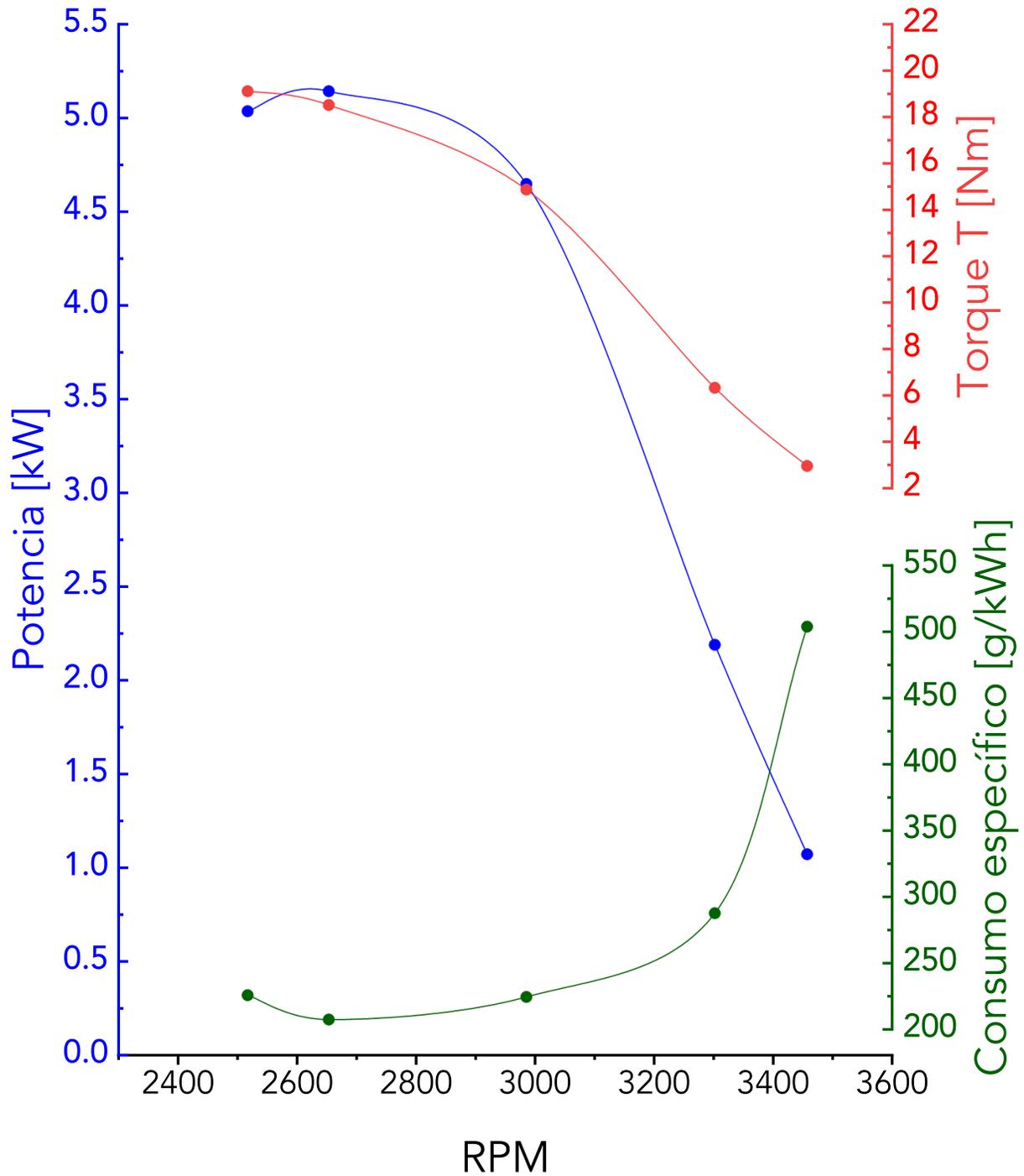


Figura A.3.3. Curvas características MOG 65P con LPO



Anexo 4

A.4.1. Código Arduino para la adquisición de parámetros de flujo masico de aire y de combustible.

```
#include <Arduino.h>
#include <OneWire.h>
#include
<DallasTemperature.h>
#include "HX711.h"
const int DOUT=A5;
const int CLK=A4;
float carga_actual=0.0;
float carga_anterior=0.0;
HX711 balanza;
//Creamos una variable de
tipo entero
OneWire onewire(2);
DallasTemperature
sensors(&onewire);
double T = 0.00;
double vel=0.00;
double rho=0.00;
float lecturaV = 0.00;
float v=0.00;
double
m_dot_air=0.00000000;
const float pi=3.1416;
const float D=0.0295;
void setup() {
  //Iniciamos la comunicación
  serial
  Serial.begin(9600);
  while (!Serial) ;
  sensors.begin();
  balanza.begin(DOUT, CLK);
  //Serial.print(" Lectura del
  valor del ADC: ");
  //Serial.println(balanza.read())
  ;
  //Serial.println("No ponga
  ningun objeto sobre la
  balanza");
  //Serial.println("Destarando...
  ");
  //Serial.println("...");
  balanza.set_scale(-
  1922065); // Establecemos la
  escala
  balanza.tare(20); //El peso
  actual es considerado Tara.
  Serial.println("LABEL,HORA,
  Tair, m_dot_a, m_fuel");
}
void loop() {
  sensors.requestTemperatures
  ();
  T
  =
  sensors.getTempCByIndex(0)
  ;
  delay(80);
  lecturaV = analogRead(1);
  v=lecturaV*5.00/1023.00;
  vel=-0.801928373-
  0.23954354*v+1.24505223*p
  ow(v,2.00);
  rho=1.12566359E+00-
  4.12104229E-
  03*T+1.50865682E-
  05*pow(T,2)-5.51858583E-
  08*pow(T,3)+1.99796164E-
  10*pow(T,4)-6.69191783E-
  13*pow(T,5)+1.52987376E-
  15*pow(T,6);
  m_dot_air=abs((pi/4)*pow(D,
  2)*vel*rho);
  carga_actual=
  balanza.get_units(20);
  //Imprimimos por monitor
  serie el flujo másico
  Serial.print("DATA,TIME,");
  Serial.print(T);
  Serial.print(",");
  Serial.print(m_dot_air,6);
  Serial.print(",");
  Serial.println(1000*carga_act
  ual,2);
}
```

A.4.2. Sistema de adquisición de temperaturas

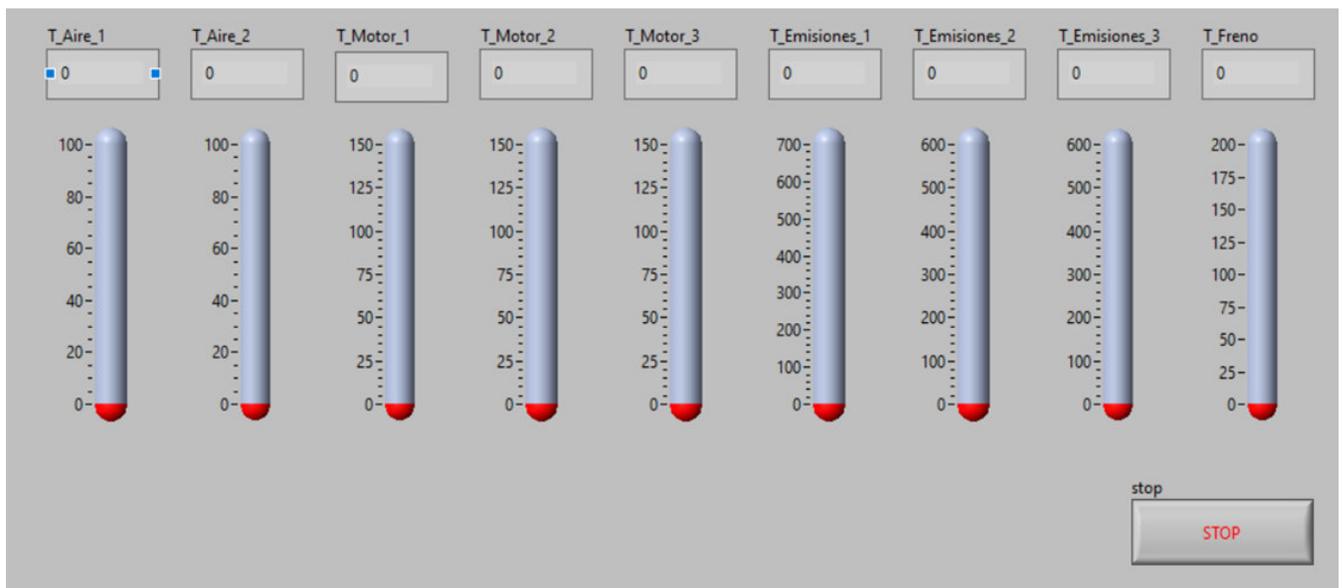
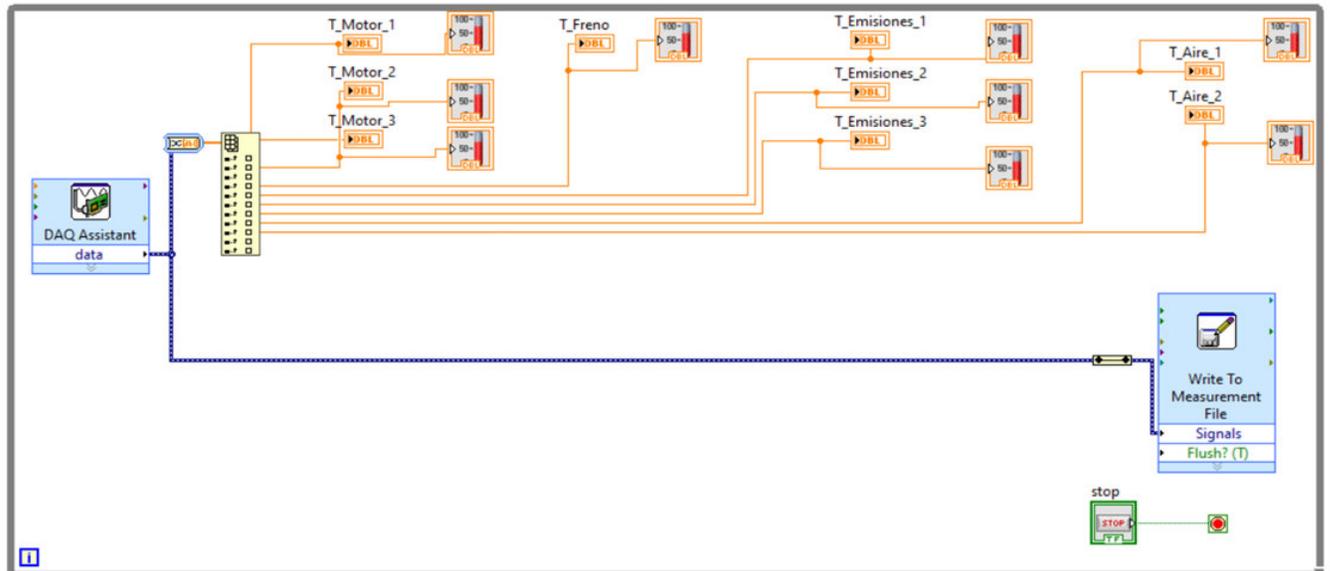


Figura A4-1. Interfaz de adquisición de temperaturas en LabVIEW