



Universidad de Oviedo

ESCUELA SUPERIOR DE LA MARINA CIVIL DE GIJÓN

Trabajo Fin de Máster

Caracterización tribológica y de corrosión
al cobre de fluidos de transmisión con
distintas concentraciones de aditivos para
vehículos eléctricos

Para acceder al Título de Máster Universitario en

TECNOLOGÍAS MARINAS Y MANTENIMIENTO

Autor/a: Claudia Sanjurjo Muñiz

Tutor/a: Noelia Rivera Rellán

Rubén González Rodríguez

Julio – 2022

Resumen

Los vehículos eléctricos pueden incluir el motor eléctrico dentro de la caja de transmisión, estando en contacto con el fluido de transmisión. En este caso, el fluido debe cumplir una serie de requisitos como la compatibilidad eléctrica y de materiales, la mejora del rendimiento de refrigeración, etc. El uso de líquidos iónicos como aditivo lubricante puede afectar a la conductividad eléctrica y al comportamiento tribológico de este fluido. Este trabajo estudia la influencia de un líquido iónico de base de fósforo [P_{6,6,6,14}][BEHP] utilizado como aditivo al 1 y 3 % en peso sobre las propiedades mencionadas de un fluido de transmisión automática comercial. La adición del líquido iónico incrementó la conductividad eléctrica del fluido, pero la mezcla sigue presentando comportamiento disipativo. Además, el aditivo promueve la formación de películas límite ricas en fósforo, lo que se relaciona con la mejora de la función de antidesgaste.

El trabajo está dividido en 7 capítulos. El primero de ellos consta de una breve introducción. El segundo desarrolla el estado del arte de la tribología, el vehículo eléctrico y los líquidos iónicos. El tercero expone los materiales empleados y la metodología experimental realizada. El cuarto estudia los resultados obtenidos de los tres fluidos a lo largo de todo el proceso. El quinto desarrolla las conclusiones finales y discusión generadas a raíz de los resultados obtenidos. El sexto propone posibles líneas futuras a la vista de los resultados. Y el séptimo muestra toda la bibliografía empleada en este documento.

Palabras clave: Fluido de transmisión automática; conductividad eléctrica; vehículos eléctricos; líquido iónico; tribología.

Abstract

Electric vehicles can include the electric motor inside the transmission housing, putting in contact with the transmission fluid. In this case, the fluid must fulfil several requirements such as electrical and material compatibility, improved cooling performance, etc. The use of ionic liquids as a lubricant additive can affect the electrical conductivity and the tribological behavior of this fluid. This document studies the influence of a phosphonium-based ionic liquid ($[P_{6,6,6,14}] [BEHP]$) used as an additive at 1 and 3 wt% concentration on the mentioned properties of a commercial automatic transmission fluid. The addition of the ionic liquid increased the electrical conductivity of the fluid, but it continues to show dissipative behavior. In addition, the ionic liquid promotes the formation of a tribofilm rich in phosphorus, which is related to the improvement of the anti-wear function.

The work is divided into 7 chapters. The first one consists of a brief introduction. The second develops the state of the art of tribology, the electric vehicle and ionic liquids. The third exposes the materials used and the experimental procedure. The fourth studies the results obtained from the three fluids throughout the entire process. The fifth develops the final conclusions and discussion based on the results. The sixth proposes possible future lines in view of the results. Finally, the seventh shows all the bibliography used in this document.

Keywords: automatic transmission fluid; electrical conductivity; electric vehicles; ionic liquid; tribology

Índice

1.	Introducción	1
1.1	Objetivos	3
2.	Estado del arte	5
2.1.	Fundamentos de tribología	5
2.1.1.	Fricción	5
2.1.2.	Desgaste	6
2.1.3.	Lubricación	8
2.2.	El vehículo eléctrico (EV).....	10
2.2.1.	Clasificación del EV	11
2.2.2.	Fluidos de transmisión	14
2.2.3.	Requisitos de los fluidos para EV	14
2.2.4.	Diseños específicos de lubricantes para EV	16
2.3.	Líquidos iónicos.....	18
3.	Materiales y métodos.....	21
3.1.	Materiales.....	21
3.2.	Preparación de muestras.....	22
3.3.	Caracterización físico – química	23
3.3.1.	Ensayos de solubilidad, densidad y viscosidad.....	23
3.3.2.	Conductividad eléctrica.....	24
3.4.	Caracterización tribológica.....	25
3.4.1.	Ensayo de rodadura / deslizamiento	26
3.4.2.	Ensayo de deslizamiento alternativo.....	28
3.5.	Análisis superficial	30
3.5.1.	Volumen de desgaste	31
3.5.2.	Microscopio Electrónico	31
3.5.3.	Microscopio Raman	32
4.	Resultados	34

4.1.	Caracterización físico – química	34
4.1.1.	Ensayos densidad y viscosidad	34
4.1.2.	Conductividad eléctrica.....	35
4.2.	Caracterización tribológica.....	37
4.2.1.	Ensayo rodadura / deslizamiento.....	37
4.2.2.	Ensayo de deslizamiento alternativo.....	39
4.3.	Análisis superficial	40
4.3.1.	Volumen de desgaste	40
4.3.2.	Microscopio Electrónico	41
4.3.3.	Microscopio Raman	43
5.	Conclusiones	46
6.	Líneas futuras.....	47
7.	Bibliografía	48

Índice Figuras

Figura 1: Consumo mundial de energía procedente de combustibles fósiles (% total) [7].	2
Figura 2: Comparativa de las emisiones de un vehículo de combustión contra el eléctrico, desde la fabricación hasta el final de su vida útil [9].	3
Figura 3: Fuerza de fricción (o rozamiento FR) en movimiento de rodadura (izquierda) y deslizamiento (derecha).	6
Figura 4: Mecanismos de desgaste: a) Adhesivo; b) Abrasivo; c) Fatiga; d) Fretting; e) Corrosión; f) Erosión [17].	8
Figura 5: Curva de Stribeck y los diferentes regímenes de lubricación [18].	10
Figura 6: Esquemas de funcionamiento: a) Vehículo Híbrido; b) Vehículo Híbrido Enchufable; c) Vehículo de Autonomía Extendida; d) Vehículo Eléctrico Puro.	13
Figura 7: Relación autonomía - contaminación de los diferentes sistemas eléctricos.	13
Figura 8: Conductividad eléctrica en ATF [31].	15
Figura 9: Posibles localizaciones del EM en vehículos híbridos [33].	16
Figura 10: Número de publicaciones científicas referidas a los IL entre 2000 – 2020 según Web of Science.	19
Figura 11: Balanza de precisión RADWAG.	22
Figura 12: Mezclador Kakuhunter Sk-300 SII.	23
Figura 13: Viscosímetro Stabinger SVM 3001.	24
Figura 14: Conductímetro eléctrico digital Emcee 1153 [43].	25
Figura 15: Baño térmico sobre placa calefactora para las medidas de conductividad.	25
Figura 16: Probetas de ensayo de la MTM: Disco Estándar (Izquierda), Bola Perforada (Derecha).	26
Figura 17: Equipo MTM – 2 Mini Traction Machine [44].	27

Figura 18: Descripción gráfica del proceso de montaje de probetas en MTM: 1) Colocación disco; 2) Tuerca de sujeción y apriete; 3) Colocación de bola perforada y tuerca; 4) Apriete de la bola perforada; 5) Administración de aceite lubricante; 6) Bola en contacto con el aceite; 7) Colocación cubiertas y seguro.	28
Figura 19: Equipo UMT- 3.	29
Figura 20: Probetas tras ensayo en la UMT.	29
Figura 21: Descripción gráfica del proceso de montaje de probetas en UMT: 1) Estructura sin montar; 2) Estructura inferior montada y con disco; 3) Suministro de aceite lubricante; 4) Colocación del soporte de la bola; 5) Cubierta hermética; 6) Estructura montada.	30
Figura 22: Microscopio Leica (Izquierda) y colocación de disco (Derecha).	31
Figura 23: Microscopio electrónico de barrido [45].	32
Figura 24 : Microscopio confocal Raman.....	33
Figura 25: Variación de la viscosidad dinámica en función de la temperatura.....	34
Figura 26: Variación de la densidad en función de la temperatura-	35
Figura 27: Variación de la conductividad eléctrica en función de la temperatura.....	36
Figura 28: Comprobación del comportamiento disipativo de los diferentes aceites.	36
Figura 29: Gráfico de Walden.....	37
Figura 30: Curvas de Stribeck de los diferentes lubricantes.	38
Figura 31: Curvas de tracción de los diferentes lubricantes.....	39
Figura 32: Coeficiente de fricción durante el test tribológico y su valor medio y desviación.....	40
Figura 33: Volumen de desgaste tras los ensayos de fricción en UMT – 3.....	41
Figura 34: Espectro Raman de la huella de desgaste.	45

Índice Tablas

Tabla 1: Coches eléctricos con mayor autonomía del mercado [24]– [28].	11
Tabla 2: Propiedades de los aceites base de los Grupos I, II, II, IV, V [36].	17
Tabla 3: Concentración y funciones de los aditivos más comunes en ATF [37,38].	18
Tabla 4: Propiedades del aceite base de ATF [42].	21
Tabla 5: Estructura química, fórmula empírica, y propiedades del IL.....	21
Tabla 6: Imágenes del SEM de la superficie desgastada después de las pruebas de fricción y desgaste.	42
Tabla 7: Análisis EDS de la huella de desgaste del disco.	43

1. Introducción

En el año 1824, la científica Joseph Fourier calculó que la superficie de la Tierra sería 15 °C más fría sin la presencia de la atmósfera, dando a conocer así el efecto invernadero que hace posible la vida en la Tierra [1].

A pesar de que durante miles de años los niveles de gases efecto invernadero (GEI) se han mantenido constantes, en las últimas décadas se ha disparado su emisión a la atmosfera, producto de la evolución industrial por el ser humano [2]. A través del abuso de combustibles fósiles y otras fuentes, la sociedad ha potenciado el efecto invernadero, lo que ha producido un calentamiento progresivo del planeta directamente proporcional a las emisiones de GEI [1]. Esto se traduce en un aumento de la temperatura de los océanos y deshielo de los polos, desencadenante del aumento del nivel del mar. Las consecuencias directas de estos sucesos comienzan a salir a la luz en forma de cambios importantes de disponibilidad de agua para cualquier tipo de consumo, problemática de producción de alimentos y encarecimiento del nivel de vida; además de cambios en las corrientes de circulación en los océanos, desaparición de especies, etc [3]. También ha supuesto un cambio en los climas propiciando la violencia de los fenómenos meteorológicos con golpes de calor más intensos, huracanes de mayor escala o tormentas de mayor magnitud [3].

En 2021 se llevó a cabo en Glasgow (Reino Unido) la 26^o Conferencia de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (COP26 de Glasgow). En ella se actualizó el objetivo de limitar el aumento de la temperatura mundial, asegurando que el calentamiento global no supere 1,5 °C frente a los 2 °C acordados en el Acuerdo de París de 2015 (COP21). Además, se reconoció la necesidad de acelerar las acciones de reducción de emisiones de GEI globales en un 45 % para 2030 respecto a los niveles de 2010, comprometiéndose a reducir el carbón como fuente de energía y ayudar a minimizar la contribución de los combustibles fósiles [4].

Estos combustibles suponen la fuente principal del consumo de energía total a nivel mundial, a pesar de que la evolución de su aportación a sufrido grandes fluctuaciones. Como se observa en la Figura 1, a mediados del siglo XX se produce un descenso notable resultado de la crisis energética o “crisis petrolera” del 73, derivada del consumo masivo de petróleo durante la Segunda Guerra Mundial y el bloqueo de la OPEP (Organización de Países Exportadores de Petróleo) de suministro a los países occidentales [5,6]. En los últimos 30 años el consumo de estas

materias se ha mantenido relativamente constante rondando valores entorno al 80 – 82 % de la energía total consumida [7].

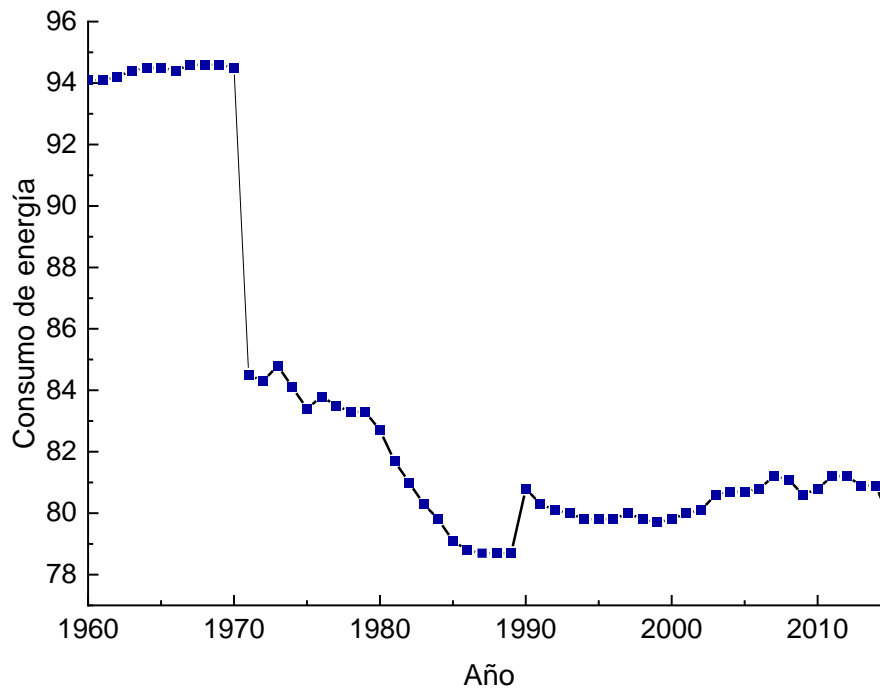


Figura 1: Consumo mundial de energía procedente de combustibles fósiles (% total) [7].

La demanda energética a nivel mundial sufrió un traspie en el año 2020, fruto de la pandemia por COVID – 19 y el confinamiento. Como consecuencia, las diferentes fuentes experimentaron caídas en su producción. El carbón, por ejemplo, sufrió una caída del 4,5 % respecto al año anterior, similar al petróleo y derivados con un 6,1 y 9 % respectivamente. En menor medida fue afectada la producción de gas con un descenso leve de 2,5 % en comparación con 2019 [8]. Actualmente los esfuerzos invertidos para combatir el cambio climático se han visto truncados tras la vuelta a la vida pre pandémica y la reciente guerra entre Rusia y Ucrania, que han disparado el consumo de combustibles fósiles ayudando así al aumento de las emisiones.

Los grandes grupos emisores de GEI pueden ser distribuidos en cuatro categorías generales: procedente de residuos, de procesos agrícolas, de procesos industriales, o de procesos energéticos. Según el informe publicado por la Secretaría Confederal de Medio Ambiente y Movilidad de CCOO sobre la evolución de las emisiones de GEI en España, alrededor del 76 % de emisiones de los últimos 30 años han pertenecido al sector de procesos energéticos, dentro del cual destaca el sector automovilístico dominando con un 40 % el CO₂ equivalente emitido [2].

España, al igual que los países presentes en la COP26, marcó como objetivo una reducción de emisiones de GEI del 45 % para 2030. Una de las alternativas principales a nivel mundial para el cumplimiento del mismo es potenciar el uso del vehículo eléctrico (siglas en inglés: EV). En comparación con los vehículos con motor de combustión interna, el EV consigue reducir la difusión de CO₂ equivalente en más de un 50 % (Figura 2) a lo largo de toda su vida útil, y cero emisiones durante su funcionamiento [9].

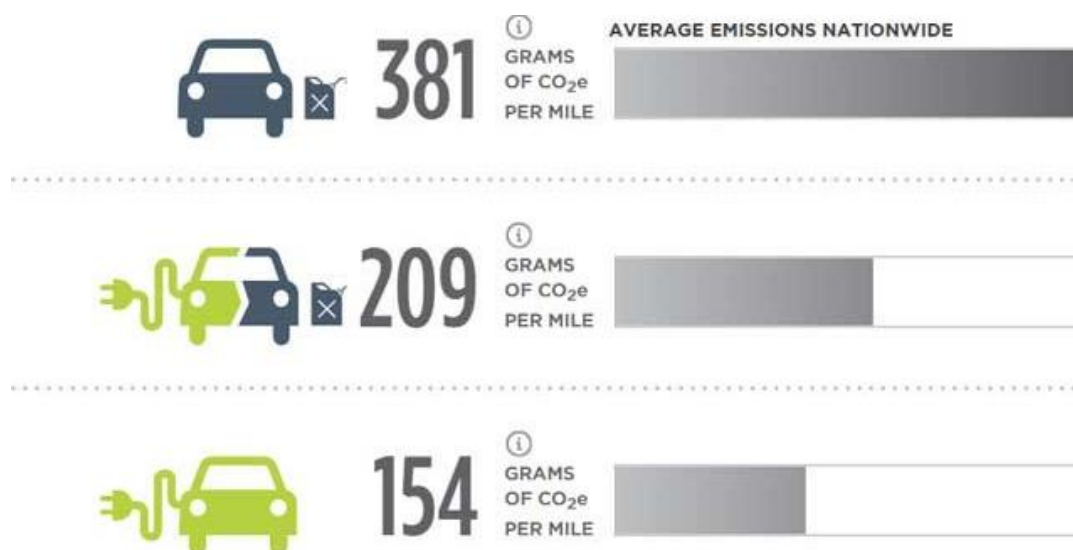


Figura 2: Comparativa de las emisiones de un vehículo de combustión contra el eléctrico, desde la fabricación hasta el final de su vida útil [9].

En el mercado pueden encontrarse diferentes tipos de vehículos eléctricos dependiendo del modo de carga empleado, entre los que se encuentran los vehículos eléctricos híbridos. Algunas de sus disposiciones estructurales incluyen el motor eléctrico (siglas en inglés: EM) en contacto con el fluido de transmisión, que debe cumplir numerosos requisitos de compatibilidad con el motor. Una mala formulación del fluido de transmisión conlleva graves consecuencias que derivan a un mal funcionamiento y pérdida de eficiencia. Por ello, es de gran interés el estudio y optimización de sus propiedades a las necesidades demandadas por los EM.

1.1 Objetivos

El **objetivo general** de este trabajo es *estudiar la factibilidad del uso del líquido iónico trihexyltetradecylphosphonium bis (2 – ethylhexyl) phosphate ([P_{6,6,6,14}][BEHP]) como aditivo en distintas concentraciones (1 y 3 %) de un ATF comercial.*

Para abordar este objetivo general se plantearon los siguientes **objetivos específicos**:

- Preparación de las mezclas del aceite base y líquido iónico al 1 y 3 % en peso.
- Determinar la densidad, viscosidad y solubilidad de las mezclas.
- Evaluar la influencia en el comportamiento tribológico (coeficiente de fricción y desgaste) de la utilización del líquido iónico seleccionado como aditivo en un fluido de transmisión automática.
- Determinar la influencia del líquido iónico y su concentración en los resultados tribológicos.
- Analizar cualitativamente la interacción del líquido iónico con la superficie a lubricar.

2. Estado del arte

2.1. Fundamentos de tribología

Se denomina Tribología, del griego “tribos” (rozar), a la ciencia encargada de estudiar los fenómenos existentes durante el contacto entre superficies sólidas en movimiento [10]. Fue definida por primera vez en 1966 con el Informe Jost, fruto del trabajo del Comité del Departamento Británico de Educación y Ciencia, donde se estipuló que la vida útil y la eficiencia energética de la maquinaria industrial se encuentran altamente influenciados por los principales fenómenos interfaciales, tales como fricción, lubricación y desgaste [11].

Este hecho ha sido respaldado en estudios posteriores, donde se ha estimado que las pérdidas anuales debidas al desgaste suponen un 3 % del producto nacional bruto [10]. Además, se pone el foco en el alto consumo de energía producido al intentar vencer fenómenos de fricción en áreas del transporte, la industria o la electricidad [12]. Por ello, esta ciencia se centra en el estudio de la prevención de los fenómenos de fricción y desgaste o su reducción, a través de mejoras en la formulación de lubricantes [13,14].

2.1.1. Fricción

Según la definición de ASTM D1894, se entiende por fricción a la resistencia al movimiento entre dos cuerpos en contacto [15]. Además, no se trata de una propiedad del material, sino que depende de las propiedades superficiales y/o interacciones mecánicas – moleculares entre los cuerpos tales como [16]:

- La rugosidad de las superficies de ambos cuerpos.
- La adhesión (causa principal de fricción entre metales).
- Presencia de posibles partículas libres.
- Las capas contaminantes que reducen considerablemente la fuerza de fricción porque se debilita la adhesión.

Este fenómeno aparece en toda clase de movimientos que impliquen deslizamiento o rodadura, sin ser mutuamente excluyentes [13]. En la Figura 3 se muestran los dos sistemas de rodadura y deslizamiento, donde se incluyen los siguientes parámetros: carga aplicada (W), fuerza de reacción a la carga con

dirección normal al movimiento (N), fuerza de fricción o rozamiento (F_R) y fuerza tangencial de igual magnitud que F_R , pero sentido opuesto para que se produzca el movimiento (F).

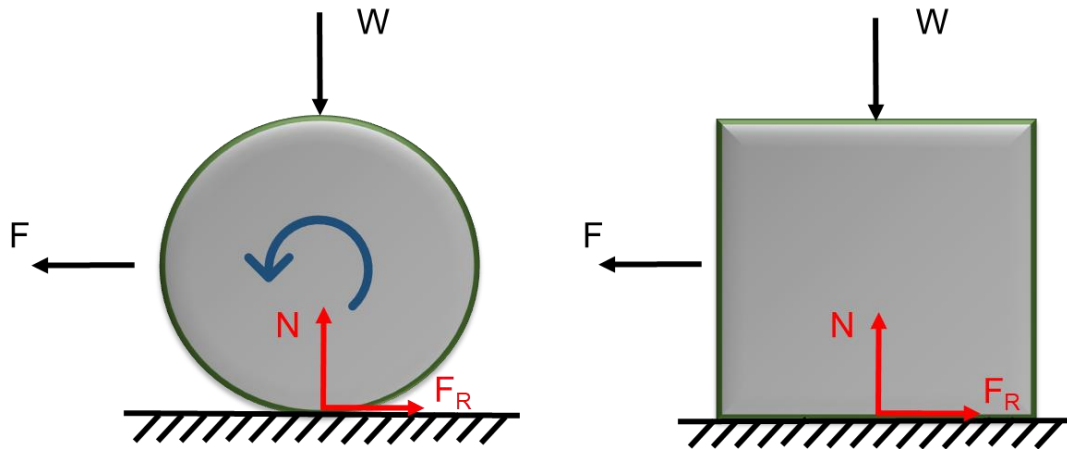


Figura 3: Fuerza de fricción (o rozamiento F_R) en movimiento de rodadura (izquierda) y deslizamiento (derecha).

La fricción derivada de rodadura se restringe a elementos de forma “casi” perfecta y rugosidad superficial (R_a) muy pequeña [16]. Por otro lado, para el estudio de la fricción por deslizamiento se formularon un total de tres leyes empíricas, dos en 1699 por Amontons y una tercera en 1785 de la mano de Coulumb [14]:

1. F_R es proporcional a la fuerza normal.
2. F_R es independiente del área aparente de contacto.
3. F_R es independiente de la velocidad.

Para describir la magnitud de la fuerza de fricción generada se hace uso del coeficiente de fricción (o coeficiente de rozamiento μ), obtenido a partir de la Ecuación 1:

$$\mu = \frac{F_R}{N} = \frac{F_R}{W} \quad (1)$$

El rango de valores posibles del coeficiente de fricción puede oscilar entre 0,001 a 10, siendo los más habituales en sistemas de deslizamiento de 0,1 a 1.

2.1.2. Desgaste

Se define el desgaste como la pérdida de material, en la interfase de contacto entre dos cuerpos, cuando se hallan sometidos a una carga bajo un

movimiento relativo [10]. Entre los factores que favorecen el inicio y progreso de desgaste se encuentran:

- Falta de similitud de los materiales que friccionan (dureza, composición química o acabado superficial).
- Presencia de terceros cuerpos (partículas metálicas, óxidos, polvo, gas, vapores, etc).
- Condiciones de trabajo por encima de las que el fabricante señala como límite (carga o velocidad excesiva, y ausencia de lubricante).

Se ha demostrado que los fallos mecánicos derivados del desgaste de las superficies suponen el 75 % [13]. Este hecho pone el foco en la necesidad de disminuir al mínimo el desgaste con el fin de alargar la vida útil de los elementos mecánicos. Los diferentes mecanismos de desgaste existentes son:

Desgaste Adhesivo

Se produce cuando dos superficies deslizan una sobre la otra bajo presión. Se trata del segundo tipo de desgaste más habitual dentro de la industria (Figura 4 – a).

Desgaste Abrasivo

Consecuencia del deslizamiento de una superficie dura y rugosa, sobre otra relativamente más blanda. Es el mecanismo de desgaste de mayor frecuencia dentro de la industria (Figura 4 – b).

Desgaste por Fatiga

Resultado de esfuerzos de tracción y compresión, provocados por cargas cíclicas acumulativas. Provoca la aparición de fisuras superficiales, que evolucionan aumentando su tamaño y propagándose (Figura 4 – c). En el peor de los casos, se produce la rotura del material.

Desgaste por Fretting

Este desgaste se observa cuando las superficies, sometidas a presión, experimentan movimiento relativo oscilatorio de pequeña amplitud (Figura 4 – d).

Desgaste Corrosivo

Proceso en el que se producen reacciones químicas o electroquímicas del material con el medioambiente (principalmente por humedad), en combinación con algunos de los procesos mecánicos de desgaste existentes (Figura 4 – e).

Desgaste Erosivo

Pérdida de material producida por impactos repetitivos de partículas puntiagudas sobre la superficie de un sólido, resultando un desgaste de naturaleza análoga a la abrasión (Figura 4 – f).

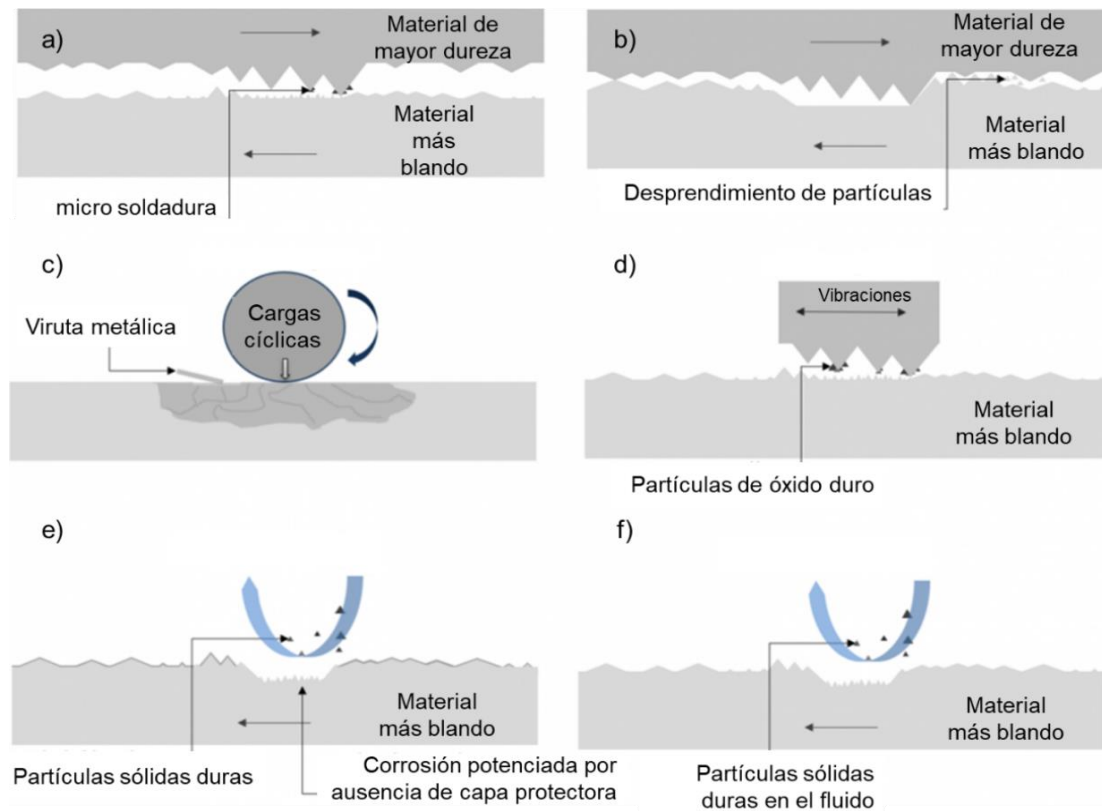


Figura 4: Mecanismos de desgaste: a) Adhesivo; b) Abrasivo; c) Fatiga; d) Fretting; e) Corrosión; f) Erosión [17].

2.1.3. Lubricación

La lubricación es el procedimiento utilizado para reducir el rozamiento generado entre las dos superficies de los sistemas descritos anteriormente. Sus dos funciones principales son reducir la fricción y atenuar el desgaste, evitando el contacto directo entre ambas superficies. Pero también deben cumplir otras funciones tales como [10]:

- Ayudar a disipar el calor generado por la fricción.
- Proteger contra la oxidación y la corrosión.
- Limpiar y arrastrar las partículas contaminantes.
- Contribuir a la amortiguación de ruidos.
- Aislar y proteger contra la suciedad del medio.
- Transmitir potencia.

Los lubricantes pueden clasificarse en función del grado de separación que el fluido establece entre las superficies deslizantes (régimenes), que se encuentran recogidas en la curva de Stribeck del fluido (Figura 5):

Lubricación Hidrodinámica (siglas en inglés: HD)

El espesor de la película de lubricante entre las dos superficies es mayor que la suma de las rugosidades superficiales, evitando el contacto directo entre ellas. Este régimen es considerado “ideal”, puesto que disminuye la fricción y aumenta su protección contra el desgaste. Los coeficientes de fricción alcanzan valores muy bajos, dentro del rango 0,002 – 0,01 [10].

Lubricación Elastohidrodinámica (siglas en inglés: EHL)

Este tipo de lubricación es importante cuando el área de contacto entre las superficies es muy pequeña y las cargas unitarias elevadas. Se trata de un régimen donde tiene gran importancia la deformación elástica de las superficies en contacto y la variación de la viscosidad del lubricante respecto de la presión [14].

Lubricación Límite

El espesor de la película entre las dos superficies es menor que la suma de las rugosidades superficiales, provocando contactos locales extensos y continuos entre los cuerpos. Este régimen es propio en presencia de muy bajas velocidades relativas de deslizamiento o valores altos de carga unitaria. Los valores más habituales del coeficiente de fricción para este régimen se encuentran entre 0,05 y 0,2 [10].

Lubricación Mixta

El coeficiente de fricción adquiere valores intermedios entre el régimen de lubricación hidrodinámica y el régimen de lubricación límite, dentro del intervalo 0,004

- 0,1. Sus propiedades se caracterizan por adquirir condiciones de ambos regímenes.

Lubricación Hidrostática

La película de lubricación se forma por un fluido a presión colocado en la interfase de contacto entre ambas superficies. Suele emplearse cuando se trabaja a velocidades de deslizamiento bajas o arranque de mecanismos.



Figura 5: Curva de Stribeck y los diferentes regímenes de lubricación [18].

2.2. El vehículo eléctrico (EV)

La diferencia principal entre el EV y el de combustión reside en que el primero emplea el principio de inducción electromagnética para transformar energía eléctrica en mecánica. Este sistema de propulsión se caracteriza por ser de alta eficiencia de conversión energética en comparación con el motor de combustión interna [19]. Además, no genera gases de escape mientras están en funcionamiento, consiguiendo cero emisiones de CO₂ y NO₂ durante su uso. También es importante la reducción en los costes de mantenimiento gracias al diseño sencillo y compacto del vehículo que minimiza hasta en un 40 % el número de elementos del motor; elimina las averías ocasionadas por el sistema de combustión o problemas derivados del combustible (corrosión); así como ruidos y vibraciones, permitiendo viajar con mayor comodidad [20].

Por otro lado, esta tecnología lucha contra grandes retos en relación al sistema de batería. La principal limitación se encuentra en la autonomía del vehículo. Normalmente oscila entre 200 – 350 km con carga completa y tiempos de carga que

pueden estar entre 4 – 8 horas (incluida a carga rápida) [20]. Aunque ya se dispone de modelos de autonomías superiores a los 600 km, estos vehículos presentan precios de partida de compra por encima de los 50.000 €. Según el informe Observatorio DriveK sobre la búsqueda y compra de automóviles online, el precio medio de los coches nuevos comprados a lo largo del 2019 por la sociedad española fue de 23.500 €, por encima del precio medio en Asturias que no alcanzaría los 22.000 € [21]. Además, declara que solo un 2,2 % de los españoles estarían interesados en inversiones por encima de los 50.000 € a la hora de comprar un coche nuevo. Esto presenta un problema a la hora de potenciar el uso en la sociedad del EV, que se está intentando compensar mediante la adjudicación de subvenciones para la compra de este tipo de vehículos con planes como el Plan Moves III o el Plan Renove 2022 [22,23].

Las grandes novedades de 2022 fueron el El NIO ET7, (denominado el “*Tesla Chino*”) y el Mercedes Vision EQXX (prototipo), ambos capaces de alcanzar los 1.000 km. En abril de 2022 salieron de fábrica las primeras unidades del ET7 disponible en China a partir de 448.000 yuanes (unos 56.760 €), mientras que el EQXX ha sido presentado en sociedad y estará disponible próximamente [24,25] (Tabla 1).

Tabla 1: Coches eléctricos con mayor autonomía del mercado [24]–[28].

Vehículo	Autonomía hasta (km)	Tiempo de carga	Potencia hasta (kW)	Precio a partir de
Mercedes – Benz EQS	743	31 min	385	117.125 €
BMW iX	630	1 – 8 h	390	95.709 €
Tesla Model S	652	-	760	105.970 €
El NIO ET7	1000	-	653	56.760 €
Mercedes Vision EQXX	1000	-	150	-

2.2.1. Clasificación del EV

Los vehículos eléctricos pueden clasificarse en cuatro grandes grupos en función del tamaño y del modo de carga de la batería (o grado de electrificación): Vehículo híbrido (Figura 6– a), vehículo híbrido enchufable (Figura 6– b), vehículo de autonomía extendida (Figura 6– c) y vehículo eléctrico puro (Figura 6– d).

El *Vehículo Híbrido* (siglas en inglés: HEV) combina el motor de combustión interna como motor principal, con el EM como motor secundario. Cuando el sistema de baterías dispone de energía suficiente almacenada, el dispositivo funcionará en modo eléctrico hasta que llegue a su mínimo de carga. Alcanzado dicho mínimo, da paso al motor de combustión hasta que las baterías restablezcan la suficiente carga. Estas se recargan gracias a la recuperación de energía de la frenada mediante el empleo de frenada regenerativa, capaz de añadir un 6 % de la energía aportada por la carga del vehículo a través de la inercia de desaceleración [29]. La finalidad de esta configuración es disminuir las emisiones de GEI manteniendo la autonomía del motor convencional [30].

Por encima se tiene el *Vehículo Híbrido Enchufable* (siglas en inglés: PHEV) con baterías de capacidad diez veces superiores en comparación con los híbridos no enchufables. Debido al tamaño de las baterías, no es suficiente la energía recuperada de la frenada y precisan ser cargadas con conexión a la red eléctrica. Esto deriva en una menor dependencia del motor principal de combustión, favoreciendo aún más la reducción de emisiones en comparación con el HEV [30].

A diferencia de los sistemas híbridos, el *Vehículo de Autonomía Extendida* (siglas en inglés: E – REV) dispone el EM como motor principal del vehículo. La función del motor de combustión pasa a ser únicamente la alimentación de las baterías. Inicialmente las baterías de estos vehículos son cargadas con conexión a la red eléctrica y, cuando se excede su autonomía, entra en escena en modo “*Range Exterder*” que da paso a la recarga mediante el motor de combustión. Se trata del paso previo a la eliminación total de este [29].

Por último, el *Vehículo Eléctrico Puro* tanto por batería (siglas en inglés: BEV) como por celda de combustible (siglas en inglés: FCEV), se caracterizan por ser sistemas 100 % eléctricos (principal y único motor presente). Estas disposiciones eliminan por completo el empleo del motor de combustión, y precisan sistemas de acumulación de cargas de mayor capacidad que los sistemas anteriores (problemas de limitación de la autonomía) [29].

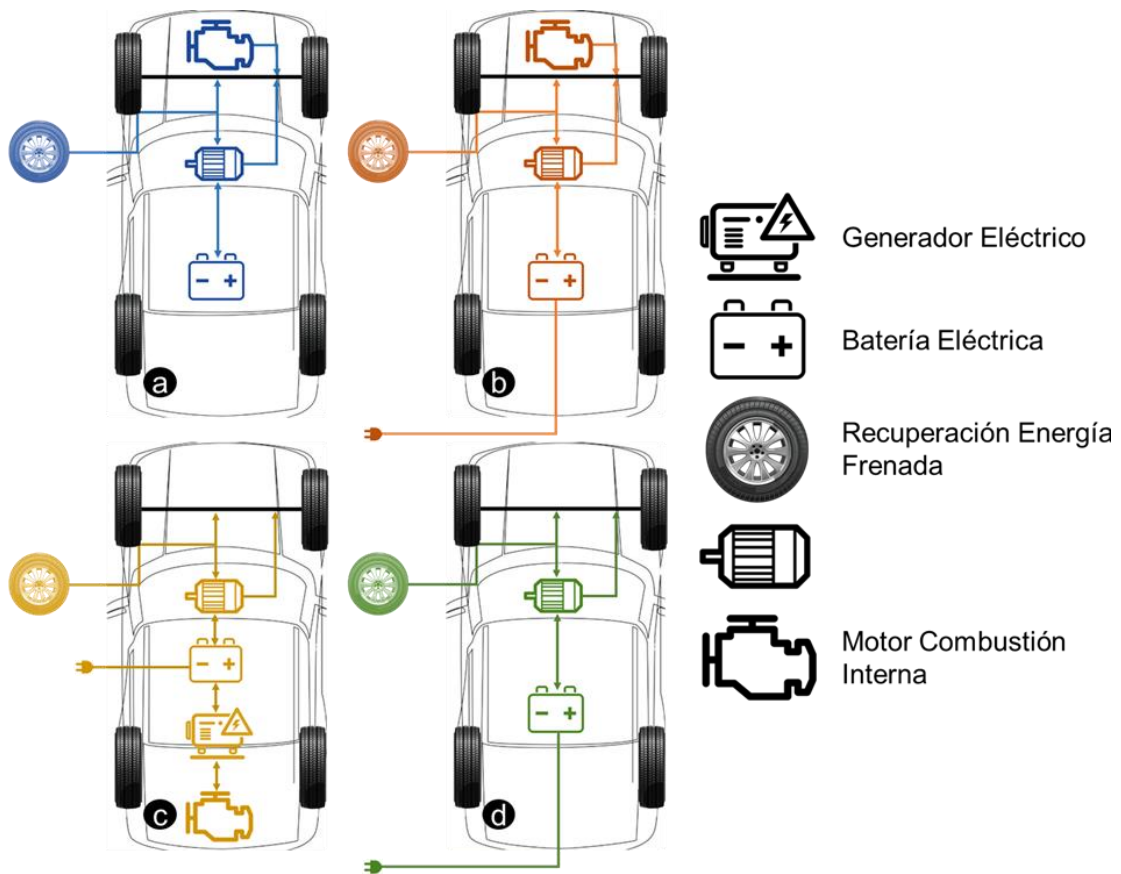


Figura 6: Esquemas de funcionamiento: a) Vehículo Híbrido; b) Vehículo Híbrido Enchufable; c) Vehículo de Autonomía Extendida; d) Vehículo Eléctrico Puro.

De forma esquemática se ilustra en la Figura 7 la relación autonomía – emisiones de las cuatro disposiciones mencionadas. A medida que se independiza el sistema del motor de combustión se consigue una mayor reducción de emisiones, pero el mayor empleo del EM implica la disminución de la autonomía del vehículo. Esto se debe a la necesidad de baterías de mayor capacidad y la problemática que presentan estos dispositivos en cuanto a almacenamiento y tiempos de carga.

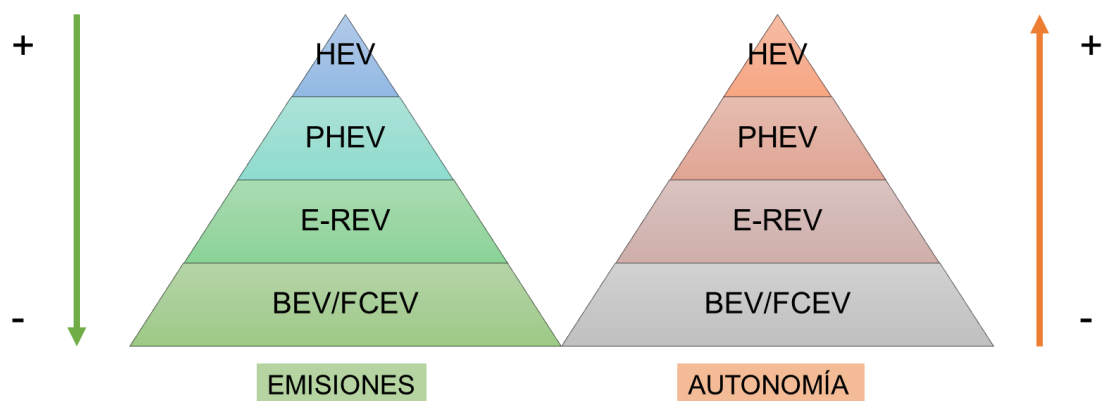


Figura 7: Relación autonomía - contaminación de los diferentes sistemas eléctricos.

2.2.2. Fluidos de transmisión

Se denomina fluido de transmisión a los aceites formulados para proteger engranajes, cojinetes y demás componentes dentro de la transmisión, ante la fricción generada de la transferencia de potencia entregada por el motor. La formulación más compleja dentro de los fluidos de transmisión se denomina “fluido de transmisión automática” o ATF (siglas en inglés de Automatic Transmission Fluid) que, además de reducir la fricción para evitar el desgaste como el resto de fluidos, debe presentar cierto nivel de fricción para poder embragar. Entre las características de rendimiento que deben cumplir se encuentran [14]:

- Función de lubricación.
- Transmisión de potencia.
- Protección contra oxidación y corrosión.
- Transferencia y disipación de calor.
- Propiedades de fricción óptimas.
- Compatibilidad del material del sello.
- Retención de propiedades antiespumantes.

Su formulación está compuesta normalmente por un 80 – 95 % de aceite base empleado para generar una buena estabilidad oxidativa y fluidez a baja temperatura; y un 5 – 20 % de un paquete de aditivos que puede contener hasta 20 compuestos diferentes, con la función de mejorar las propiedades acordes a las necesidades de uso.

2.2.3. Requisitos de los fluidos para EV

Las características que debe presentar un ATF para un EM difieren de las del motor convencional, dando lugar a múltiples problemas de compatibilidad que dejan al descubierto la necesidad de estudio, optimización y caracterización de fluidos específicos para EV.

Estos nuevos lubricantes deben satisfacer una serie de condiciones especiales derivadas de las altas intensidades de corriente, la existencia de fuertes campos magnéticos o las condiciones de elevada temperatura. Por ello, la nueva formulación debe tener en cuenta parámetros de control adicionales tales como la

conductividad eléctrica y magnética, la conductividad térmica, la corrosión al cobre y la compatibilidad de nuevos materiales.

En algunos casos un valor de conductividad eléctrica y magnética “alto” puede provocar un cortocircuito en el lubricante o en la carcasa. Por otro lado, un valor “bajo” puede resultar en la acumulación de carga desencadenando el deterioro de los diferentes elementos. Además, el avance de oxidación a causa de la formación de partículas polares en el aceite (la caída de la viscosidad potencia el transporte de estas partículas), origina el aumento de la conductividad.

Algunos fabricantes de lubricantes como Lubrizol han estudiado la variación de la conductividad eléctrica en función de la temperatura, diferenciando entre compuestos conductores, aislantes o disipativo [31]. Por las necesidades específicas de los EM, la formulación de los ATF debe aportar valores de conductividad eléctrica dentro de la región de elementos disipativos.

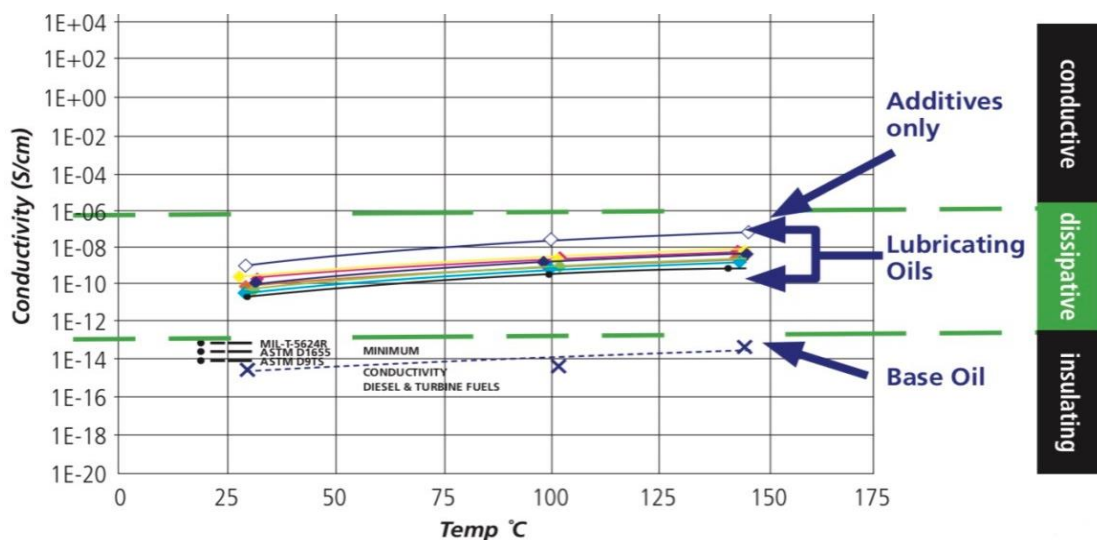


Figura 8: Conductividad eléctrica en ATF [31].

La conductividad térmica adquiere gran protagonismo debido a la tensión térmica en el lubricante generada por las altas intensidades de corriente y velocidades de rotación, que obstaculizan la disipación térmica. La corrosión del cobre es de los fenómenos más importantes ocasionados dentro del fluido, producto de la combinación de cobre y azufre presentes en el lubricante que reaccionan para dar sulfuro de cobre (CuS), perjudicial para el motor. La necesidad de realizar pruebas de compatibilidad de materiales se debe a que actualmente los EM están introduciendo nuevos materiales en sus cajas de cambios, algunos como materiales aislantes o simplemente por otros más ligeros con el fin de reducir el peso del mismo.

Un aspecto muy importante a tener en cuenta a la hora de diseñar estos fluidos para vehículos híbridos es la posición del EM. Aunque no existe una norma de acuerdo a la clasificación en función de la posición del EM, es comúnmente dividido en cinco categorías: P0, P1, P2, P3 y P4 (Figura 9) [32].

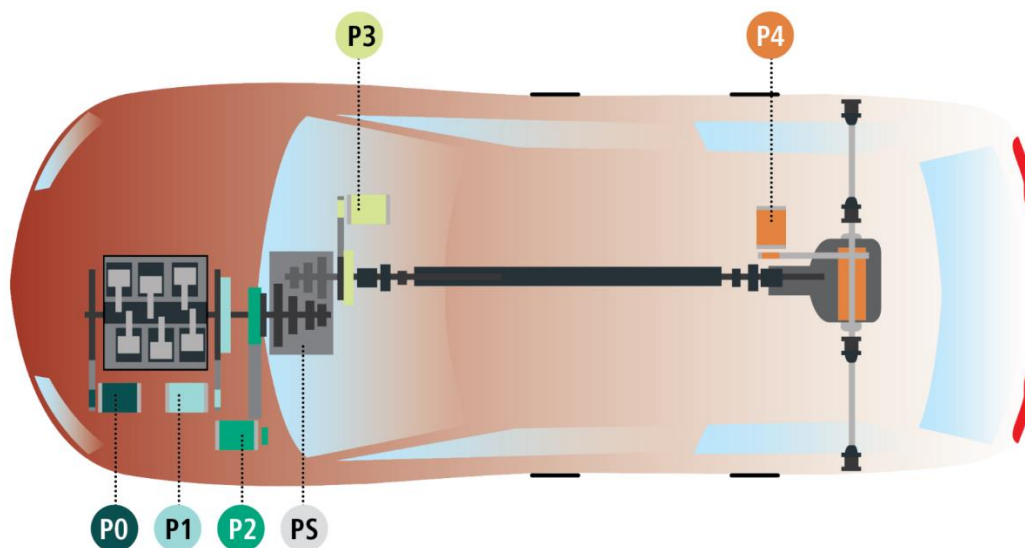


Figura 9: Posibles localizaciones del EM en vehículos híbridos [33].

P0 y P1 se emplean cuando el EM está ubicado antes o después del motor de combustión, separadas físicamente de la transmisión. En estas distribuciones los EM no están en contacto con el líquido de transmisión, pues no se encuentra localizado dentro de la caja de cambios. El fluido de transmisión no tendría que presentar requisitos adicionales a los de un motor convencional.

P2 y P3 son configuraciones donde el EM se encuentra antes o después de la caja de cambios. El motor podría estar físicamente integrado dentro de la carcasa, sumergido en el líquido de transmisión. Al existir contacto motor – fluido es importante formular líquidos que cumplan con los requisitos de compatibilidad eléctrica. Por último, se denomina P4 a la distribución en la cual el EM impulsa el eje trasero, y su localización implica una separación física de la transmisión [34].

2.2.4. Diseños específicos de lubricantes para EV

En 2018 salió al mercado el primer lubricante específico para EV de la mano de la compañía francesa Motul, con aceites para EM de vehículos híbridos y enchufables. Tras este gran paso, la empresa realizó a posteriori un lanzamiento masivo de diferentes productos específicos para EV [35]: fluidos para la lubricación de engranajes, productos multifuncionales, refrigerantes de batería, etc. Hoy en día otras empresas como Petronas Lubricants International o Shell se han unido al

mundo de los lubricantes para EV sacando al mercado fluidos de interés como refrigerantes de baterías y fluidos de transmisión.

Como se ha comentado anteriormente, estos fluidos deben cumplir dos funciones principales para garantizar un rendimiento adecuado de lubricación y fricción:

- Lubricar los rodamientos a velocidades altas (hasta 2.000 rpm) con la correspondiente prevención de formación de espuma y aireación.
- Presentar valores de conductividad térmica altos.

También es necesario tener en cuenta la compatibilidad de los compuestos presentes en el fluido con el bobinado de cobre y el recubrimiento de polímero, así como la capacidad de soportar altas corrientes. La bibliografía consultada recomienda el uso de (individualmente o mezclados) aceite mineral, sintético o vegetal como aceites base, otorgando mejor estabilidad a la oxidación los de tipo mineral y sintético. De acuerdo a las categorías definidas por el Instituto Americano del Petróleo, estas bases se dividen en cinco categorías o Grupos (Tabla 2) [36].

Tabla 2: Propiedades de los aceites base de los Grupos I, II, III, IV, V [36].

Grupo	Índice de viscosidad	Azufre (%)	Hidratos saturados (%)
I	80 – 120	>0,03	<90
II	80 – 120	<0,03	>90
III	>120	<0,03	>90
IV	Incluye polialfaolefinas (PAO)		
V	Incluye aceites excluidos en los Grupos I, II, III, IV		

Acorde a lo comentado anteriormente, es necesario cuidar la cantidad y tipo de aditivos empleados en las mezclas dependiendo de las propiedades finales deseadas. Las concentraciones que se manejan en el campo del EV difieren de las normalmente empleadas en las formulaciones convencionales de ATF. En la patente "*Method for controlling electrical conductivity of lubricating oils in electric vehicle powertrains*", el autor recomienda las siguientes concentraciones para los aditivos más empleados en este campo (Tabla 3) [37]:

Tabla 3: Concentración y funciones de los aditivos más comunes en ATF [37,38].

Aditivo	% peso aproximado	Función
Agente de sellado	0,01 – 2	Combatir fragilidad/agrietamiento de sellos debido a la elección del aceite base.
Antidesgaste	0,5 – 4	Protección de engranajes planetarios.
Antiespumante	0,001 – 0,1	Prevención de formación excesiva de espuma y entrada de aire.
Antioxidante	0,1 – 1,5	Control de espesamiento del aceite, prevenir formación de barniz y depósitos.
Depresor del punto de fluidez	0,01 – 1,5	Control de fluidez a bajas temperaturas.
Detergente	0,1 – 7,5	Limpieza, fricción, inhibición de la corrosión y desgaste.
Dispersante	0,1 – 10	Limpieza, dispersión de lodos, fricción y desgaste.
Inhibidor de corrosión	0,1 – 2	Prevención de corrosión, óxido, picaduras y desgastes.
Líquido Iónico	0,1 – 5	Diversos beneficios.
Modificador de fricción	0,1 – 1,5	Control de la durabilidad a fricción de los embragues.
Modificador de viscosidad	0,1 – 10	Mejora del índice de viscosidad y estabilidad a la cizalla.
Pasivante de metales	0,1 – 1,5	Proteger del óxido y la corrosión.

2.3. Líquidos iónicos

Los líquidos iónicos (siglas en inglés: IL) se caracterizan por ser fluidos cuya estructura está compuesta por un anión y un catión, que deben de ser diferenciados de las sales iónicas convencionales o fundidas por su bajo punto de fusión (< 100 °C). Su aspecto líquido se debe a que los iones tienen la característica de ser muy asimétricos y de gran tamaño, lo que produce que las fuerzas de atracción entre aniones y cationes sean más débiles que en las sales fundidas. Es decir, una pequeña aportación de energía (temperaturas próximas al ambiente) es suficiente para separar los aniones y cationes, transformando el compuesto de sólido a líquido [39].

El uso de los IL se remonta a los años 1970 – 1980 donde se empleaban en variedad de aplicaciones como solventes o electrolitos de baterías [40]. A pesar de que ya se conocían sus múltiples propiedades, no fue hasta principios del siglo XXI que se potenció su estudio en diferentes campos. Como muestra la Figura 10 sobre el número de publicaciones científicas registradas de IL, el interés de la sociedad investigadora a nivel mundial ha ido en aumento a lo largo de los últimos 20 años.

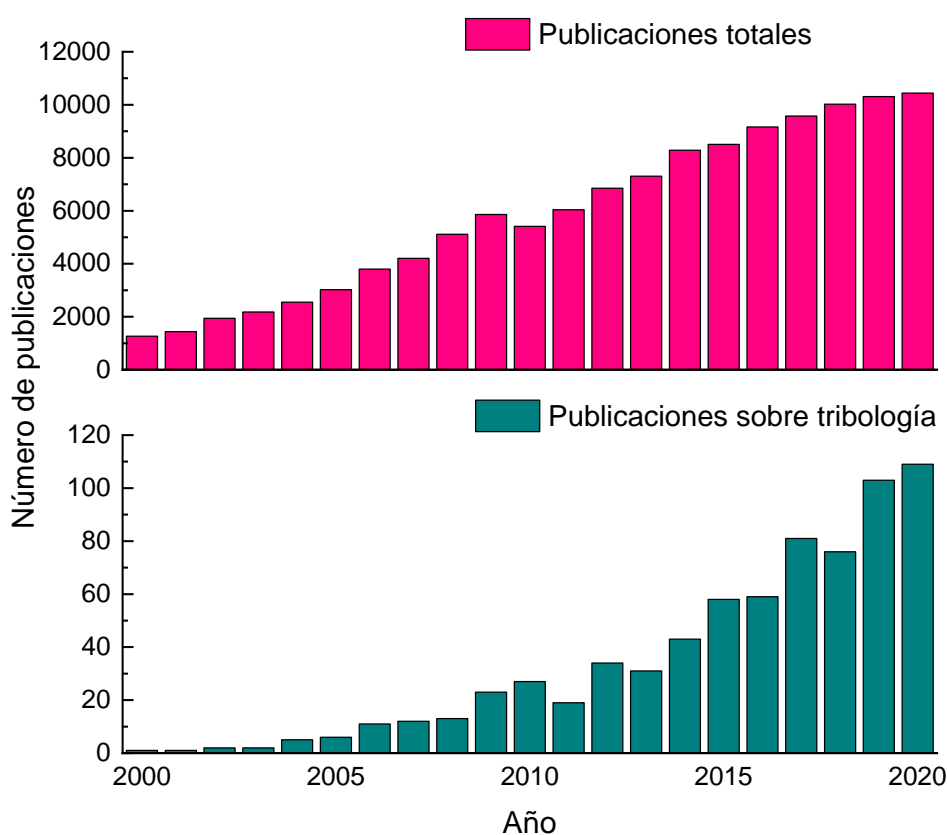


Figura 10: Número de publicaciones científicas referidas a los IL entre 2000 – 2020 según Web of Science.

Entre las características que presentan los IL se encuentran:

- Buenos disolventes.
- No volátiles (baja presión de vapor).
- No inflamables.
- Bajo punto de fusión.
- Miscibles en compuestos orgánicos.
- Alta estabilidad térmica.
- Alta estabilidad electroquímica.

- Elevada conductividad iónica.
- Polaridad.

Además, su fácil adsorción por las superficies en deslizamiento entre dos cuerpos permite que se forme una capa límite efectiva, reduciendo la fricción y el desgaste incluso a cargas elevadas. Estas propiedades hacen de los IL una alternativa potencial para la formulación de fluidos de transmisión para EM [41]. En la Figura 10 se puede apreciar el aumento exponencial de publicaciones sobre la intervención de IL en el campo de la tribología. Sin embargo, los altos costes de estos compuestos (entre 200 – 275 € por 100 g) impiden su uso como aceites base, limitando su empleo a aditivos a bajas concentraciones.

3. Materiales y métodos

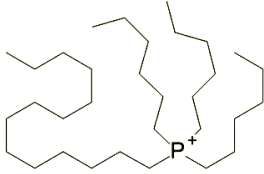
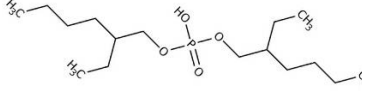
3.1. Materiales

Se utilizó como aceite de referencia un ATF cuyas propiedades se muestran en la Tabla 4. El ATF está compuesto en un 89 % en peso de un aceite base perteneciente al Grupo III, y un 11 % de paquete de aditivos. El IL Trihexyltetradecylphosphonium bis (2 – ethylhexyl) phosphate ($[P_{6,6,6,14}][BEHP]$) suministrado por IOLITEC GmbH (Tabla 5) se empleó como aditivo para el ATF en concentraciones de 1 y 3 %, manteniendo la concentración total de aditivo en todas las muestras al 11 %.

Tabla 4: Propiedades del aceite base de ATF [42].

Propiedades		Elementos aditivos	
Densidad a 15 °C (g/cm ³)	0,847	Ca (ppm)	–
Viscosidad cinemática (mm ² /s) a 40 °C	29,821	B (ppm)	59-88
Viscosidad cinemática (mm ² /s) a 100 °C	5,848	P (ppm)	136-194
Índice de viscosidad	144	Zn (ppm)	20
Punto de inflamabilidad (°C)	216	S (%)	0,192
Punto de fluidez	–49	N (%)	–

Tabla 5: Estructura química, fórmula empírica, y propiedades del IL.

Líquido Iónico	Catión	Anión
Trihexyltetradecylphosphonium bis(2-ethylhexyl) phosphate $[P_{6,6,6,14}][BEHP]$	Trihexyltetradecylphosphonium	Bis(2-ethylhexyl) phosphate
Fórmula empírica: $C_{48}H_{102}O_4P_2$		
Pureza: 98%		
Peso molecular: 805.29		
Viscosidad a 40 °C (mm ² /s)		528,05
Viscosidad a 100 °C (mm ² /s)		59
Índice de viscosidad		181
Conductividad eléctrica a 27 °C (μS/cm)		0,19

3.2. Preparación de muestras

La preparación de las muestras se realizó en tanto por ciento en peso, utilizando una balanza de precisión marca RADWAG modelo AS 310.R2 PLUS de 310 g de capacidad máxima y precisión 0,1 mg. Se prepararon un total de 200 g para cada uno de los aceites: ATF original, ATF con 1 % de IL, y ATF con 3 % de IL. En la Figura 11 se observa una instantánea de la balanza durante la preparación de la muestra de ATF + 1 % de IL.

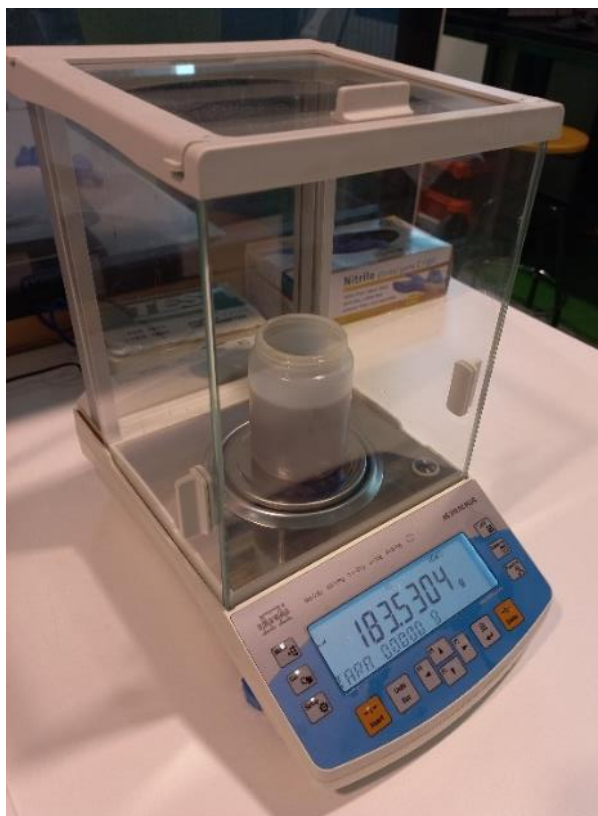


Figura 11: Balanza de precisión RADWAG.

Tras su preparación se agitaron y desgasificaron en el equipo centrífugo Kakuhunter modelo Sk-300 SII (Figura 12) de capacidad máxima 310 g. Las condiciones de mezcla fueron 30 min a 500 rpm de velocidad, con un contrapeso de 250 g (peso del aceite más el contenedor).



Figura 12: Mezclador Kakuhunter Sk-300 SII.

3.3. Caracterización físico – química

El objetivo de los ensayos de caracterización físico – química es observar que las mezclas estudiadas cumplen las condiciones de lubricación requeridas (explicadas en el apartado 2.2.3 Requisitos de los fluidos para EV) tanto para la realización de los ensayos tribológicos como para su aplicación final en EV.

3.3.1. Ensayos de solubilidad, densidad y viscosidad

El primer paso para la caracterización de los aceites fue determinar la solubilidad de las mezclas. Para ello se realizó una supervisión visual varias veces al día durante una semana del estado de las muestras. Se comprobó que no presentaran suspensiones, precipitaciones o fases visiblemente diferenciadas.

La densidad y la viscosidad dinámica de las mezclas se midieron a presión atmosférica de acuerdo con la norma ASTM D7042 en un rango de temperatura de 20 a 125 °C en pasos de 20 °C hasta los 100 °C, y en pasos de 5 °C hasta los 125 °C. Se usó el viscosímetro de alta precisión rotacional Stabinger SVM 3001 mostrado en la Figura 13. El equipo a partir de los resultados de viscosidad dinámica y de densidad calcula automáticamente la viscosidad cinemática y el índice de viscosidad.



Figura 13: Viscosímetro Stabinger SVM 3001.

3.3.2. Conductividad eléctrica

Como se ha explicado anteriormente, los ATF deben presentar unos requisitos de conductividad eléctrica para poder ser utilizados en EV. Por lo que era necesario comprobar que en el intervalo de temperaturas de trabajo el fluido sigue una tendencia disipativa. Para ello se seleccionaron las temperaturas potenciales a ser alcanzadas en el interior de la transmisión por las partes principales del EM, si este estuviera incluido en la carcasa de transmisión: 25, 40, 80, 100 y 125 °C.

El equipo empleado fue el conductímetro digital de Emcee Electronics (modelo 1153 -Figura 14 Izquierda) con rango de conductividad de 0 a 20.000 pS/cm y precisión del 1 %. Para la realización de las medidas el dispositivo aplica una tensión constante a través del fluido entre los electrodos concéntricos de acero inoxidable (Figura 14 – Derecha), que genera una pequeña corriente que es amplificada y mostrada por el display del equipo en pS/m o pS/cm.

Para realizar las medidas a las temperaturas deseadas se dispuso un baño térmico sobre una placa calefactora (Figura 15) IKA RCT basic con rango de temperatura 5 – 310 °C y máxima capacidad de 20 l de H₂O equivalente. Una vez estabilizada la temperatura, se introducía el sensor del equipo hasta cubrir por completo ambos electrodos y los orificios de la parte superior; se esperaba 1 min a que el sensor se estabilizara térmicamente con el aceite; y se iniciaba la medición de duración 3 segundos.



Figura 14: Conductímetro eléctrico digital Emcee 1153 [43].



Figura 15: Baño térmico sobre placa calefactora para las medidas de conductividad.

3.4. Caracterización tribológica

Para el estudio del comportamiento a fricción y desgaste de las mezclas en distintos regímenes de lubricación se utilizaron dos tribómetros con diferentes condiciones de ensayo.

3.4.1. Ensayo de rodadura / deslizamiento

En primer lugar, se utilizó un tribómetro Mini Traction Machine (PCS Instruments) de la Figura 17, con la configuración bola – disco. Se realizaron ensayos de 60 minutos en contacto acero – acero y una relación rodadura – deslizamiento (SRR) del 50 % a una velocidad media entre 2.500 y 10 mm/s (en pasos de 100 mm/s de 2.500 a 100 mm/s, y pasos de 10 mm/s de 100 a 10 mm/s); una carga de 25 N (correspondiente a una presión de contacto máxima de 0,9 GPa); temperaturas de 40, 60, 80 y 100 °C; y un volumen de muestra de 10 mL. Las probetas usadas durante los ensayos (Figura 16) fueron bolas cromadas de acero AISI 52100 con un diámetro de 19,05 mm (3/4”), dureza de 800 – 920 HV y una rugosidad superficial (R_a) menor de 0,02 μm ; y discos de acero AISI 52100 con un diámetro de 46 mm, una dureza de 720 – 780 HV y menos de 0,2 μm de rugosidad superficial.

La relación rodadura–deslizamiento (SRR) se define según la Ecuación 2 como:

$$SRR[\%] = 2 \times \frac{u_d - u_b}{u_d + u_b} \times 100 \quad (2)$$

Donde u_d y u_b son la velocidad del disco y de la bola en la superficie de contacto respectivamente. La velocidad media se calculó a partir de la Ecuación 3:

$$(u_d + u_b)/2 \quad (3)$$

Durante el ensayo se determinó el coeficiente de fricción y la resistencia eléctrica de contacto (siglas en inglés: ECR). Este primer ensayo permite la determinación de la Curva de Stribeck, clave para poder estudiar los distintos regímenes de lubricación de las muestras lubricantes.



Figura 16: Probetas de ensayo de la MTM: Disco Estándar (Izquierda), Bola Perforada (Derecha).



Figura 17: Equipo MTM – 2 Mini Traction Machine [44].

En segundo lugar, se realizaron igualmente ensayos en el tribómetro Mini Traction Machine (PCS Instruments) con 4 valores de temperatura (40, 60, 80, 100 °C), a una velocidad media constante (2.000 mm/s), pero variando el porcentaje de deslizamiento/rodadura (SRR) entre 0 – 100 % con el objeto de determinar la influencia de la relación entre el deslizamiento y la rodadura. La carga aplicada fue de 25 N (correspondiente a una presión máxima de contacto de 0,9 GPa). Durante este ensayo también se midieron el coeficiente de fricción y la resistencia eléctrica de contacto.

Las probetas utilizadas (bolas y discos) fueron las mismas que en los ensayos realizados anteriormente con este equipo en la determinación de la Curva de Stribeck.

Antes de comenzar cada test era necesario montar las probetas y las distintas partes del dispositivo según la secuencia mostrada en la Figura 18. Para el montaje completo era necesario “Inicializar” la bola y bajarla, lo que permitía terminar el proceso colocando las cubiertas de la sección 7. Además, para utilizar la menor cantidad de muestra posible se utilizó el contenedor opcional, lo que permitía realizar los ensayos con 10 ml de muestra.

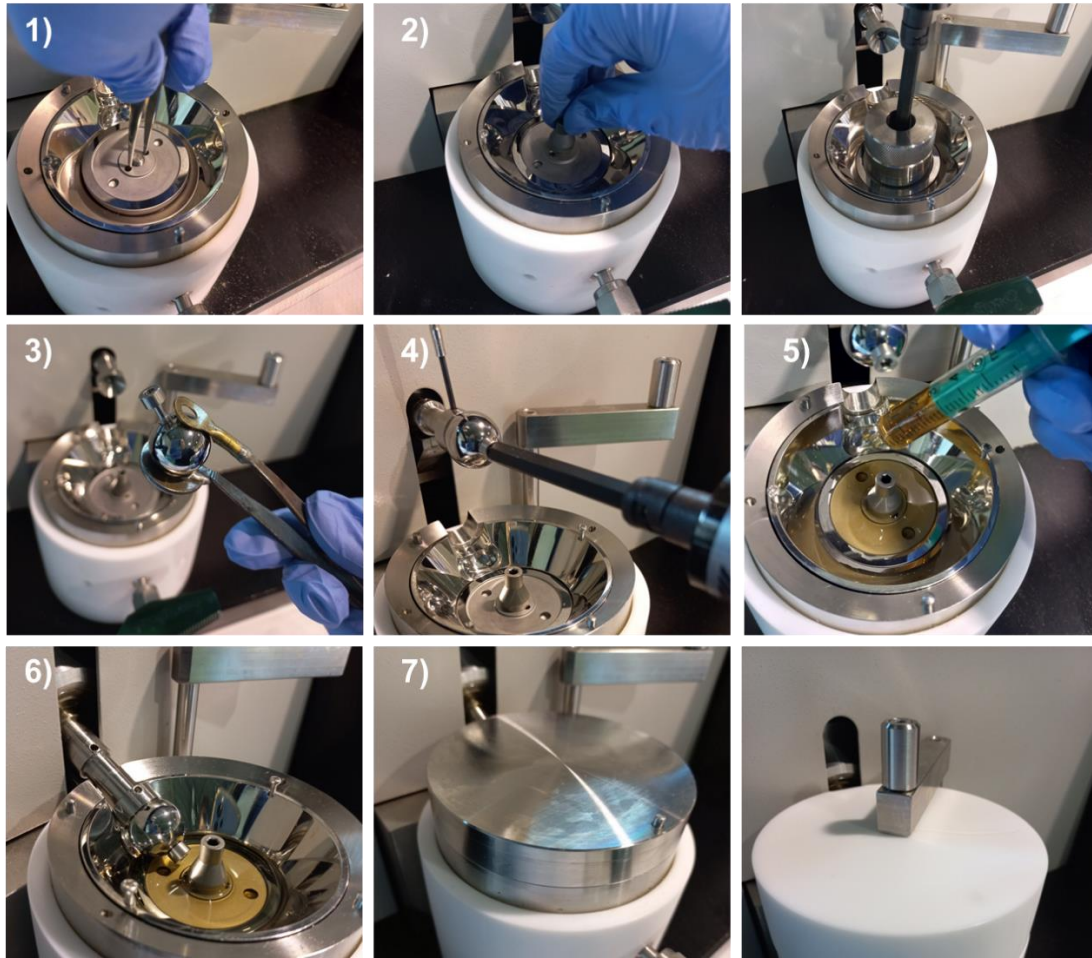


Figura 18: Descripción gráfica del proceso de montaje de probetas en MTM: 1) Colocación disco; 2) Tuerca de sujeción y apriete; 3) Colocación de bola perforada y tuerca; 4) Apriete de la bola perforada; 5) Administración de aceite lubricante; 6) Bola en contacto con el aceite; 7) Colocación cubiertas y seguro.

Antes y después de cada prueba, las probetas eran limpiadas con heptano en un baño de ultrasonidos durante 10 min y posteriormente se enjuagaron con etanol y secaron utilizando aire caliente.

3.4.2. Ensayo de deslizamiento alternativo

Se utilizó un tribómetro CETR UMT – 3 mostrado en la Figura 19, con la configuración bola – disco en contacto alternativo. Se realizaron ensayos de 60 min en contacto acero – acero bajo unas condiciones de ensayo de 15 Hz de frecuencia, con 4 mm de longitud de carrera, 100 °C de temperatura y cargas de 5, 10, 15, 20 y 30 N (correspondiente a las máximas presiones de contacto de 1,13 GPa; 1,43 GPa; 1,63 GPa; 1,8 GPa; y 2,06 GPa). Las probetas utilizadas en estos ensayos (Figura 20) están fabricadas en acero AISI 50100 con las siguientes propiedades: bola de 6

mm de diámetro, dureza de 58 – 66 HCR y R_a igual a $0,05 \mu\text{m}$; y disco de 10 mm de diámetro, dureza de 190 – 210 HV30 y una R_a de $0,018 \mu\text{m}$.

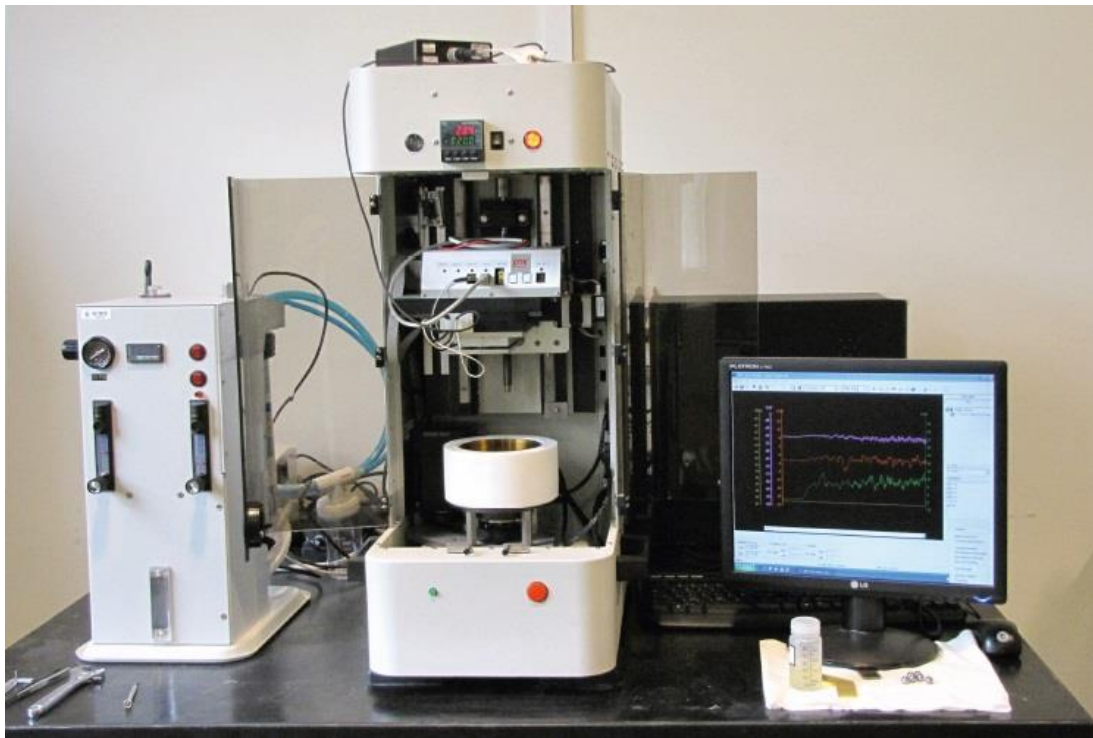


Figura 19: Equipo UMT- 3.



Figura 20: Probetas tras ensayo en la UMT.

El proceso de montaje, más complejo que el caso anterior, se basó en colocar en la parte inferior diferentes estructuras hasta llegar al portadiscos y acomodar en la parte superior el portabolas como se muestra en la Figura 21.

El principio de funcionamiento se basa en hacer que la plataforma del disco se mueva de forma lineal a una frecuencia dada mientras se mantiene la bola fija en la parte superior. Entre ambas superficies existirá una presión de contacto fijada previamente. La carga y el par se miden gracias a la presencia de sensores de galgas

extensiométricas de alta precisión, que se utilizan para el cálculo del coeficiente de fricción durante la prueba aplicando la ley de Coulomb (Ecuación 4):

$$\mu = \frac{F}{N} = \frac{\tau A}{\sigma A} = \frac{\tau}{\sigma} \quad (4)$$

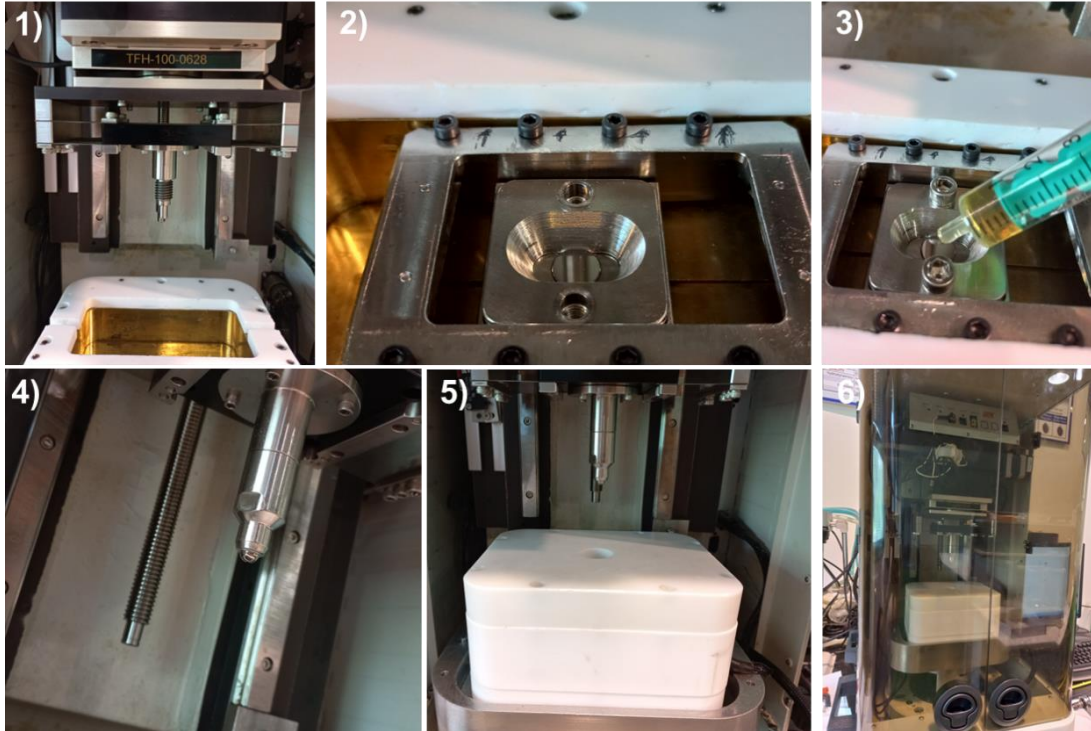


Figura 21: Descripción gráfica del proceso de montaje de probetas en UMT: 1) Estructura sin montar; 2) Estructura inferior montada y con disco; 3) Suministro de aceite lubricante; 4) Colocación del soporte de la bola; 5) Cubierta hermética; 6) Estructura montada.

Cada prueba se realizó al menos dos veces con una muestra de lubricante nueva. Y antes y después de cada prueba, las probetas se limpiaron en el equipo de ultrasonido con heptano durante 10 min, se enjuagaron con etanol y luego se secaron con aire caliente.

3.5. Análisis superficial

El volumen de desgaste en la superficie del disco se midió mediante microscopía confocal. Además, se enviaron las probetas a los servicios científico-técnicos de la Universidad de Oviedo para analizar la superficie de desgaste mediante microscopía electrónica de barrido y espectroscopía de dispersión de energía (SEM / EDS). Mediante estas dos últimas se determinó el mecanismo de desgaste y la composición elemental de la superficie desgastada. También fueron

enviadas a los servicios científico-técnicos de la Universidad de Santiago para el estudio de interacción química superficie – lubricante con un microscopio Raman.

3.5.1. Volumen de desgaste

Al finalizar cada ensayo en la UMT – 3, y tras el proceso de limpieza, se midió el volumen de desgaste del disco (muestra inferior) con microscopía confocal. El equipo utilizado fue un microscopio confocal e interferómetro Leica DCM 3D (Figura 22) que emplea una técnica no invasiva (sin contacto) gracias al principio de perfilometría óptica.

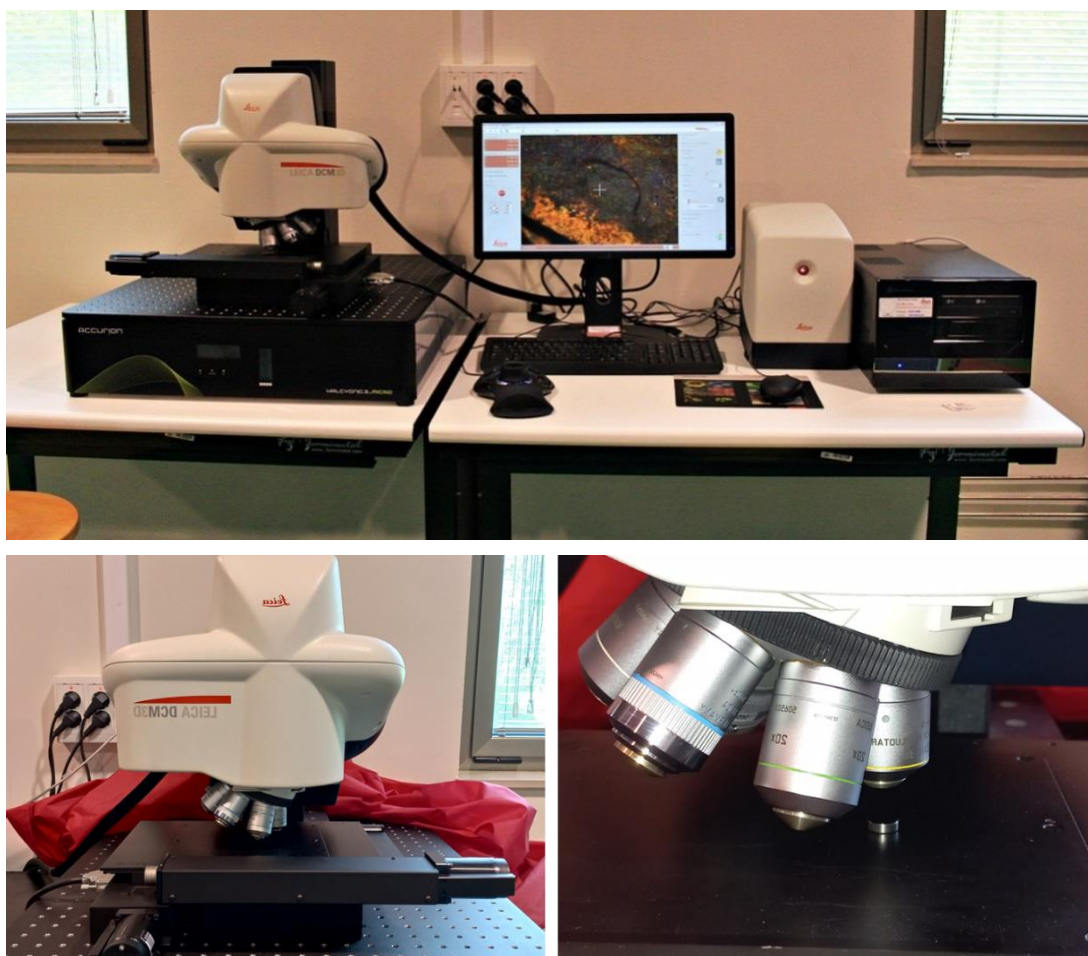


Figura 22: Microscopio Leica (Izquierda) y colocación de disco (Derecha).

3.5.2. Microscopio Electrónico

El análisis de la superficie de desgaste se realizó con un equipo JEOL JSM – 5600 (Figura 23) con cañón de electrones de filamento de tungsteno a un voltaje de operación de 20 kV, resolución máxima de 3,0 nm (modo de alto vacío) desde 5 a 50.000 aumentos y detector de electrones secundarios.

Posteriormente, y con el objeto de determinar el mecanismo de desgaste que tuvo lugar en cada caso, se utilizó un microscopio electrónico de barrido JEOL 6610LV SEM con cañón de electrones de filamento de tungsteno a un voltaje de aceleración de 20 kV, resolución máxima de 3,0 nm (modo de alto vacío), desde 5 a 50.000 aumentos y detector de electrones secundarios. El equipo de microanálisis integrado en el microscopio tiene un detector SDD modelo X-max 50 con resolución lineal de 125 eV en Mn K α de 1 a 20.000 cps y un área activa de 50 mm². La detección y cuantificación de elementos proviene del número atómico 4 (berilio), y la lente ultrafina permite la detección y análisis de átomos ultraligeros como (C, N, O, etc.). El software completo integrado Oxford INCA permite la selección de puntos o áreas en la imagen microscópica para su análisis.



Figura 23: Microscopio electrónico de barrido [45].

3.5.3. Microscopio Raman

Para estudiar la interacción superficie-lubricante se utilizó un microscopio confocal Raman modelo WITec ALPHA 300R (Figura 24) con láser de número de onda 532 nm y rango de potencia de 2.750 – 2.850 mW. Las medidas se realizaron con un objetivo Zeiss EC Epiplan – Neofluar Dic a 100x aumento y los espectros se tomaron en seis puntos ubicados en el área central de la huella de desgaste.

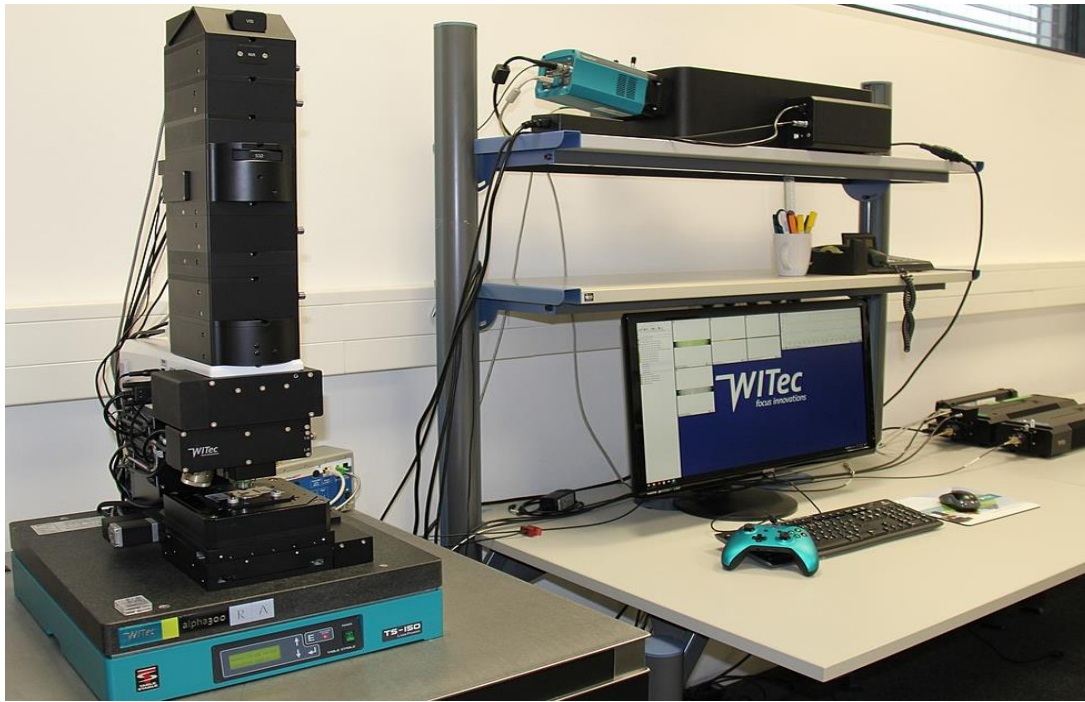


Figura 24 : Microscopio confocal Raman.

4. Resultados

4.1. Caracterización físico – química

4.1.1. Ensayos densidad y viscosidad

En primer lugar, se determinó la densidad y la viscosidad de las muestras (Figura 26 y Figura 27). A partir de los valores obtenidos se puede observar que ambas propiedades disminuyen al aumentar la temperatura. En la Figura 25 se muestra la variación de la viscosidad dinámica con la temperatura donde se puede observar como el ATF y sus dos variantes con IL presentan comportamientos viscosos prácticamente idénticos, con alta sensibilidad a los incrementos de temperatura (según la Ecuación 5 de Vogel para fluidos lubricantes) que provoca una caída pronunciada de la viscosidad entre los 25 y 75 °C, y de menor pendiente hasta los 125 °C.

$$\mu = ae^{b/(T-c)} \quad (5)$$

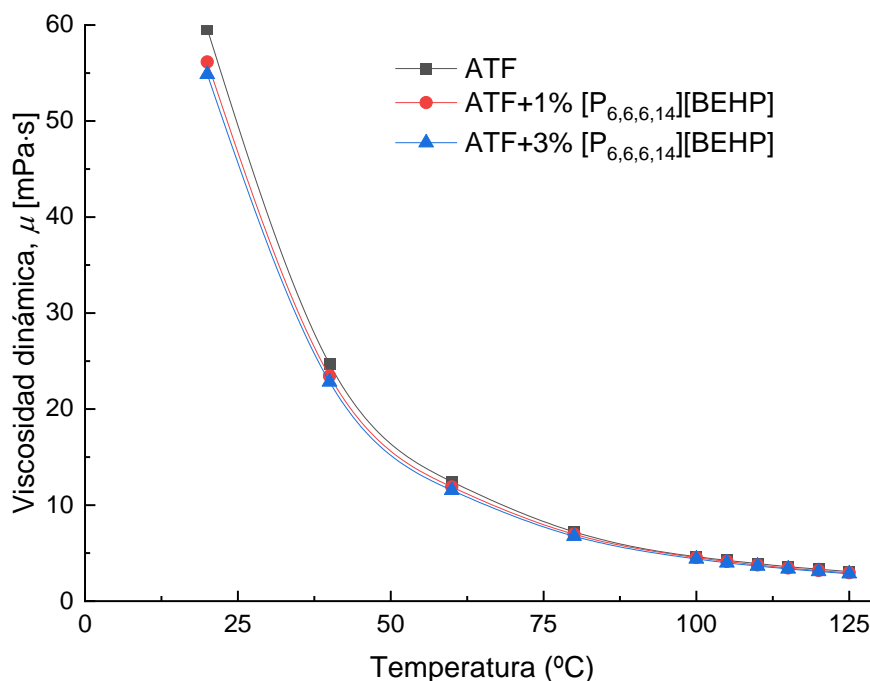


Figura 25: Variación de la viscosidad dinámica en función de la temperatura.

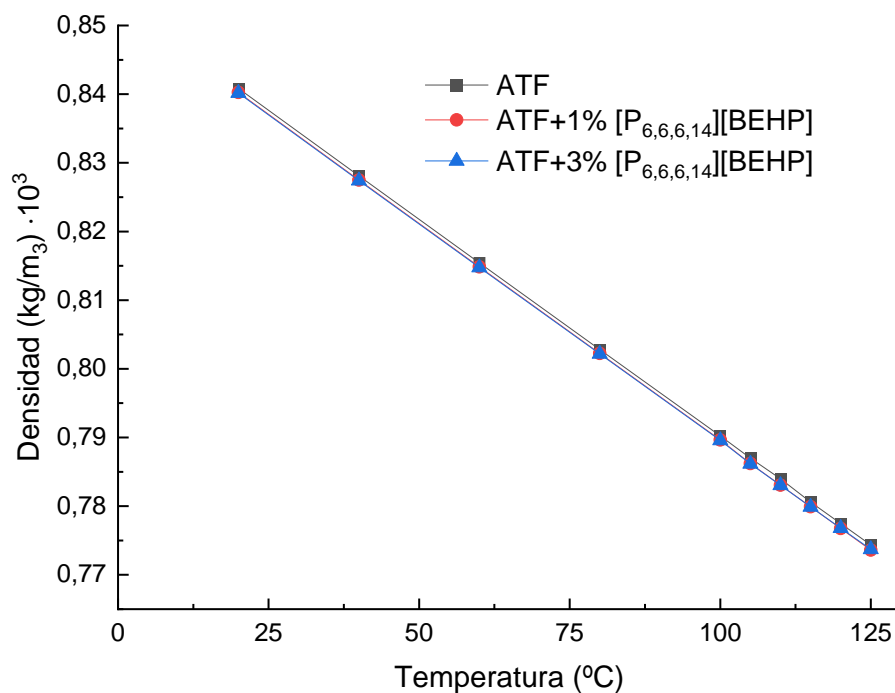


Figura 26: Variación de la densidad en función de la temperatura-

4.1.2. Conductividad eléctrica

En la Figura 27 se muestran los resultados obtenidos de conductividad eléctrica de los tres fluidos en función de la temperatura. Se puede observar como la conductividad eléctrica de los tres aceites aumentan con el incremento de la temperatura, debido a la disminución de la viscosidad que facilita la migración del portador de carga a través del fluido. Sin embargo, la conductividad eléctrica del ATF difiere de las mezclas con IL a pesar de tener curvas de viscosidad similares (Figura 25). Estos valores más altos de conductividad que presentan los dos lubricantes con IL están directamente relacionados con la cantidad añadida de IL al ATF. El IL [$\text{P}_{6,6,6,14}$][BEHP] se puede clasificar como un compuesto conductor considerando su conductividad eléctrica reportada por Hernandez Battez en su artículo “Phosphonium cation-based ionic liquids as neat lubricants: Physicochemical and tribological performance” [40], mientras que el ATF y las mezclas presentan comportamientos disipativos considerando la clasificación de los ATF en función de su conductividad eléctrica como se muestra en la Figura 28.

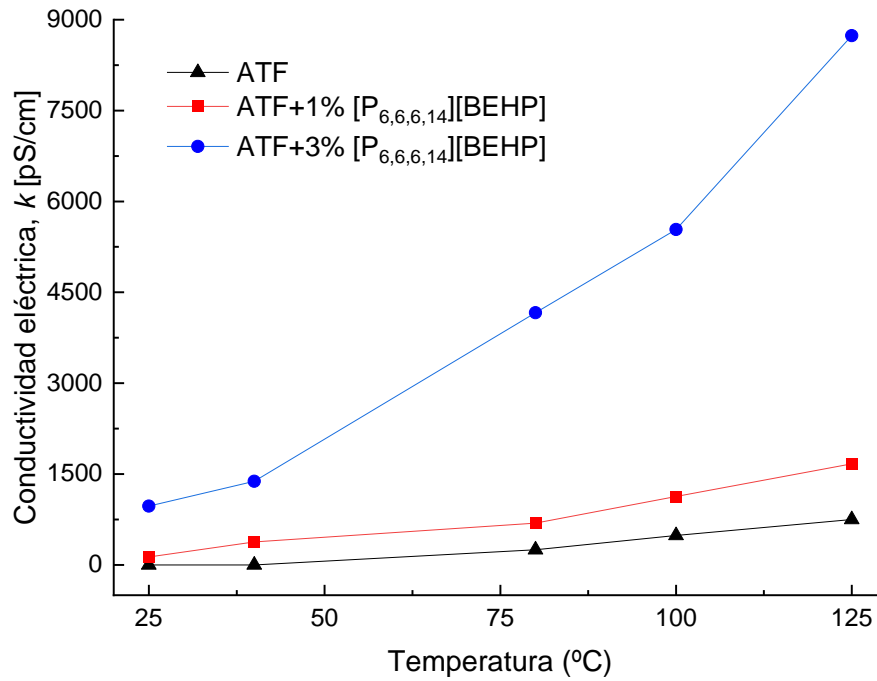


Figura 27: Variación de la conductividad eléctrica en función de la temperatura.

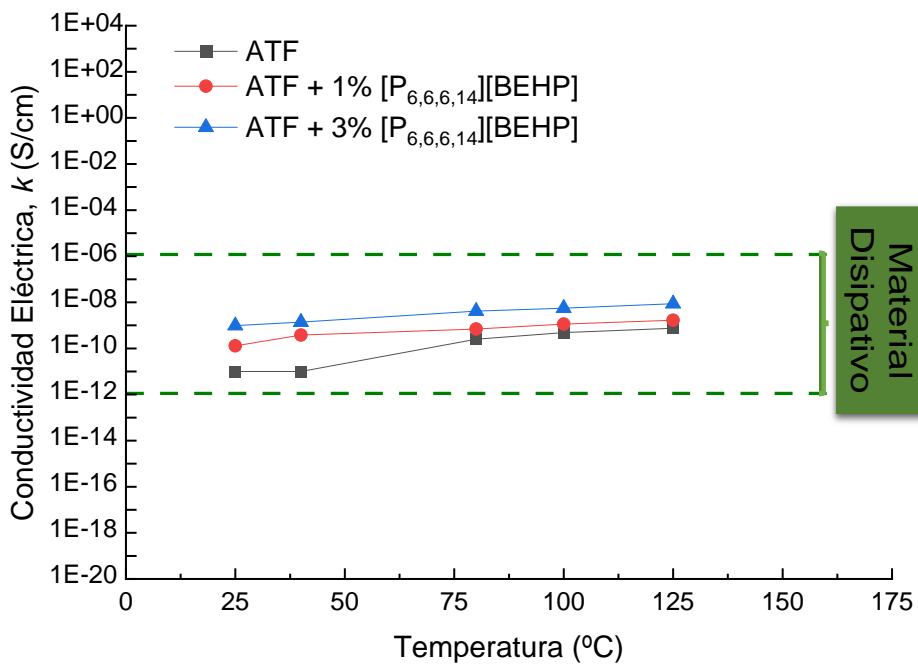


Figura 28: Comprobación del comportamiento disipativo de los diferentes aceites.

Además, se evaluó la ionicidad de los tres lubricantes a través del gráfico de Walden de la Figura 29, donde la línea punteada representa los líquidos denominados “buenos iónicos”. Los resultados ubicados lejos de esa línea y en el lado inferior significa que todas las muestras de lubricantes pueden considerarse líquidos “no iónicos”.

Las diferencias de conductividad entre las muestras de lubricantes pueden considerarse pequeñas puesto que en general no superan un orden de magnitud (Figura 28). Los tres lubricantes presentan condiciones óptimas de conductividad eléctrica de carácter disipativo y no iónicos, importantes desde la perspectiva de la configuración del EV que incorpora el motor eléctrico en la caja de transmisión en disposiciones híbridas.

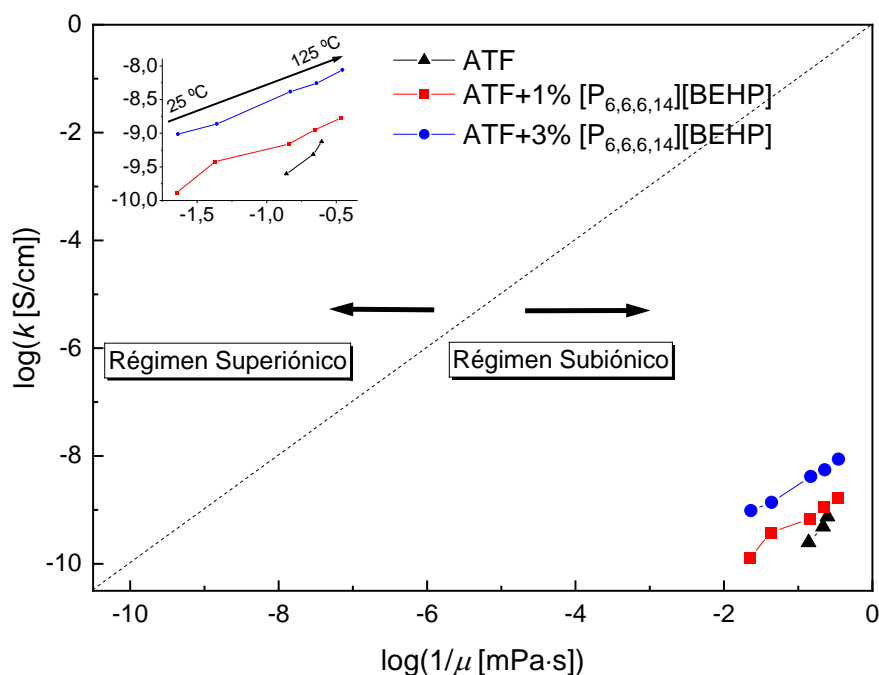


Figura 29: Gráfico de Walden.

4.2. Caracterización tribológica

4.2.1. Ensayo rodadura / deslizamiento

Para dar comienzo al estudio tribológico, se determinó la curva de Stribeck de las tres muestras a diferentes temperaturas. Las pruebas tribológicas a velocidades de arrastre variables muestran que los aceites tienden a un coeficiente de fricción similar a las velocidades más altas, lo que coincide con el régimen de lubricación elastohidrodinámica (Figura 30).

Las muestras que contienen IL comenzaron a mostrar un coeficiente de fricción más alto a velocidades de arrastre decrecientes. Este aumento de la fricción con las mezclas empieza primero a temperaturas más altas cuando el espesor de la película lubricante se vuelve más delgado y el contacto de las asperezas conduce a la formación de una película más gruesa debido a la adición del IL. Este

comportamiento fue explicado por Spikes con respecto al mecanismo de acción de ZDDP como un aditivo antidesgaste bajo un régimen de lubricación mixta o de desgaste suave [46].

La presencia de ZDDP o IL en este caso no aumenta el coeficiente de fricción bajo el régimen de lubricación límite a velocidades muy bajas, sino que desplaza toda la curva de Stribeck hacia la derecha y, por lo tanto, el contacto permanece en regímenes de lubricación límite y mixtos en un rango de velocidad más largo que sin ZDDP o IL en este caso. Las propiedades de mayor fricción de la película límite formada a partir de la presencia de IL, así como de ZDDP generalmente no son deseables, pero es una característica buscada para un fluido que se utilizará en transmisiones continuamente variables [47].

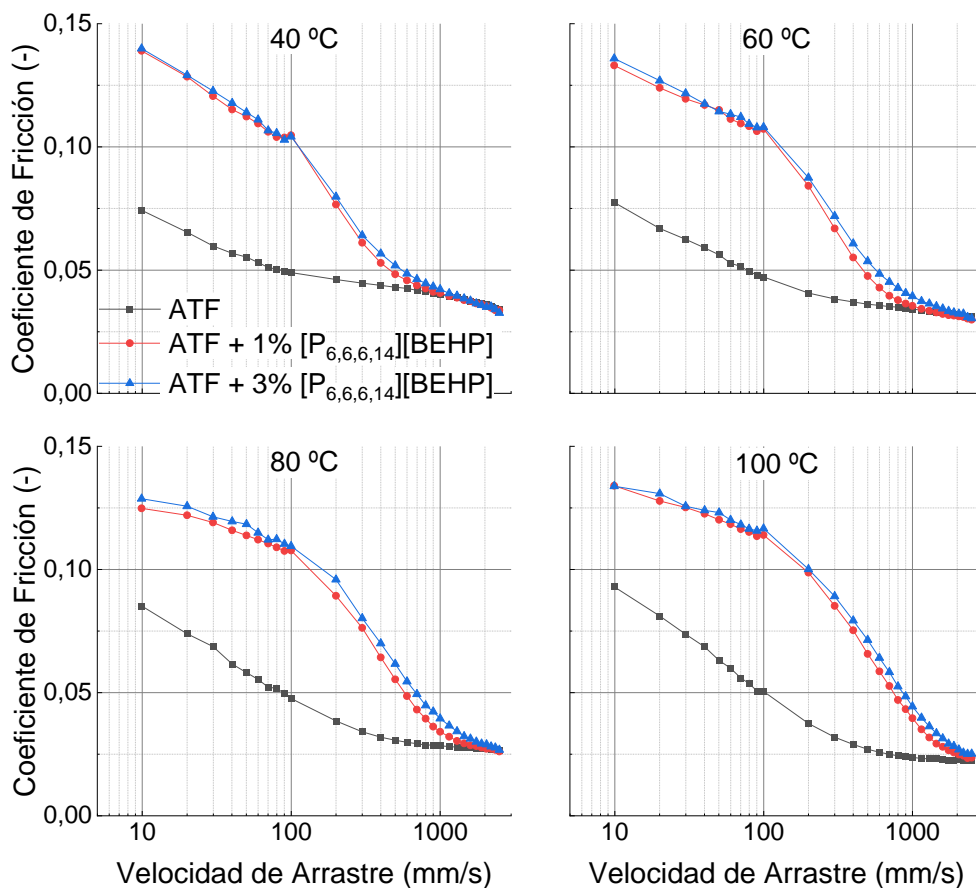


Figura 30: Curvas de Stribeck de los diferentes lubricantes.

En la Figura 31, la alta velocidad de arrastre, y los menores valores de carga y SRR en comparación con los ensayos de la curva de Stribeck, hacen que los ensayos de tracción se realicen en condiciones de lubricación elastohidrodinámica e hidrodinámica. Todas las muestras de lubricante se comportaron de forma muy similar a 40 y 60 °C puesto que bajo estos regímenes de lubricación (películas de

lubricante más gruesas), la fricción está controlada por la viscosidad del lubricante, que es similar en todas las muestras de aceites. Esta no diferenciación de las curvas de tracción a bajas temperaturas fue reportada por Costello [48].

A temperaturas más elevadas de 80 y 100 °C, la fricción se redujo debido a que la película de lubricante es más delgada y a la diferenciación entre las muestras de lubricante. Esto podría atribuirse a un menor contenido de modificador de fricción con el aumento de la concentración de IL.

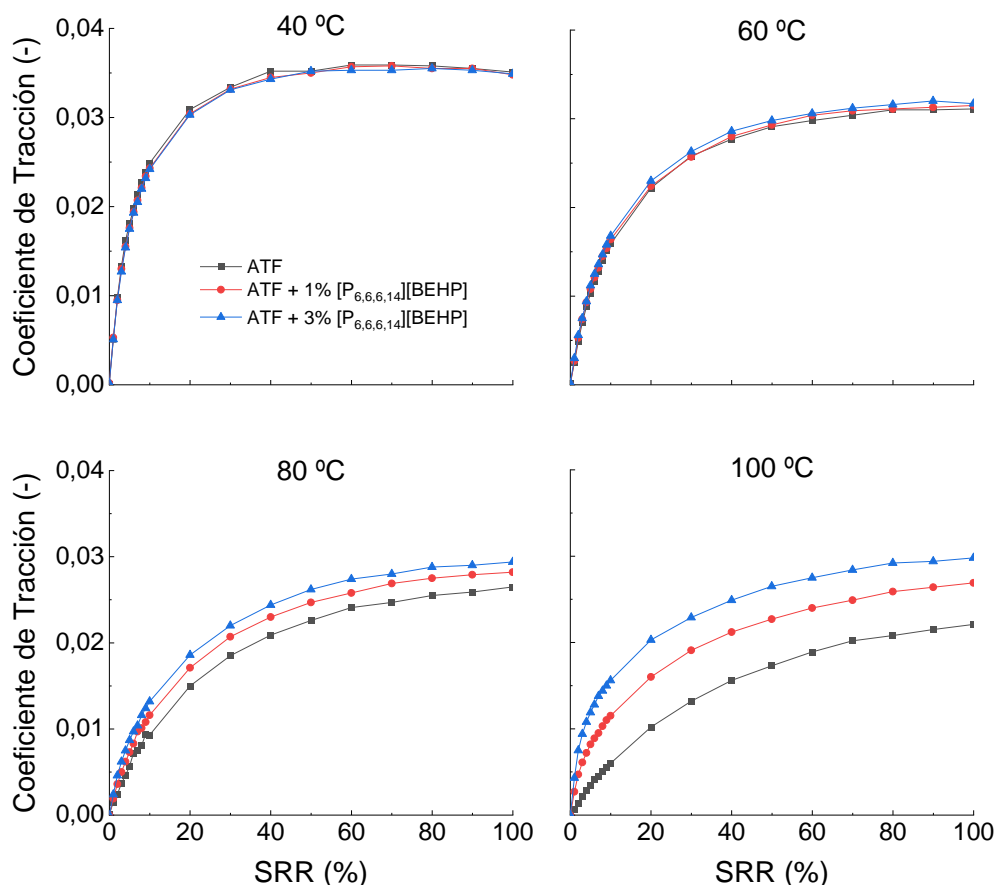


Figura 31: Curvas de tracción de los diferentes lubricantes.

4.2.2. Ensayo de deslizamiento alternativo

La evolución del coeficiente de fricción con el tiempo en los ensayos tribológicos se muestra en la Figura 32. En general, los valores de fricción fueron similares para todas las muestras de lubricante y se observó un comportamiento decreciente con cargas crecientes. La disminución de la fricción con la carga por debajo del valor del coeficiente de fricción 0,1 (considerado el límite umbral entre los regímenes de lubricación mixta y límite), podría estar relacionado con una interacción

química más fuerte del lubricante con la superficie debido a la lubricación de película más delgada.

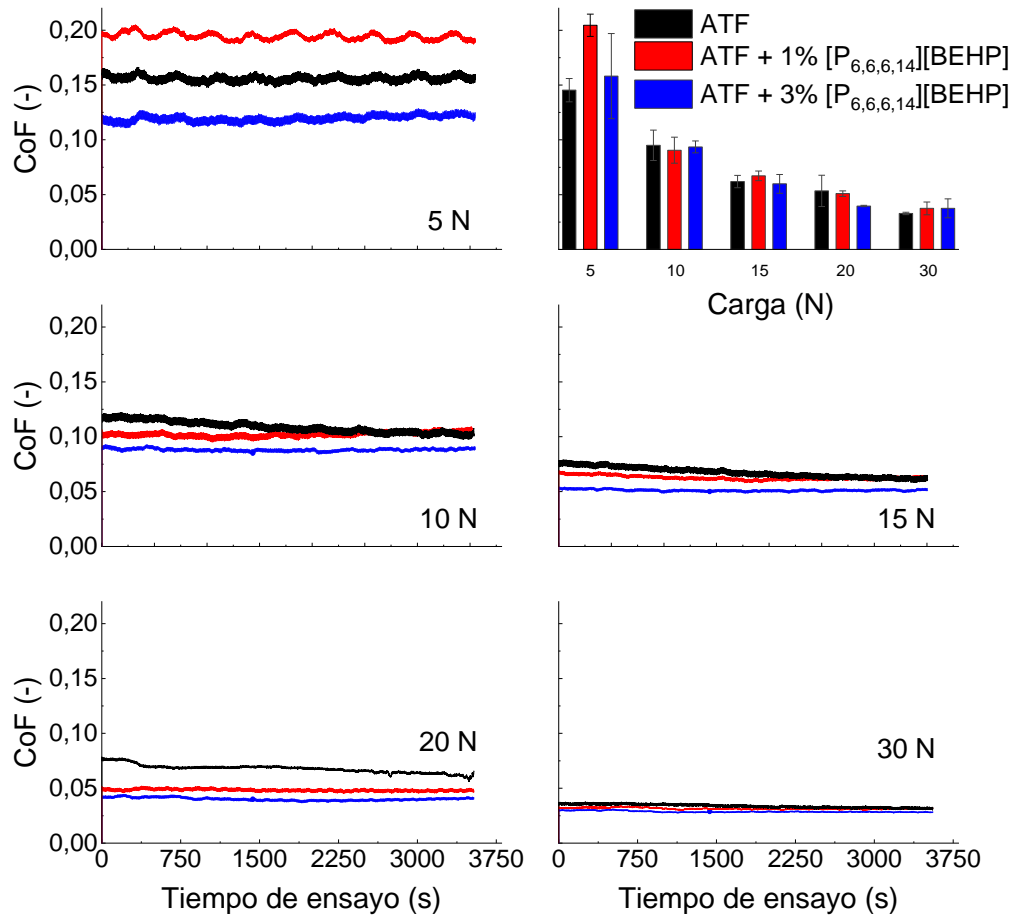


Figura 32: Coeficiente de fricción durante el test tribológico y su valor medio y desviación.

4.3. Análisis superficial

4.3.1. Volumen de desgaste

Por otro lado, el aumento de la carga resultó en un mayor desgaste para todas las muestras de lubricante (Figura 33). Sin embargo, en general la adición del IL redujo el desgaste con respecto al aceite de referencia ATF, siendo el volumen de desgaste inversamente proporcional a la concentración de IL en las muestras. Por tanto, la mezcla con 3 % de [P_{6,6,6,14}][BEHP] presentó un mejor comportamiento frente al desgaste.

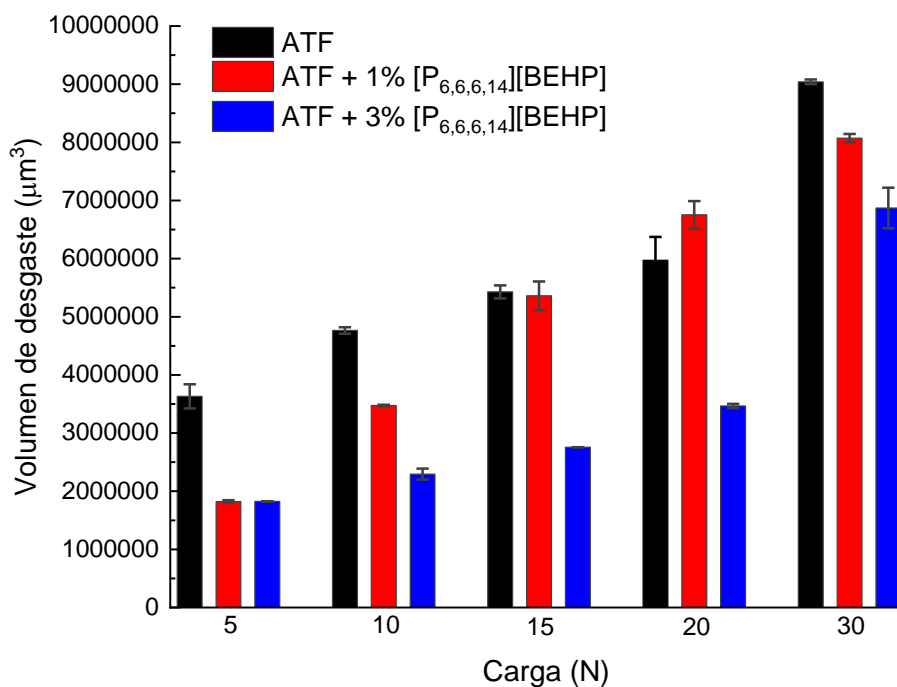


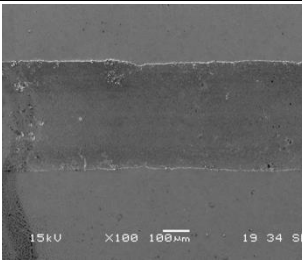
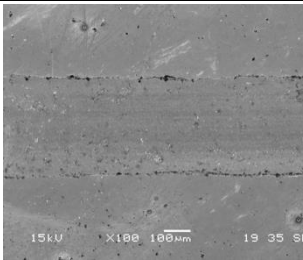
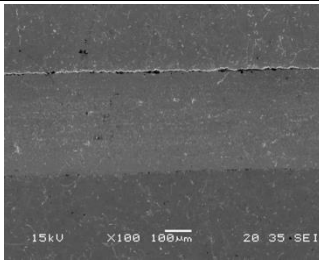
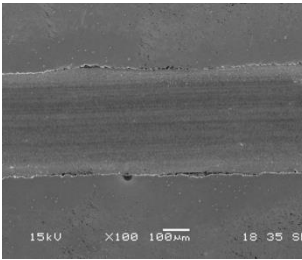
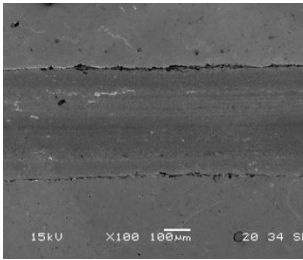
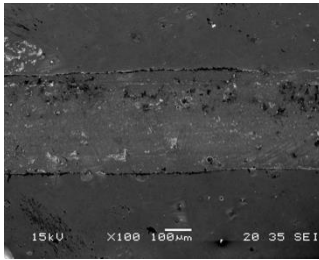
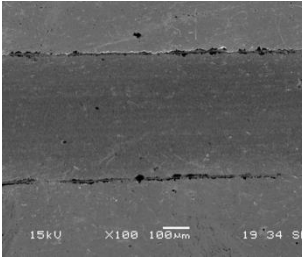
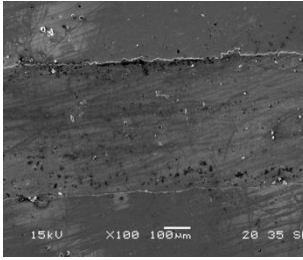
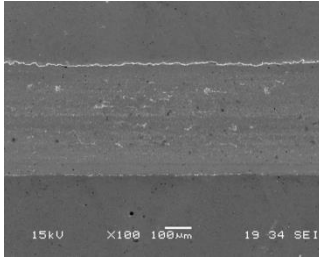
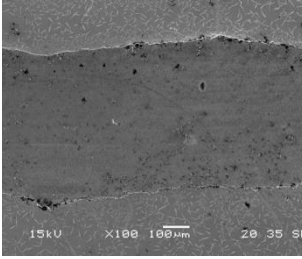
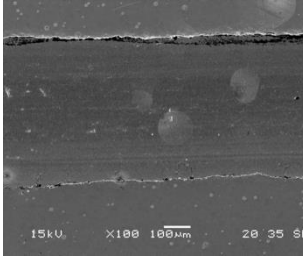
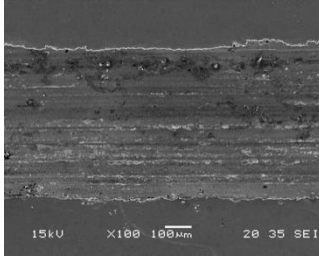
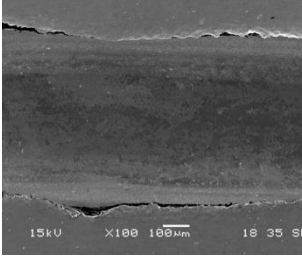
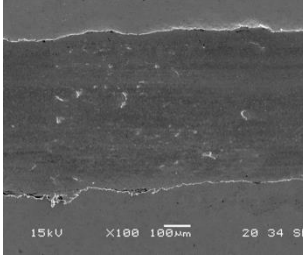
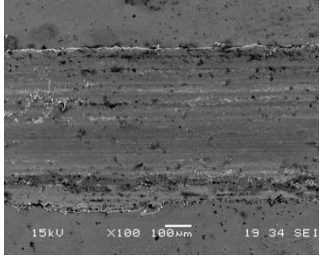
Figura 33: Volumen de desgaste tras los ensayos de fricción en UMT – 3.

4.3.2. Microscopio Electrónico

En la Tabla 6 se muestran las imágenes SEM de la superficie desgastada después de las pruebas de fricción y desgaste, donde se puede observar que el mecanismo de desgaste fue de tipo adhesivo. A través de estas imágenes también se puede verificar el aumento del desgaste con la carga, así como la deformación plástica en los bordes de la cicatriz de desgaste.

La Tabla 7 contiene los valores obtenidos del análisis EDS de la superficie desgastada de los discos, donde se puede observar que la concentración de fósforo aumentó con la adición de IL al aceite de referencia. La técnica EDS tiene una profundidad de detección del orden de micras, por lo que la gran concentración de fósforo encontrada sugirió la interacción química y la presencia de este elemento en la superficie desgastada del material. Este suceso era de esperar debido a la presencia de fósforo en la estructura química del anión y catión del IL. El fósforo también proviene del aditivo antidesgaste ZDDP, propenso a reaccionar con la superficie metálica bajo un régimen de lubricación mixta formando una película límite. R. McDonald analizó para casos con ZDDP, la formación de películas de aditivos antidesgaste y para presiones extremas que contiene P [49]. Informó que esta película está formada principalmente por fosfatos y puede ser tan delgada como 20 nm y tan gruesa como 1 μm.

Tabla 6: Imágenes del SEM de la superficie desgastada después de las pruebas de fricción y desgaste.

Carga	ATF	ATF + 1% $[P_{6,6,6,14}]$ [BEHP]	ATF + 3% $[P_{6,6,6,14}]$ [BEHP]
5 N			
10 N			
15 N			
20 N			
30 N			

Por otro lado, Qu et al [50] informó que el IL, debido a su forma iónica, tiene un proceso de formación de película más eficiente que ZDDP, lo que da como resultado un espesor más grueso. Cuando se usó $[P_{6,6,6,14}][BEHP]$ + ZDDP como aditivo en un aceite de motor, el espesor de la película formada fue mayor que la

suma de las dos formadas por separado. Considerando este hecho, el espesor de la película límite esperado en el caso ATF + [P_{6,6,6,14}][BEHP] podría ser mayor a 1 μm y ser fácilmente detectado por el EDS como se muestra en la Tabla 7.

Cuando se utilizan aceites totalmente sintéticos, los numerosos aditivos incluidos en su formulación pueden mostrar efectos sinérgicos o antagónicos [51]. La adición de un IL que contiene P a un aceite sintético puede dar lugar a la formación de polifosfatos de Fe, mientras que la presencia de ZDDP puede dar lugar a la formación de una mezcla de polifosfatos, sulfatos y sulfuros de Zn/Fe en la película límite. En este caso, el P y S encontrados con la técnica EDS sugieren la formación de fosfato, sulfato y/o sulfuro de Fe en el límite de detección de esta técnica. Sin embargo, se puede detectar concentraciones más altas y otros compuestos en la superficie utilizando otras técnicas (por ejemplo, XPS, Raman, etc).

Tabla 7: Análisis EDS de la huella de desgaste del disco.

Aceite	Carga (N)	Concentración de elementos químicos (% en peso)							
		C	O	Si	P	S	Cr	Mn	Fe
ATF	5	7,43	10,03	0,19	0,04	0,83	3,02	0,83	77,64
	10	6,82	10,43	0,16	0,00	0,73	2,91	0,64	78,25
	15	6,95	11,83	0,38	0,02	0,88	2,17	0,51	77,26
	20	6,99	12,08	0,10	0,06	1,54	4,20	0,74	74,09
	30	6,97	11,35	0,18	0,20	1,30	3,11	0,58	76,17
ATF + 1% IL	5	7,13	10,70	0,12	0,46	0,21	0,73	0,65	77,89
	10	6,70	11,86	0,20	0,58	0,47	2,94	0,59	76,57
	15	6,90	12,86	0,28	0,27	0,49	2,11	0,30	76,68
	20	7,13	13,65	0,21	0,31	0,50	1,93	0,59	75,48
	30	6,67	11,45	0,36	0,32	0,57	2,37	0,50	77,69
ATF + 3% IL	5	6,77	10,72	0,29	0,48	0,30	2,51	0,64	78,07
	10	7,14	11,07	0,11	0,61	0,26	2,85	0,53	77,39
	15	8,44	10,35	0,23	0,54	0,19	2,76	0,47	76,95
	20	7,34	11,60	0,22	0,49	0,28	2,22	0,56	77,29
	30	6,94	10,41	0,24	0,88	0,12	2,27	0,57	78,48

4.3.3. Microscopio Raman

Los análisis Raman, como se muestra en la Figura 34, revelaron la presencia de óxidos de hierro en la huella de desgaste. En particular, aparece un pico de vibración de estiramiento característico de Fe – O (Fe_3O_4) aproximadamente a 667 y a 540 cm^{-1} también, aunque con menor intensidad [52,53]. Además, se observaron picos característicos de Fe_2O_3 a 220, 290, 410, 613 y 1.318 cm^{-1} [53]–[55]. Los espectros Raman también muestran varios picos en el rango de 100 – 530 cm^{-1} . Los

picos de vibración de flexión de PO_2^- y PO_4^- se observaron a 110, 126, 168, 442 y 525 cm^{-1} [53]. Los picos 220 y 272 cm^{-1} se asignan a vibraciones de Fe – S y varias especies de polisulfuros (S_n^{2-}) [56]. También se observaron picos de estiramiento S – S a $460 - 480 \text{ cm}^{-1}$ y un pico de Zn – S a 350 cm^{-1} [53]. Asimismo, en casi todos los espectros aparecen dos picos característicos a 1.340 y 1.580 cm^{-1} correspondientes a las bandas D y G de materiales de carbono [52,57]. La asimetría en las intensidades de las bandas D y G de los espectros, así como el ancho de los picos, sugiere que el carbono analizado en la huella de desgaste es grafito estructuralmente amorfo [55].

Por otro lado, en la región espectral de $930 - 1.100 \text{ cm}^{-1}$, la mayoría de los picos se asignan a fosfatos compuestos (PO_4^{3-}) [30] (principalmente polifosfatos de hierro y polifosfatos de Zn) [54]. Además, los picos de menor intensidad que aparecen a 1.020 , 1.090 y 1.195 cm^{-1} se asignan a compuestos de sulfatos (principalmente ZnSO_4) [58].

Como se puede observar en los espectros Raman, los picos asignados a los compuestos de fósforo ubicados en las regiones espectrales $100 - 530 \text{ cm}^{-1}$ y $930 - 1.100 \text{ cm}^{-1}$ aumentan considerablemente su intensidad cuando la concentración del IL es mayor. Estos resultados concuerdan con la mayor concentración de fósforo que también se observa en el análisis EDS al aumentar la concentración de IL, y para todas las cargas (Tabla 7). Esto sugiere que la adición de IL mejora la cinética de la formación de películas enriquecidas con fósforo, que actúa como una película protectora contra el desgaste.

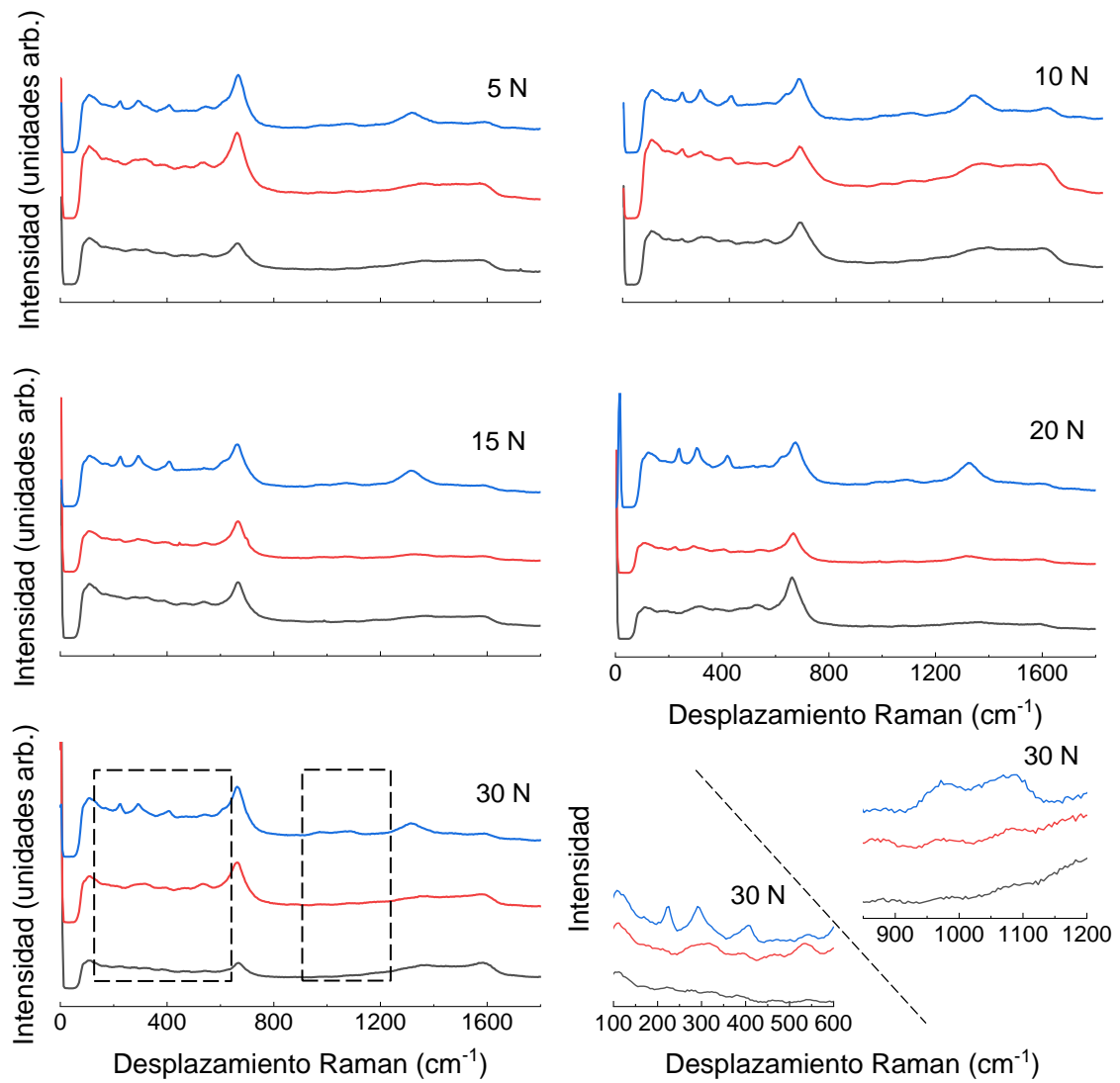


Figura 34: Espectro Raman de la huella de desgaste.

5. Conclusiones

La compatibilidad eléctrica, así como el comportamiento tribológico mejorado son requisitos importantes para que los ATF se utilicen en EV que incluyen el EM en la caja de transmisión. Ambos requisitos dependen del tipo y la concentración de los aditivos. Se ha recomendado el uso de IL como agentes de conductividad en la formulación del ATF, pero también afectan al comportamiento tribológico. En este trabajo se estudió la influencia de la adición del IL Trihexyltetradecylphosphonium bis (2 – ethylhexyl) phosphate ($[P_{6,6,6,14}][BEHP]$) en el comportamiento eléctrico y tribológico de un ATF totalmente formulado.

Atendiendo a los distintos apartados del trabajo desarrollado se pudieron extraer las siguientes conclusiones:

- La adición del IL no cambia el comportamiento viscoso, así como la propiedad “no iónica” del ATF. Además, sigue siendo clasificado como material disipativo a pesar de la influencia de la concentración de IL en los valores de la conductividad eléctrica, siendo ambos directamente proporcionales.
- La presencia de IL también aumentó la tracción, probablemente debido a la disminución del contenido del modificador de fricción y al aumento de la interacción química de la superficie, formando una película enriquecida con P que aumenta la fricción bajo movimientos de contacto de rodadura y deslizamiento (característica deseable para un ATF).
- La formación de una película apenas cambia la fricción bajo los contactos deslizantes, pero reduce el desgaste considerablemente.
- Los lubricantes ATF + 1 % de $[P_{6,6,6,14}][BEHP]$ y ATF + 3 % de $[P_{6,6,6,14}][BEHP]$ presentan mejores propiedades que el aceite de referencia ATF. Estos resultados destacan la funcionalidad del IL como aditivo en el futuro de los fluidos de transmisión para EV.
- El lubricante con mayor concentración de IL (3 %) demostró en los diferentes ensayos ser un fluido de transmisión con gran potencial, por lo que sería de interés estudiar su comportamiento en un rango más amplio de concentración y encontrar el punto óptimo eficiencia – precio.

6. Líneas futuras

Teniendo en cuenta los resultados recogidos en este trabajo, se propone abordar las siguientes líneas futuras de trabajo:

- Uso de otros líquidos iónicos como aditivo con una menor toxicidad y mayor biodegradabilidad.
- Utilizar otros aceites bases distintos, identificando las combinaciones de lubricante – IL que mejoren el comportamiento tribológico del aceite base y compitan con mezclas que contengan ZDDP en lugar de líquido iónico.
- Explorar la posible aplicación de estas soluciones lubricantes en el ámbito marino.

7. Bibliografía

- [1] National Geographic, “¿Qué es el calentamiento global? | National Geographic,” 2021. <https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/que-es-el-calentamiento-global> (accessed Jun. 21, 2022).
- [2] CCOO, “Evolución de las emisiones de gases de efecto invernadero en España (1990-2017).” p. 18, 2018.
- [3] UNITED NATIONS, “If you’re not thinking about the climate impacts of thawing permafrost,” 2022. https://news.un.org/en/story/2022/01/1110722?gclid=Cj0KCQjw2MWVBhCQARIsAljbwoOBIdde1MF39NhsBZXn4Y4reSEJaRVLle53_mnJqCbK-0PrBdnt-G8aAlvmEALw_wcB (accessed Jun. 21, 2022).
- [4] SECRETARÍA DE ESTADO DE MEDIO AMBIENTE, “NOTA DE LOS PRINCIPALES RESULTADOS DE LA COP26,” 2021. [Online]. Available: <https://unfccc.int/process-and-meetings/conferences/glasgow-climate-change-conference-october->
- [5] D. L. Fernández, “Energías Alternativas,” *Revista TECNO LÓGICAS*, p. 22, 2005.
- [6] Economipedia, “Crisis del petróleo de 1973,” 2022. <https://economipedia.com/definiciones/crisis-del-petroleo-1973.html> (accessed Jun. 22, 2022).
- [7] “Consumo de energía procedente de combustibles fósiles (% del total) | Data,” 2022. <https://datos.bancomundial.org/indicador/EG.USE.COMM.FO.ZS> (accessed Jun. 22, 2022).
- [8] “Producción primaria de energía mundial | Producción energética | Enerdata.” <https://datos.enerdata.net/energia-total/produccion-energetica-mundial.html> (accessed Jun. 23, 2022).
- [9] R. Nealer, D. Reichmuth, and D. Anair, *Cleaner Cars from Cradle to Grave How Electric Cars Beat Gasoline Cars on Lifetime Global Warming Emissions*. 2015. [Online]. Available: www.ucsusa.org
- [10] Luis Alfonso Díaz Secades, “Gestión del Mantenimiento de Sistemas Marinos,” *Fatiga, tribología y lubricación*. 2022.
- [11] “Lubrication (tribology), education and research; a report on the present position and industry’s needs.,” London, 1966.

- [12] K. Holmberg, P. Anderson, and A. Erdemir, "Global energy consumption due to friction in passenger cars.," *Tribology International*, pp. 221–234, 2012.
- [13] Bhushan Bharat, *Principles and Applications of Tribology*, vol. Second Edition. 2013.
- [14] W. Stachowiak, W. Batchelor "Engineering Tribology" third-edition_compress, pp.831, 2005.
- [15] International ASTM "Standard Test Method for Static and Kinetic Coefficients of Friction of Plastic Film and Sheeting",
- [16] W Stachowiak Gwidon, *Wear Materials, Mechanisms and Practice*. WILEY.
- [17] W. D. Callister and D. G. Rethwisch, "What is Carbon Steel – Plain Carbon Steel – Definition," *Materials science and engineering*, p. 960, 2022, Accessed: Jul. 05, 2022. [Online]. Available: <https://material-properties.org/what-is-carbon-steel-plain-carbon-steel-definition/>
- [18] "Teoría de Lubricantes (Tribología) - Ingeniero Marino." <https://ingenieromarino.com/lubricantes-tribologia/> (accessed Jul. 06, 2022).
- [19] DV. Lalith, "ELECTRIC AND HYBRID ELECTRIC VEHICLES ELECTRIC AND HYBRID ELECTRIC VEHICLES," 2021. [Online]. Available: www.ijrar.org76
- [20] J. A. Sanguesa, V. Torres-Sanz, P. Garrido, F. J. Martinez, and J. M. Marquez-Barja, "A review on electric vehicles: Technologies and challenges," *Smart Cities*, vol. 4, no. 1. MDPI, pp. 372–404, Mar. 01, 2021. doi: 10.3390/smartcities4010022.
- [21] MOTOR K, "Observatorio DrivenK sobre la búsqueda de automóviles online," 2020.
- [22] "Ministerio de Industria, Comercio y Turismo - Plan RENOVE." <https://industria.gob.es/renove/paginas/index.aspx> (accessed Jul. 06, 2022).
- [23] "Programa MOVES III | Idae." <https://www.idae.es/ayudas-y-financiacion/para-movilidad-y-vehiculos/programa-moves-iii> (accessed Jul. 06, 2022).
- [24] SoyMotor, "Mercedes-Benz Vision EQXX." <https://soymotor.com/coches/noticias/mercedes-benz-vision-eqxx-981039> (accessed Jun. 26, 2022).
- [25] "Arrancan las entregas del NIO ET7. Una berlina eléctrica china para luchar contra los alemanes y americanos," 2022. Accessed: Jun. 26, 2022. [Online].

- Available: <https://forococheselectricos.com/2022/03/arrancan-entregas-nio-et7.html>
- [26] “Model S | Tesla España.” https://www.tesla.com/es_es/models (accessed Jun. 26, 2022).
- [27] “BMW iX (i20): Autonomía, modelos, datos técnicos y precios | BMW España.” https://www.bmw.es/es/coches-bmw/bmw-i/bmw-ix/2021/bmw-ix.html?&tl=sea-gl-ES_BMW_NEWCARS_I%20SERIES_SPA_BND-mix-miy-.sech-l20_BND_IX-.e-bmw%20ix-.&gclid=CjwKCAjwh-CVBhB8EiwAjFEPGRbp8qWGMD589FcTQRHt95yHTG5wj3gJF127ZX865jb nSh2Y4MiJzBoCC0QQA vD_BwE&gclsrc=aw.ds (accessed Jun. 26, 2022).
- [28] “EQS de Mercedes-EQ: tecnología.” https://www.mercedes-benz.es/passengercars/mercedes-benz-cars/models/eqs/saloon-v297/explore/numbers.module.html?kpid=go_cmp-12761097320_adg-120597707883_ad-548698676842_kwd-831043077500_dev-c_ext-&gclid=CjwKCAjwh-CVBhB8EiwAjFEPGRGUEdILh2XnMyu9YHqq2Vu6fZ2A4eBtJrpE_tbSDk4tw 2n2GZa9ShoCw2QQA vD_BwE (accessed Jun. 26, 2022).
- [29] L. Pastor, “The Electric Vehicle.” p. 23. Accessed: Jul. 03, 2022. [Online]. Available: <https://luispastor.es/todos-los-coches-son-iguales/>
- [30] D. González, P. Tutor, and P. Barreiro, “PRINCIPIOS BÁSICOS DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO,” 2019.
- [31] Inc., LNG Publishing Company, “Lubes’n’Greases Perspective on Electric Vehicles Annual Report,” 2019.
- [32] Q. Xue, X. Zhang, T. Teng, J. Zhang, Z. Feng, and Q. Lv, “A comprehensive review on classification, energy management strategy, and control algorithm for hybrid electric vehicles,” *Energies*, vol. 13, no. 20. MDPI AG, Oct. 14, 2020. doi: 10.3390/en13205355.
- [33] “Hybrid E-motor Positions - Lubes’N’Greases.” <https://www.lubesngreases.com/electric-vehicles/report/reference/hybrid-e-motor-positions/> (accessed Jun. 29, 2022).
- [34] A. García, G. D. Valbuena, A. García-Tuero, A. Fernández-González, J. L. Viesca, and A. H. Battez, “Compatibility of Automatic Transmission Fluids with Structural Polymers Used in Electrified Transmissions,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 12, no. 7, Apr. 2022, doi: 10.3390/app12073608.

- [35] “Motul - Noticias/ The Drum - Motul presentó un nuevo producto de la gama Hybrid en Automechanika 2018.” <https://www.motul.com/es/es/news/motul-to-launch-new-hybrid-line-product-with-garage-concept-at-automechanika-2018> (accessed Jun. 29, 2022).
- [36] American Petroleum Institute, “Engine Oil Licensing and Certification System,” 2021.
- [37] S. Flores-Torres, “Method for controlling electrical conductivity of lubricating oils in electric vehicle powertrains,” WO 2018/067903 A1, 2018
- [38] R. M. Mortier, M. F. Fox, and S. T. Orszulik, *Chemistry and Technology of Lubricants*. Springer Netherlands, 2010. doi: 10.1023/b105569.
- [39] J. Carlos Díaz Alvarez, ; Ramiro, M. Rey, and R. B. Acosta, “Líquidos iónicos: propiedades físicoquímicas y aplicación potencial en el mejoramiento de crudos pesados Ionic liquids: physicochemical properties and potential application in upgrading of heavy crude oils,” 2012.
- [40] A. Hernández Battez, M. Bartolomé, D. Blanco, J. L. Viesca, A. Fernández-González, and R. González, “Phosphonium cation-based ionic liquids as neat lubricants: Physicochemical and tribological performance,” *Tribology International*, vol. 95, pp. 118–131, Mar. 2016, doi: 10.1016/j.triboint.2015.11.015.
- [41] A. Mené López, D. Ana, E. Jiménez, B. Dra, D. María, and O. Bermúdez, “Líquidos iónicos como lubricantes del contacto titanio-acero a altas temperaturas.”, 2010.
- [42] Repsol and Sa, “BASE OILS GII-GIII Especialities,” 2017.
- [43] “DIGITAL CONDUCTIVITY METER MODEL 1153 OPERATION MANUAL,” 2005.
- [44] “LuSuTec: Lubrication and Surface Technology - MTM-2 Mini Traction Machine.” <https://personales.uniovi.es/web/lusutec/mtm-2-mini-traction-machine> (accessed Jun. 11, 2022).
- [45] “Microscopio electrónico de transmisión - JEM-F200 - Jeol - para análisis / de campo claro / de campo oscuro.” <https://www.directindustry.es/prod/jeol/product-20754-1789396.html> (accessed Jun. 11, 2022).
- [46] H. Spikes, “The history and mechanisms of ZDDP,” 2004.

- [47] M. Kano, Y. Mabuchi, and et al., "The effect of ZDDP in CVT fluid on increasing the traction capacity of belt-drive continuously variable transmissions," 1999.
- [48] M. T. Costello, "Effects of basestock and additive chemistry on traction testing," *Tribology Letters*, vol. 18, no. 1, pp. 91–97, Jan. 2005, doi: 10.1007/s11249-004-1761-z.
- [49] "Lubricant Additives Chemistry and Applications Second Edition."
- [50] Y. Zhou and J. Qu, "Ionic Liquids as Lubricant Additives: A Review, ACS Applied Materials & Interfaces," 2017.
- [51] J. Qu, W.C: Barnhill, and et al, "Synergistic effects between phosphonium-alkyl phosphate ionic liquids and zinc dialkyldithiophosphate (ZDDP) as lubricant additives," 2015.
- [52] B. Wang *et al.*, "Nano serpentine powders as lubricant additive: Tribological behaviors and self-repairing performance on worn surface," *Nanomaterials*, vol. 10, no. 5, May 2020, doi: 10.3390/nano10050922.
- [53] H. Okubo, C. Tadokoro, and S. Sasaki, "In situ Raman-SLIM monitoring for the formation processes of MoDTC and ZDDP tribofilms at Steel/Steel contacts under boundary lubrication," *Tribology Online*, vol. 15, no. 3, pp. 105–116, May 2020, doi: 10.2474/TROL.15.105.
- [54] A. Dorgham, A. Azam, P. Parsaeian, C. Wang, A. Morina, and A. Neville, "An Assessment of the Effect of Relative Humidity on the Decomposition of the ZDDP Antiwear Additive," *Tribology Letters*, vol. 69, no. 2, Jun. 2021, doi: 10.1007/s11249-021-01446-6.
- [55] A. Erdemir *et al.*, "Carbon-based tribofilms from lubricating oils," *Nature*, vol. 536, no. 7614, pp. 67–71, Aug. 2016, doi: 10.1038/nature18948.
- [56] A. Matamoros-Veloza *et al.*, "A highly reactive precursor in the iron sulfide system," *Nature Communications*, vol. 9, no. 1, Dec. 2018, doi: 10.1038/s41467-018-05493-x.
- [57] Z. Wang *et al.*, "Preparation and electrochemical properties of electrospun FeS/carbon nanofiber composites," *Ionics (Kiel)*, vol. 26, no. 6, pp. 3051–3060, Jun. 2020, doi: 10.1007/s11581-020-03455-2.
- [58] "ZINC SULFATE - Raman - Spectrum - SpectraBase." <https://spectrabase.com/spectrum/8wfgftjvmAH> (accessed Jul. 15, 2022).