

Caracterización del proceso de pirólisis de aceite usado de motor

José Manuel Riesco-Ávila¹, Aranza Bernal-Ramírez¹, Karla Donjuan-Martínez¹, Itzel Lona-Fonseca¹, Denilson Nava-Sosa¹, Cristina Fonseca-Yepez², Edward Johan Villamizar-Cuadros³

¹División de Ingenierías, Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato.

²División de Ciencias Naturales y Exactas, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato.

³Universidad de Pamplona, Colombia.

Resumen

Los aceites lubricantes usados son considerados como residuos peligrosos debido a su alta concentración de metales pesados, sustancias orgánicas y otros contaminantes que quedan de los aditivos. En este trabajo, se propone una alternativa para reciclar estos aceites residuales, convirtiéndolos en combustibles con propiedades similares a las de los usados tradicionalmente en motores de combustión interna. Usando una rampa de calentamiento de 22.5 °C/min y una temperatura máxima de pirólisis de 420 °C, se obtuvieron rendimientos de conversión de 60% en masa.

Palabras clave: Pirólisis; aceite lubricante usado.

Introducción

La creciente demanda de energía a nivel mundial debido al aumento de la población, el agotamiento de los recursos petroleros que ha obligado a realizar exploraciones en lugares cada vez más desafiantes y difíciles y el alto costo de los combustibles derivados del petróleo, ha motivado a los investigadores a buscar nuevas fuentes de energía. Por otro lado, uno de los principales problemas de nuestra sociedad es la generación y disposición de residuos sólidos, un problema que debe ser resuelto en condiciones económicas y respetuosas con el medio ambiente. 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. Una alternativa para la conversión de materiales que no son fácilmente reprocesados es la pirólisis, un proceso termoquímico que implica la descomposición del material orgánico a temperaturas elevadas en ausencia de oxígeno. Este proceso descompone las macromoléculas en productos de menor peso molecular (líquidos, gases y carbón residual). Estos productos pueden ser útiles como combustibles o materias primas para otros procesos.

Se estima que anualmente se generan en el mundo 45 millones de toneladas de aceites residuales provenientes de diferentes sectores, de los cuales sólo el 40% es recolectado y desechado adecuadamente, lo que representa un grave impacto para la salud y el medio ambiente, debido a su contenido en metales y otros contaminantes que quedan de los aditivos [1] [2]. Por esta razón, el reciclaje y la reutilización de aceites usados han recibido una atención especial en los últimos años [3][4]. En la Figura 1 se muestra el consumo global de aceites lubricantes en diferentes sectores.

Las diferentes tecnologías investigadas para convertir el aceite residual en combustible incluyen la pirólisis [5][6], la destilación al vacío [7] y la hidrogenación [8]. Mediante el proceso de pirólisis se rompen las grandes moléculas de aceite residual y permite obtener un combustible con propiedades similares a las del diesel comercial, lo que lo hace adecuado para ser usado en motores de encendido por compresión, solo o mezclado con diesel. La producción de combustibles alternativos a partir de aceites residuales no solamente disminuye el consumo de combustibles derivados del petróleo, sino que también protege el medio ambiente de productos tóxicos y peligrosos [9] y reduce la emisión de gases de efecto invernadero [10].

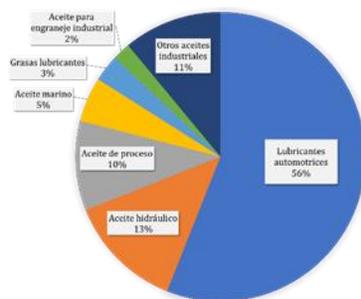


Figura 1. Porcentaje global del uso de diferentes lubricantes [1].

En este trabajo se presentan los resultados obtenidos del proceso de pirólisis de aceite lubricante residual. El proceso de pirólisis se desarrolla en un equipo preliminar donde se obtienen productos líquidos a temperatura de 390 °C y 420 °C, a una velocidad de calentamiento constante de 22.5 °C/min.

Materiales y Métodos

Equipo

El equipo utilizado está compuesto por tres secciones, como se muestra en la Figura 2, estas son:

Calentamiento. Se pueden describir tres elementos en la sección de calentamiento: una pared cilíndrica aislante compuesta de dos láminas metálicas de acero comercial que son separadas por una capa de cerámico refractario, las resistencias eléctricas dispuestas para un matraz de destilación a 110 V y 9.5 A, y un matraz de destilación de fondo redondo con capacidad de 250 mL que cuenta con un tapón de teflón perforado para dos termopares.

Condensación. Está constituida principalmente por un condensador recto de 40 cm de longitud fabricado en acero comercial, en disposición de contraflujo. El líquido refrigerante es agua, que ingresa por el lado externo del intercambiador a un caudal de 3.3 LPM con depósito de agua de 16 L.

Recuperación. Está compuesta por una probeta de vidrio graduada, de base plástica, con capacidad de 250 ± 2 mL.

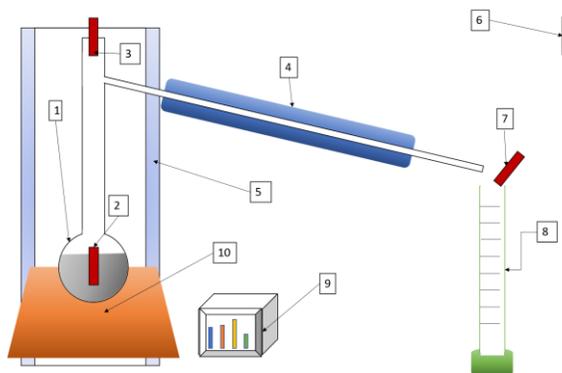


Figura 2. Esquema del montaje seleccionado para el desarrollo del proyecto. (1. Balón de destilación, 2. Termopar de líquido, 3. Termopar de vapor, 4. Condensador concéntrico, 5. Pared aislante cilíndrica, 6. Sensor temperatura ambiente, 7. Sensor temperatura producto, 8. Probeta forma alta Clase B, 9. Caja de control, 10. Manto térmico).

Para el control y monitoreo de las condiciones de trabajo del equipo durante la experimentación, se usan dos tipos de sensores térmicos, estos son: Resistor térmico DS18B20 que permite lecturas entre $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$ con una precisión de $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ [11], y un módulo Max 6675 con termopar tipo K que permite lecturas entre los 0 y $+1024\text{ }^{\circ}\text{C}$ con una precisión de $\pm 0.25\text{ }^{\circ}\text{C}$ [12], ambos con protección a líquidos y sencillas metodologías de implementación en conjunto con tarjetas de adquisición y control de datos Arduino. Los sensores térmicos fueron dispuestos como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Disposición de los sensores térmicos.

Temperatura medida	Lugar de medición	Sensor térmico
Ambiente	Se monitorea la temperatura del agua que alimenta al condensador en el depósito de líquido refrigerante.	DS18B20
Producto líquido	Se monitorea la temperatura del líquido producto de la condensación dentro de la probeta.	DS18B20
Aceite usado de motor	Se monitorea la temperatura del aceite usado líquido dentro del matraz de destilación.	Max 6675
Vapor de aceite usado de motor	Se monitorea la temperatura del vapor de aceite usado dentro del matraz de destilación a la altura del desprendimiento lateral.	Max 6675

Adicional a estas condiciones del equipo, la experimentación se realiza a una presión atmosférica de 76 kPa y a una temperatura ambiente promedio de $18\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Materiales

El aceite utilizado en este trabajo es un residuo de aceite lubricante 20W50. Este residuo presenta un color oscuro similar al negro del crudo, se encuentra en estado líquido de viscosidad media y un olor característico del aceite lubricante usado, no soluble en agua y con presencia de partículas sólidas granulares que se decantan en los recipientes del residuo.



Figura 3. Muestra del aceite lubricante usado 20W50.

Metodología

Para el desarrollo de una prueba se realiza inicialmente el pesaje del matraz de destilación y de la probeta vacíos, se introducen esferas de vidrio en el matraz y se pesa de nuevo. Posteriormente, se procede a verter $110 \pm 2\text{ mL}$ respectivamente pesados del aceite lubricante usado dentro del matraz. Finalmente, se acopla el matraz al condensador. Las condiciones de temperatura máxima y velocidad de calentamiento de líquido son reguladas mediante el sistema de control haciendo uso de la instrumentación previamente descrita.

Establecidos los parámetros se procede al inicio del calentamiento, mediante la visualización de las temperaturas en tiempo real, y en comparativa con los datos característicos del equipo, es monitoreada la prueba. Así son previstos los tiempos de la evaporación del aceite usado, condensación de gases para la obtención de productos líquidos y carbonización de los residuos en el matraz de destilación. Bajo estas condiciones, se da por finalizada la prueba por cualquiera de dos posibles estados: tener producto líquido con el 95% del volumen inicial, o alcanzar una tendencia decreciente de obtención de producto líquido igual o menor a 1 mL/min. Esta segunda condición requiere de un procedimiento adicional, el cual consiste en retirar el producto obtenido y aumentar la temperatura para lograr carbonizar la materia prima restante.

Diseño de experimentos

El diseño de experimentos usado para esta prueba consiste en variar la temperatura límite del líquido (390 °C o 420 °C) a una máxima potencia eléctrica; estipulando este experimento a un diseño factorial 2¹. Las condiciones experimentales son presentadas en la Tabla 2.

Tabla 2. Parámetros experimentales.

Parámetros fijos	
Cantidad de muestra [mL]	110 ± 2
Velocidad de calentamiento [°C/min]	22.9 ± 0.25
Temperatura de condensación [°C]	18 ± 0.5
Potencia eléctrica [W]	1200 ± 1
Parámetros variable	
Temperatura máxima de líquido ± 0.25 [°C]	
Nivel (-) P-390	Nivel (+) P-420
390	420

Caracterización de los productos

Terminada una prueba, la recolección de los productos se realiza en dos partes. Productos líquidos: Son los productos obtenidos de la destilación, son colectados en la probeta donde se registra su volumen. Residuos sólidos: Son obtenidos de la carbonización de la materia prima en el matraz de destilación, terminada la prueba se realiza el pesaje nuevamente del matraz de destilación que contiene las esferas de vidrio junto con las cenizas de la materia prima; posteriormente, se procede a separar las esferas de vidrio de las cenizas mediante un tamiz metálico de 0.5-2 mm. Los rendimientos líquidos, gases y residuos son calculados de acuerdo con las ecuaciones (1), (2) y (3). Además, las ecuaciones (4) y (5) se usan para la determinación de la densidad. Por otro lado, mediante la instrumentación de la caja de control, haciendo uso potenciómetro se registra el dato de la potencia usada durante una prueba en kW/hora.

$$\% \eta_{pl} = \frac{m_{pl} - m_{pv}}{m_{mea} - m_{me}} * 100 \quad (1)$$

$$\% \eta_{ps} = \frac{m_{mec} - m_{me}}{m_{mea} - m_{me}} * 100 \quad (2)$$

$$\% \eta_{pg} = 100 - \% \eta_{ps} - \% \eta_{pl} - \left(\frac{m_{rr} - m_{rv}}{m_{mea} - m_{me}} * 100 \right) \quad (3)$$

$$\rho_a = \frac{m_{mea} - m_{me}}{V_a} \quad (4)$$

$$\rho_{pl} = \frac{m_{pl} - m_{pv}}{V_{pl}} \quad (5)$$

En estas ecuaciones:

m_{mv} : Masa del matraz de destilación vacío.

V_a : Volumen del aceite usado.

m_{me} : Masa del matraz de destilación con esferas.

V_{pl} : Volumen de los productos líquidos.

m_{mea} : Masa del matraz de destilación con esferas y aceite usado.

$\% \eta_{pl}$: Porcentaje de rendimiento de productos líquidos en masa.

m_{pv} : Masa de la probeta de vidrio vacía.

$\% \eta_{ps}$: Porcentaje de rendimiento de productos sólidos (cenizas) en masa.

m_{pl} : Masa de probeta de vidrio con productos líquidos.

$\% \eta_{pg}$: Porcentaje de rendimiento de productos gaseosos (gases no condensables) en masa.

m_{mec} : Masa del matraz de destilación con esferas y cenizas.

ρ_{pl} : Densidad de los productos líquidos.

m_{rv} : Masa del recipiente para residuos vacío.

ρ_a : Densidad del aceite usado.

m_{rr} : Masa del recipiente para residuos con residuos.

El análisis de composición efectuado a los productos líquidos se desarrolla por medio de un cromatógrafo VARIAN 450 GC, usando como patrón el estándar de alcanos C7-C30 suministrado por Supelco, en una columna de 100 m x 0.5 μ m (id) x 0.5 nm, un Split ratio de 4 a una temperatura de 280 °C, un detector de flama ionizante (FID) a una temperatura de 280 °C. También se determina el poder calorífico de acuerdo con la ASTM D 240 en una bomba calorimétrica IKA C 6000.

Resultados

Caracterización de aceite residual

Las propiedades encontradas en el aceite usado de motor son comparadas con las dispuestas en la hoja de especificaciones del aceite virgen [13], y presentadas en la Tabla 3. Estas muestran una disminución en la densidad, la viscosidad a 40 °C disminuye en un 10.5 % y a 100 °C aumenta en un 33.7 % afectando el índice de viscosidad de 141 a 220.

Tabla 3. Propiedades del aceite virgen y usado.

Propiedad	Virgen	Usado	Estándar
Gravedad específica*	0.880	0.867	ASTM D1298 [14]
Viscosidad cinemática a 40 °C mm ² /s (u)	154	137.8	
Viscosidad cinemática a 100 °C mm ² /s (u)	19	25.4	ASTM D445 [15]
Índice de viscosidad**	141	220	

*La gravedad específica es determinada con una densidad de referencia del agua a 4 °C de 1000 kg/m³

**El índice de viscosidad es calculado bajo las especificaciones de la normativa DIN 2909 [16]

Curva de calentamiento y conversión

El comportamiento de la temperatura del líquido durante las pruebas realizadas es presentado en la Figura 4, el ajuste del gráfico muestra las curvas promedio de calentamiento para cada experimento con su respectiva replica, donde se observa la desviación estándar para cada curva. Esta figura muestra el comportamiento repetible de la velocidad de calentamiento obtenida en el equipo en la sección transitoria. Por otro lado, el comportamiento periódico en la sección estacionaria de las pruebas, producto del encendido y apagado de las resistencias debido al control por límite de temperatura y la inercia térmica. Finalmente, la necesidad en el experimento a 390 °C de mayor tiempo de prueba para alcanzar las condiciones de finalización.

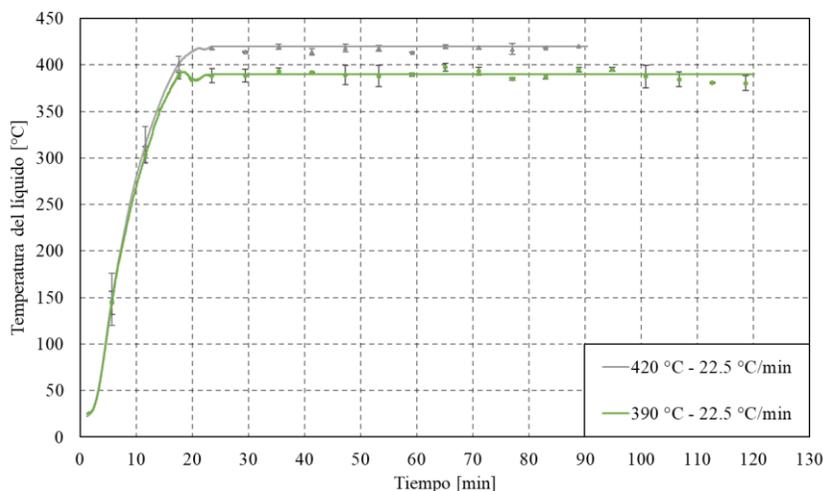


Figura 4. Curvas de calentamiento del aceite usado 20W50 con temperaturas límite de 390 °C y 450 °C.

Otra de las variables monitoreada es el consumo de energía eléctrica como se muestra en la Figura 5, el consumo de energía eléctrica es muy similar entre cada par de pruebas con las mismas variables experimentales. Debido a la necesidad de más tiempo para la finalización del experimento a 390 °C, observada en la Figura 4, se tiene también un mayor consumo energético, para P-390 1756 ± 21.5 kW/h y para P-420 de 1467 ± 8 kW/h.

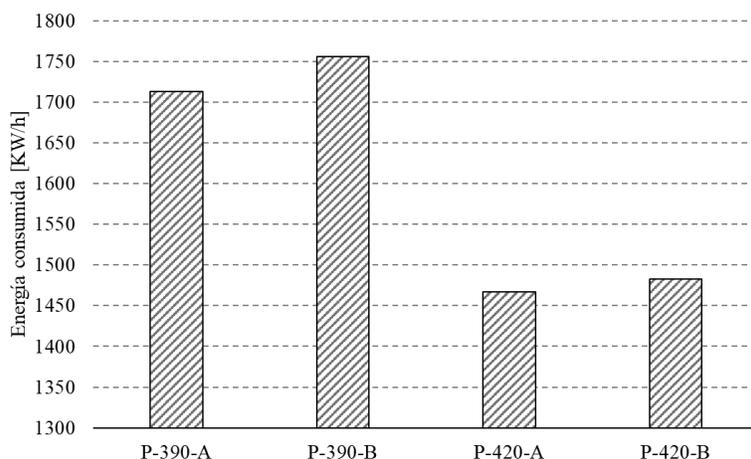


Figura 5. Curvas de conversión del aceite usado 20W50 para cada prueba realizada.

Caracterización del producto líquido

La Figura 6 muestra los diversos productos obtenidos: líquidos, sólidos y gases no condensables. El comportamiento es similar en los productos sólidos variando entre 1 a 3 % y gaseoso variando de 6 a 7%, independiente de la temperatura. Consecuencia de una tendencia constante en el productos sólidos y gaseosos, los productos de mayor influencia y variabilidad serán los productos y residuos líquidos.

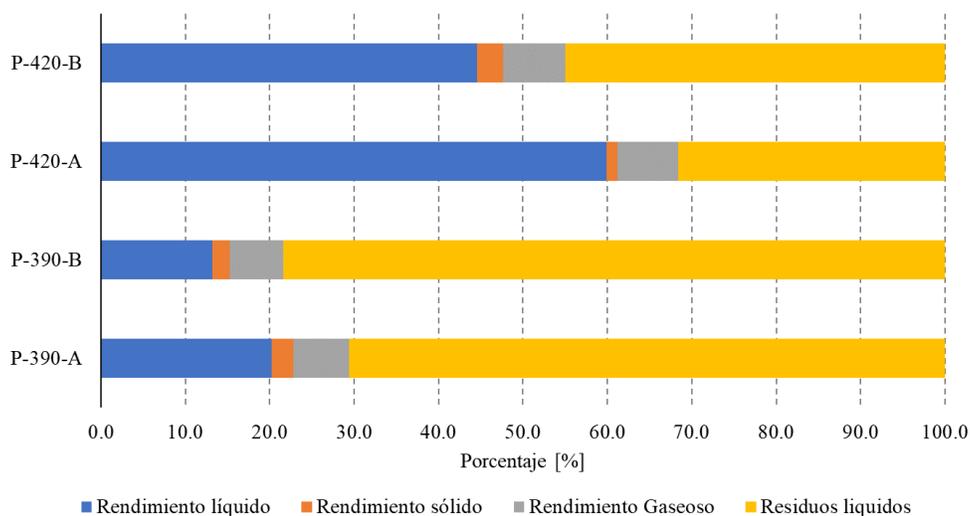


Figura 6. Rendimientos en masa para cada prueba realizada con aceite usado 20W50.

Las coloraciones de las pruebas muestran un color más cristalino para las de mayor temperatura como se observa en la Figura 7. Esto posiblemente consecuencia de los volátiles que se presentan en temperaturas superiores a los 390 °C e inferiores de los 420 °C.



Figura 7. Productos líquidos obtenidos.

En la Tabla 4 se presentan las propiedades y características de los productos líquidos obtenidos en la pirólisis. En esta tabla se observa que el valor de la gravedad específica se incrementa con el aumento de la temperatura de experimentación, mientras que el valor de la viscosidad tiene una variabilidad menor al 2%, y su valor se asemeja al de los combustibles de tipo hidrocarburos. El valor del poder calorífico es similar al de los combustibles comerciales (diesel y gasolina), para ambos experimentos.

Tabla 4. Propiedades y características de los productos líquidos.

Propiedad	Producto líquido				Estándar
	P 390-A	P 390-B	P 420-A	P 420-B	
Gravedad específica*	0.672	0.663	0.783	0.792	ASTM D1298 [14]
Viscosidad cinemática a 40 °C mm ² /s (ν)	1.12	1.09	1.22	1.26	ASTM D445 [15]
Poder calorífico [kJ/kg]	45 627	45 385	46 014	46 075	ASTM D 240 [17]

*La gravedad específica es determinada con una densidad de referencia del agua a 4 °C de 1000 kg/m³.

Conclusiones

En este trabajo se construyó y evaluó un prototipo a pequeña escala para la obtención preliminar de combustibles producto de la pirólisis de aceites lubricantes usados, donde se observó que las pruebas realizadas con temperatura máxima de 420 °C, en términos de rendimiento y costo energético, fueron más eficientes. Por otra parte, la cantidad de sólidos obtenidos se mantiene aproximadamente constante a lo largo de las diferentes configuraciones, presentándose una relación concluyente en esta variable de respuesta.

Agradecimientos

Se extiende un especial agradecimiento a la Universidad de Guanajuato, la cual hizo posible compartir, mediante su XXVI Veranos de la Ciencia, y a pesar de las circunstancias globales, un espacio de enriquecimiento y acompañamiento del conocimiento entorno a la investigación de variedad de problemáticas, en este caso, el reciclaje de residuos mediante pirólisis para la obtención de combustibles, bajo la dirección del Dr. José M. Riesco-Ávila. A su vez, al grupo de Investigación GIMUP y al programa de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Pamplona por hacer posible la cooperación entre ambas universidades.

Referencias

- [1] Doaa I. Osman, Sayed K. Attia, Afaf R. Taman. Recycling of used engine oil by different solvent, *Egyptian Journal of Petroleum* 27 (2018) 221-225.
- [2] R. Maceiras, V. Alfonsin, F.J. Morales. Recycling of waste engine oil for diesel production, *Waste Management* 60 (2017) 351-356.
- [3] G. Gabiña, L. Martinb, O. C. Basurkoc, M. Clemented, S. Aldeko, Z. Uriondo. Performance of marine diesel engine in propulsion mode with a waste oilbased alternative fuel, *Fuel* 235 (2019) 259-268.
- [4] G. Gabiña, L. Martinb, O. C. Basurkoc, M. Clemented, S. Aldeko, Z. Uriondo. Waste oil-based alternative fuels for marine diesel engines. *Fuel Processing Technology* 153 (2016) 28-36.
- [5] O. Arpa, R. Yumrutas, A. Demirbas. Production of diesel-like fuel from waste engine oil by pyrolytic distillation, *Applied Energy* 87 (2010) 122-127.
- [6] B. Van de Beld, E. Holle, J. Florijn. The use of pyrolysis oil and pyrolysis oil derived fuels in diesel engines for CHP applications, *Appl. Energy* 102 (2013), 190-197.
- [7] I. Hamawand, T. Yusaf, S. Rafat, S. Recycling of waste engine oils using a new washing agent. *Energies* 2 (2013), 1023-1049.
- [8] C. Tóth, D. Sági, J. Hancsók. Diesel fuel production by catalytic hydrogenation of light cycle oil and waste cooking oil containing gas oil. *Topics in Catalysis* 58 (2015) 948-960.
- [9] T. Bhaskar, M.A. Uddin, A. Muto, Y. Sakata, Y. Omura, K. Kimura, Y. Kawakami. Recycling of waste lubricant oil into chemical feedstock or fuel oil over supported iron oxide catalysts, *Fuel* 1 (2004) 9-15.
- [10] K. Naima, A. Liazid. Waste oils as alternative fuel for diesel engine: a review, *Journal of Petroleum Technology and Alternative Fuels* 4 (3) (2013) 30-43.
- [11] M. Inegrated, "DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer Data Sheet." <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf> (accessed Mar. 01, 2021).
- [12] M. Integrated, "MAX6675 Cold-Junction-Compensated K-Thermocoupleto-Digital Converter (0°C to +1024°C) Data Sheet." <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX6675.pdf> (accessed Mar. 01, 2021).
- [13] Mobil TM, "Mobil Special 15W-40 y 20W-50." <https://www.mobil.com/es-mx/passenger-vehicle-lube/pds/gl-xx-mobil-special-15w40-20w50> (accessed Jul. 19, 2021).
- [14] ASTM, "ASTM D1298-12b(2017) Método de prueba estándar para determinar la densidad, la densidad relativa o la gravedad API del petróleo crudo y los productos líquidos derivados del petróleo mediante el Método de densímetro." <https://www.astm.org/Standards/D1298-SP.htm> (accessed Jul. 19, 2021).
- [15] ASTM, "ASTM D445-17a Método de prueba estándar para determinación de la viscosidad cinemática de líquidos transparentes y opacos (y cálculo de la viscosidad dinámica)." <https://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/D445-17A-SP.htm> (accessed Jul. 19, 2021).
- [16] ISO, "ISO 2909:2002(en), Petroleum products — Calculation of viscosity index from kinematic viscosity," 2002. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:2909:ed-3:v1:en> (accessed Jul. 19, 2021).
- [17] ASTM, "ASTM D240 - 19 Standard Test Method for Heat of Combustion of Liquid Hydrocarbon Fuels by Bomb Calorimeter." <https://www.astm.org/Standards/D240.htm> (accessed Jul. 19, 2021).