



Universidad de Oviedo

ESCUELA SUPERIOR DE LA MARINA CIVIL DE GIJÓN

Trabajo Fin de Máster

Uso de líquidos iónicos en la formulación de
fluidos para transmisiones electrificadas

Para acceder al Título de Máster Universitario en

TECNOLOGÍAS MARINAS Y MANTENIMIENTO

Autor/a: Noelia Galafat Díaz

Tutor/a: Noelia Rivera Reyán

Rubén González Rodríguez

Febrero – 2024

RESUMEN

Existen instalaciones eléctricas en los buques que pueden requerir de lubricación por medio de aceite, como el caso de algunos motores eléctricos de gran potencia, o determinadas hélices. En estos casos, el lubricante debe cumplir una serie de características, tanto de comportamiento eléctrico, como refrigeración y asegurar una buena lubricidad. Los líquidos iónicos pueden ser utilizados como aditivos que favorezcan estas cualidades, pudiendo modificar el comportamiento tribológico y la conductividad de los aceites base. En este trabajo se estudia la influencia de cuatro líquidos iónicos diferentes, sobre tres fluidos de transmisión automática comerciales. De los cuatro líquidos iónicos, [EMIM][Tf₂N], [BMIM][Tf₂N], [BMIM][FeCl₄] y [EMIM][FeCl₄], dos de ellos, los dos últimos, contienen partículas magnéticas. Los fluidos de transmisión automática, o ATF's por sus siglas en inglés, difieren en la composición de su paquete de aditivos, así como su grupo, con la finalidad de simplificar la lectura, se denominará al del grupo I como ATF A, y a los otros dos, pertenecientes al grupo III, ATF B y ATF C. El estudio realizó con concentraciones del 0,5 y 3 %. La adición de los líquidos iónicos no supuso una diferencia significativa en la viscosidad de los fluidos de transmisión, aunque en algunas mezclas del 3% y a baja temperatura se pudo observar cambios, así tampoco modificó el comportamiento eléctrico de los fluidos de transmisión, manteniéndose todos en valores disipativos. Por último, en cuanto a su comportamiento tribológico, en líneas generales la adición de estos líquidos iónicos no supuso una mejora, salvo para el caso del [BIMI][FeCl₄] al 3% en los fluidos ATF B y ATF C, en cuyo caso se redujo el coeficiente de fricción y el volumen de desgaste.

El trabajo se compone de 6 capítulos. En el primero, con una breve introducción, el estado del arte de la tribología y los líquidos iónicos, además de los objetivos del estudio. El segundo capítulo especifica los materiales y métodos experimentales utilizados. El tercer capítulo, en el que se desarrollan y discuten los resultados obtenidos. El cuarto las conclusiones obtenidas. El quinto plantea posibles líneas futuras. Y, por último, la bibliografía empleada.

Palabras clave: Fluidos de transmisión automática; líquidos iónicos; tribología; conductividad eléctrica; coeficiente de fricción; volumen de desgaste.

ABSTRACT

There are electrical installations on ships that may require lubrication using oil, such as some high-power electric motors or certain propellers. In these cases, the lubricant must meet a series of characteristics, including electrical behaviour, cooling, and ensuring good lubricity. Ionic liquids can be used as additives to enhance these qualities, potentially modifying the tribological behaviour and conductivity of the base oils. This study investigates the influence of four different ionic liquids on three commercially available automatic transmission fluids. Of the four ionic liquids, [EMIM][Tf₂N], [BMIM][Tf₂N], [BMIM][FeCl₄], and [EMIM][FeCl₄], the latter two contain magnetic particles. Automatic transmission fluids, or ATFs, differ in their additive package composition and group. To simplify the reading, the one that belongs to group I will be called ATF A, and those that belong to group III ATF B and ATF C. The study was conducted with concentrations of 0.5% and 3%. The addition of ionic liquids did not significantly affect the viscosity of the transmission fluids, although some mixtures at 3% and low temperatures showed changes. It also did not alter the electrical behaviour of the transmission fluids, all of which remained within dissipative values. Finally, regarding tribological behaviour, in general, the addition of these ionic liquids did not lead to improvement, except for the [BMIM][FeCl₄] case at 3% in ATF B and ATF C fluids, where a reduction in friction coefficient and wear volume was observed.

The work consists of 6 chapters. The first provides a brief introduction, the state of the art of tribology and ionic liquids, as well as the study's objectives. The second chapter specifies the materials and experimental methods used. The third chapter develops and discusses the results obtained. The fourth chapter presents the conclusions drawn. The fifth suggests possible future lines of research. Finally, the bibliography used is included.

Keywords: Automatic transmission fluids; ionic liquids; tribology; electrical conductivity; friction coefficient; wear volume.

ÍNDICE

1.	Introducción, Estado del arte y Objetivos.....	1
1.1.	Tribología	4
1.1.1.	La fricción	4
1.1.2.	Desgaste.....	5
1.2.	Lubricación	6
1.2.1.	Tipos de lubricantes	8
1.2.2.	Aditivos	9
1.3.	Fluidos de transmisión.....	10
1.3.1.	Líquidos iónicos	11
1.4.	Objetivos	12
2.	Procedimiento experimental	13
2.1.	Materiales utilizados	13
2.1.1.	Líquidos iónicos y mezclas.....	13
2.2.	Preparación de las mezclas	14
2.3.	Viscosidad	15
2.4.	Conductividad Eléctrica	16
2.5.	Caracterización Tribológica	17
2.5.1.	Medida del Coeficiente de Fricción	17
2.5.2.	Estudio del volumen de desgaste.....	18
3.	Discusión de los Resultados.....	20
3.1.	Materiales utilizados	20
3.2.	Viscosidad	21
3.3.	Conductividad Eléctrica	25
3.4.	Coeficiente de fricción	30
3.5.	Volumen de desgaste.....	32
3.6.	Microscopio electrónico de barrido	35
4.	Conclusiones.....	38

5.	Líneas Futuras.....	39
6.	Bibliografía	40

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Previsión del aumento de la temperatura global [5].	1
Figura 2. Representación del derrame provocado por el petrolero Torrey Canyon [7].	2
Figura 3. Fuerzas que actúan sobre un cuerpo en movimiento.	4
Figura 4. Curva de Stribeck.	7
Figura 5. Curva de Stribeck y los regímenes de lubricación.	8
Figura 6. Mezcladora Centrífuga Planetaria Kakuhunter SK-300 SII.	15
Figura 7. Báscula de precisión RADWAG.	15
Figura 8. Viscosímetro de alta precisión rotacional Stabinger SVM 3001 [16].	15
Figura 9. Conductímetro digital Emcee Electronics [16].	16
Figura 10. Baño térmico en la placa calefactora IKA RCT Basic.	16
Figura 11. Tribómetro CETER UMT- 3.	17
Figura 12. Probetas de ensayo tras realizar la prueba.	18
Figura 13. Probeta colocada en el Tribómetro.	18
Figura 14. Microscopio Confocal Leica DCM3D.	19
Figura 15. Microscopio electrónico de barrido JEOL 6610LVS.	19
Figura 16. Muestra de ATF A con 5 % de [BMIM][Tf ₂ N].	21
Figura 17. Viscosidad dinámica de los ATFs puros frente a la temperatura.	21
Figura 18. Viscosidad dinámica frente a la temperatura del ATF A con una concentración de ILs al 0,5 %.	22
Figura 19. Viscosidad dinámica frente a la temperatura del ATF B con una concentración de ILs al 5%.	22
Figura 20. Viscosidad dinámica frente a la temperatura del ATF C con una concentración de ILs al 0,5%.	23
Figura 21. Viscosidad dinámica frente a la temperatura para el ATF A con una concentración ILs al 3%.	23
Figura 22. Viscosidad dinámica frente a la temperatura del ATF B con una concentración de ILs al 3 %.	24

Figura 23. Viscosidad dinámica frente a la temperatura del ATF C con una concentración de ILs al 3 %.	24
Figura 24. Conductividad eléctrica (CE) frente a la temperatura de los ATFs sin ILs.	25
Figura 25. Conductividad eléctrica (CE) frente a la temperatura para el ATF A con una concentración ILs al 0,5 %.	26
Figura 26. Conductividad eléctrica (CE) frente a la temperatura del ATF A con una concentración de ILs al 3 %.	26
Figura 27. Conductividad eléctrica (CE) frente a la temperatura del ATF B con concentraciones de ILs al 3 %.	27
Figura 28. Conductividad eléctrica (CE) frente a la temperatura del ATF B con concentraciones de ILs al 3 %.	27
Figura 29. Conductividad eléctrica (CE) frente a la temperatura del ATF C para concentraciones de ILs al 0,5 %.	28
Figura 30. Conductividad eléctrica (CE) frente a la temperatura para el ATF C con concentraciones de ILs al 3 %.	28
Figura 31. Diagrama de Walden para el ATF A con ILs al 3%.	29
Figura 32. Diagrama de Walden para el ATF B con ILs al 3%.	29
Figura 33. Diagrama de Walden para el ATF C con ILs al 3%.	29
Figura 34. Coeficiente de fricción (COF) frente a las concentraciones de ILs para el ATF A.	30
Figura 35. Coeficiente de fricción (COF) frente a las concentraciones de ILs para el ATF B.	31
Figura 36. Coeficiente de fricción (COF) frente a las concentraciones de ILs para el ATF C.	31
Figura 37. Volumen de desgaste frente a las concentraciones de IL para el ATF A.	33
Figura 38. Volumen de desgaste frente a las concentraciones de ILs para el ATF B.	33
Figura 39. Volumen de desgaste frente a las concentraciones de ILs para el ATF C.	34

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades fisicoquímicas de los líquidos iónicos utilizados.	13
Tabla 2. Propiedades de los líquidos de transmisión automática.....	14
Tabla 3. Contenido de elementos aditivos en los ATF comerciales no modificados..	14
Tabla 4. Viscosidad cinemática de las muestras de ATFs con ILs.....	20
Tabla 5. Imágenes del microscopio electrónico de barrido para las concentraciones de ILs para el ATF A.....	35
Tabla 6. Imágenes del microscopio electrónico de barrido para las concentraciones de ILs para el ATF B.....	36
Tabla 7. Imágenes del microscopio electrónico de barrido para las concentraciones de ILs para el ATF C.....	37

1. Introducción, Estado del arte y Objetivos

El efecto invernadero es un proceso natural en el cual los gases presentes en la atmósfera se calientan por acción de la radiación. Sin este proceso, la temperatura media de la Tierra sería de $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ [1]. Este fenómeno es crucial para la vida en nuestro planeta. Sin embargo, la actividad humana, especialmente desde la Revolución Industrial, ha incrementado de manera exponencial las emisiones de gases de efecto invernadero, acelerando transformaciones climáticas en apenas décadas que, de forma natural, tardarían cientos de años en ocurrir [2].

Se estima que, en los próximos cinco años, la temperatura media global en la superficie será entre $1,44 - 1,55\text{ }^{\circ}\text{C}$ superior a la media en la época preindustrial, definida como el promedio entre 1850 y 1900. La Figura 1 muestra la progresión esperada de la temperatura media del planeta. Esto ha llevado a la adopción, por parte de las Naciones Unidas, en septiembre de 2015 de un plan de acción internacional, conocido como La Agenda para el Desarrollo Sostenible 2030. Uno de los principales objetivos de esta agenda es combatir el cambio climático y sus impactos a través de diversas medidas. Para lograr un desarrollo sostenible, se busca reducir las emisiones de gases de efecto invernadero al menos en un 55 % en comparación con los niveles de 1900. Esta reducción es fundamental para contrarrestar los efectos negativos del cambio climático y avanzar hacia un futuro más sostenible [3, 4].

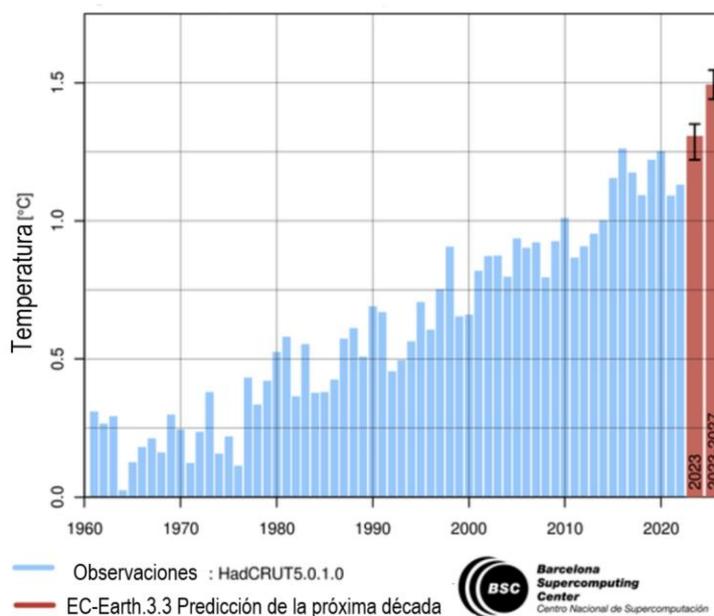


Figura 1. Previsión del aumento de la temperatura global [5].

En este contexto, es importante destacar que el transporte marítimo representa un 77 % del comercio exterior europeo, y un 35 % del comercio total entre los estados miembros de la Unión Europea [5]. El Informe Ambiental del Transporte Marítimo Europeo (EMTER, por sus siglas en inglés), publicado por la Agencia Europea del Medio ambiente, y La Agencia Europea de Seguridad Marítima, revela que los buques son responsables del 13,5 % de todas las emisiones de gases efecto invernadero del sector transporte [6]. Estos datos subrayan la importancia de abordar las emisiones en el sector marítimo para alcanzar los objetivos de desarrollo sostenible establecidos por la Agenda 2030. Reducir las emisiones en el transporte marítimo es fundamental para contribuir a la lucha contra el cambio climático y avanzar hacia un sistema de transporte más sostenible en beneficio del planeta y las futuras generaciones.

Además de la contaminación por gases de efecto invernadero, el transporte marítimo también contribuye a la contaminación debido a los vertidos accidentales o causados por el funcionamiento de las embarcaciones. Han ocurrido diversos accidentes que han causado graves daños en los mares y ecosistemas, como el caso del Torrey Canyon un petrolero de 120.000 Toneladas que el 18 de marzo de 1967 se hundió tras embarrancar en el arrecife de las Islas Scilly, provocando una mancha de crudo en el Canal de la Mancha. La Figura 2 muestra un esquema de la extensión aproximada de la mancha de crudo [7].

Otros casos destacados fueron el del buque Exxon Valdez, un buque tanque que transportaba crudo, cuando en 1989 embarrancó en las costas de Alaska provocando un derrame que llegó a alcanzar 20.000 km de costa, e innumerables daños al ecosistema de la zona. Y el desastre del Prestige, el 12 de noviembre de 2002, considerado como el mayor desastre medioambiental hasta el momento. Estos accidentes han causado daños significativos en la fauna, flora y fondo marino [8].

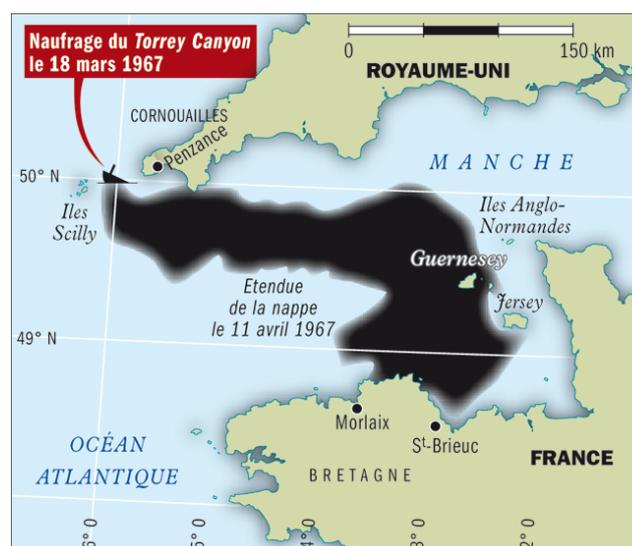


Figura 2. Representación del derrame provocado por el petrolero Torrey Canyon [7].

Estos son solo algunos ejemplos de accidentes causado por buques mercantes. Por ello surge la necesidad de aplicar una normativa y procedimientos que reduzcan al mínimo posible estos sucesos. El accidente del Torrey Canyon se considera el precursor del Convenio Internacional para la Prevención de la Contaminación por Buques (MARPOL), que incluye seis anexos en los que se abordan diferentes tipos de contaminantes:

Anexo I: Reglas para prevenir la contaminación por hidrocarburos

Anexo II: Reglas para prevenir la contaminación por sustancias nocivas líquidas transportadas a granel

Anexo III: Reglas para prevenir la contaminación por sustancias perjudiciales transportadas por mar en bultos

Anexo IV: Reglas para prevenir la contaminación por aguas sucias de los buques

Anexo V: Reglas para prevenir la contaminación por basuras de los buques

Anexo VI: Reglas para prevenir la contaminación atmosférica ocasionada por los buques [9]

“50 Años del Marpol: Nuestro compromiso continúa” fue el lema seleccionado por La Organización Marítima Internacional (OMI) para el Día Marítimo Mundial, celebrado el 28 de septiembre de 2023. Este lema refleja el compromiso de la OMI con el medio ambiente frente a las consecuencias del transporte marítimo, haciendo uso de una regulación sólida y en continua mejora [10].

En consonancia con los objetivos de la Agenda 2030, la OMI ha reconocido la necesidad urgente de introducir mejoras y medidas para lograr un transporte marítimo más sostenible [10]. Esto incluye la promoción de la investigación y el desarrollo de tecnologías más limpias, así como la adopción de prácticas y regulaciones más estrictas para prevenir la contaminación y reducir las emisiones.

En este contexto, se están llevando a cabo diversas investigaciones, como el desarrollo de lubricantes con un menor impacto medioambiental, con el objetivo de conservar y prevenir la contaminación de los mares y océanos. Estas iniciativas son fundamentales para avanzar hacia un transporte marítimo más sostenible y proteger los ecosistemas marinos, en línea con los objetivos establecidos por la Agenda 2030.

Es importante destacar que la transición hacia un transporte marítimo más sostenible, no solo contribuirá a la protección del medio ambiente, sino que también promoverá un desarrollo económico sostenible y asegurará un futuro más próspero para las generaciones venideras [11, 12].

1.1. Tribología

La tribología es la ciencia que estudia la interacción entre superficies sólidas en contacto, que están en movimiento. El concepto de tribología procede del griego “Tribos” que significa “roce”, por ello se puede traducir literalmente como la ciencia que estudia el roce [13].

En 1966, el ingeniero mecánico Peter H. Jost estableció el concepto de tribología que se utiliza en la actualidad, tras la publicación del conocido informe Jost [14]. En él se plantea el impacto económico de la tribología, asegurando los beneficios económicos que podrían obtenerse de una optimización de los procesos en los que haya rozamiento [17]. Los resultados del informe daban a conocer que el ahorro de un correcto tratamiento de la fricción y el desgaste haría posible el ahorro de hasta 515 millones de libras esterlinas, lo que impulsó diversas líneas de investigación en el campo de la tribología.

1.1.1. La fricción

La fricción es la resistencia al movimiento entre dos superficies en contacto, esta fuerza no se debe a características propias de cada material, si no a factores superficiales, o mecánicos de las fuerzas externas que interactúen. Las causas de la fricción son la rugosidad superficial de cada material, la adhesión entre ellos, la existencia de partículas libres o la existencia de capas contaminantes entre ambas superficies [15].

En un Sistema en el que se conoce la fuerza normal que actúa sobre dos superficies en contacto se puede calcular el coeficiente de fricción. En la Figura 3 se muestran las fuerzas que actúan sobre un cuerpo, siendo W la fuerza que se ejerce por acción de la gravedad, debido al peso del cuerpo, F la fuerza aplicada para mover el objeto, Fr la fuerza de rozamiento o de fricción, y N la fuerza normal, reacción al peso.

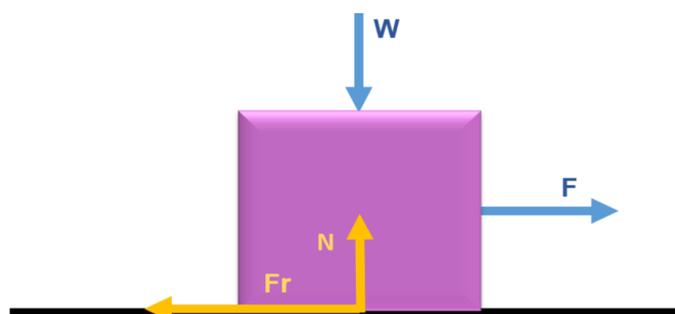


Figura 3. Fuerzas que actúan sobre un cuerpo en movimiento.

El coeficiente de fricción proporciona una medida de la magnitud de la fuerza de rozamiento, estableciendo una relación entre esta fuerza y la fuerza normal que actúa en el sistema, o con la carga aplicada cuando es igual a la fuerza normal. En la ecuación 1 se muestra la fórmula del coeficiente de fricción en función de la fuerza rozamiento.

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

Donde:

μ Es el coeficiente de fricción.

Fr es la fuerza de rozamiento expresada en Newton (N).

N es la fuerza normal expresada en Newton (N).

W es la acción de la gravedad por el peso expresada en Newton (N).

El coeficiente de fricción es un parámetro adimensional que se obtiene mediante ensayos a distintos materiales, y en distintos sistemas tribológicos [16].

Existen diversos tipos de fricción, fricción por deslizamiento, y fricción por rodadura, en el caso de la fricción por rodadura las superficies en contacto son mucho menores a la fricción por deslizamiento. En la fricción por rozadura los elementos tienen una rugosidad superficial (R_a) muy pequeña. La fricción por deslizamiento se da en superficies mucho mayores, por lo que la superficie en contacto es mucho mayor. Es de este segundo tipo de fricción del que se deduce la Ecuación 1 [17].

1.1.2. Desgaste

Se conoce como desgaste a la pérdida de material producida entre dos superficies rígidas en movimiento relativo entre sí debido a su interacción. El desgaste supone un gran coste de mantenimiento y es una de las principales causas de averías, por lo tanto, es crucial conocer las causas que lo provocan y los tipos de desgaste que pueden producirse.

Los mecanismos de desgaste pueden ser de tipo mecánico, tales como:

Abrasión: Se produce por la interacción de un material más duro con otro más blando, o en el caso de que existan partículas abrasivas.

Erosión: En este caso, el desgaste es debido al efecto de un fluido que transporta partículas abrasivas.

Adhesión: Este tipo de desgaste se produce cuando una superficie dura arranca material de una superficie más blanda debido a las rugosidades superficiales. El material arrancado de la superficie más blanda se adhiere al material más duro, incrementándose con el tiempo y pudiendo generar microsoldaduras.

Fatiga superficial: Es el desgaste que se da cuando las superficies están expuestas a cargas cíclicas. En estos casos, se pueden generar grietas que van creciendo con el número de ciclos, pudiendo dar lugar al desprendimiento de partículas.

Fretting: Es un tipo de desgaste por fatiga, en el que el fenómeno se produce en las superficies en contacto en las que existen desplazamientos de poca amplitud. La iniciación y crecimiento de las grietas en este tipo de fatiga en su mayoría, se deben a las producidas por el contacto entre los elementos, dando lugar a tensiones locales que producen un efecto similar a un concentrador de tensiones.

Por otra parte, también existe el desgaste debido a acciones químicas, que sería el caso del desgaste por corrosión. En este caso la superficie de los materiales sufre modificaciones químicas que dan lugar a deterioro y pérdida de material.

Como se ha mencionado, hay factores que favorecen la aparición de desgaste, como la diferencia de dureza en los materiales, la presencia de partículas abrasivas, y especialmente la falta de lubricación.

1.2. Lubricación

Era conocido en el antiguo Egipto que la aplicación de una capa de fluido entre dos superficies rígidas en contacto reduce considerablemente la fricción y el desgaste de los materiales, y por tanto también el consumo en máquinas que tengan piezas en rozamiento, y además, previene posibles averías. Este proceso se denomina lubricación [18]. Los lubricantes pueden ser de distinta naturaleza, y en la industria, los más comunes son los aceites de origen mineral. Sin embargo, también existen otros lubricantes, como pueden ser las grasas, o lubricantes sintéticos [16].

Además de con la función de reducir el rozamiento y prevenir el desgaste entre las piezas, los lubricantes deben cumplir con una serie de requisitos en función del equipo en el que se apliquen. Entre ellos, se encuentran la disipación del calor generado por la propia fricción, la prevención de la oxidación y la corrosión de los materiales, la eliminación de las posibles partículas en suspensión que pudieran dañar las superficies, la capacidad de amortiguar ruidos y vibraciones, prevenir a la intemperie, y en algunos casos transmitir la potencia [17].

En la Figura 4 se muestra la curva de Stribeck, que establece los distintos regímenes de lubricación según el espesor de la película de lubricante que exista entre las dos superficies. Estos regímenes se dividen en tres secciones: lubricación límite (sección uno), lubricación mixta (sección dos, donde destaca la lubricación elasto-hidrodinámica) y lubricación hidrodinámica (sección tres) [22].

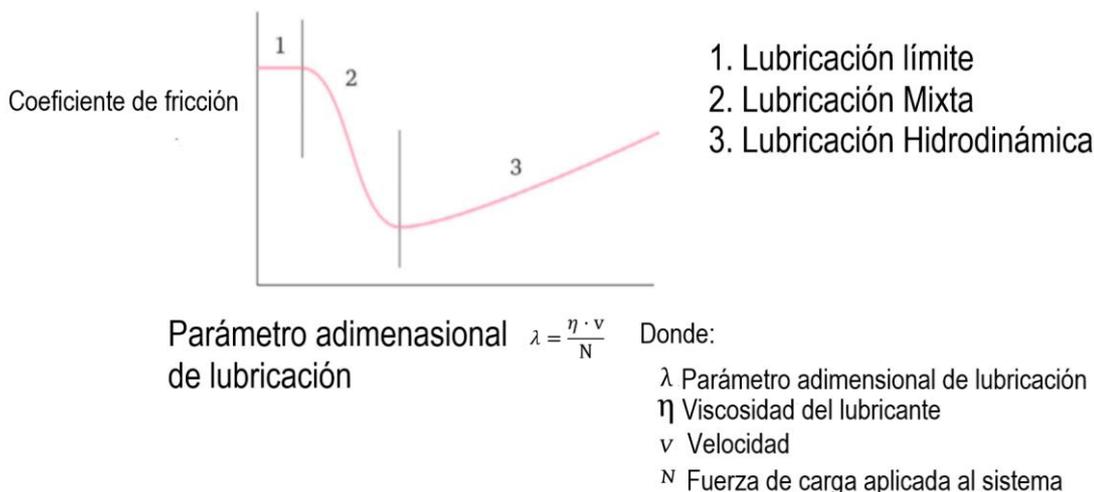


Figura 4. Curva de Stribeck.

Lubricación límite: En este caso, la película de lubricante entre ambas superficies es menos gruesa que las rugosidades superficiales, de tal manera que las piezas están en contacto. La lubricación límite suele tener aplicación en aquellos casos en los que las velocidades de trabajo son muy bajas, o si la carga unitaria es muy elevada. En estos casos el coeficiente de fricción suele oscilar en valores entre 0,1 y 0,2 [17].

Lubricación mixta: En este caso, existen pequeñas rugosidades que llegan a estar en contacto, y se puede decir que la suma de las rugosidades y el grosor de la capa de lubricante es equivalente. Para la lubricación mixta se obtienen valores de coeficiente de fricción que varían de 0,002 a 0,1 [19].

Lubricación Elasto-hidrodinámica: Este régimen podría enmarcarse como lubricación mixta, ya que existen rugosidades que llegan a estar en contacto, aunque esta superficie en contacto es muy pequeña. En este caso, la carga unitaria aplicada y la variación de la viscosidad del lubricante, en función de la presión, son factores muy importantes [20].

Lubricación Hidrodinámica: En este régimen, la película de lubricante entre las dos superficies es de mayor grosor que la suma de las rugosidades. En las situaciones en las que no interesa que se produzca fricción este sería el régimen ideal, ya que presenta los menores valores para el coeficiente de fricción, reduce el desgaste y las averías. Los valores del coeficiente de fricción suelen estar comprendidos en valores de 0,002 y 0,01 [21]. En la Figura 5 se representa gráficamente los diferentes regímenes de lubricación en función del espesor de la película de lubricante.

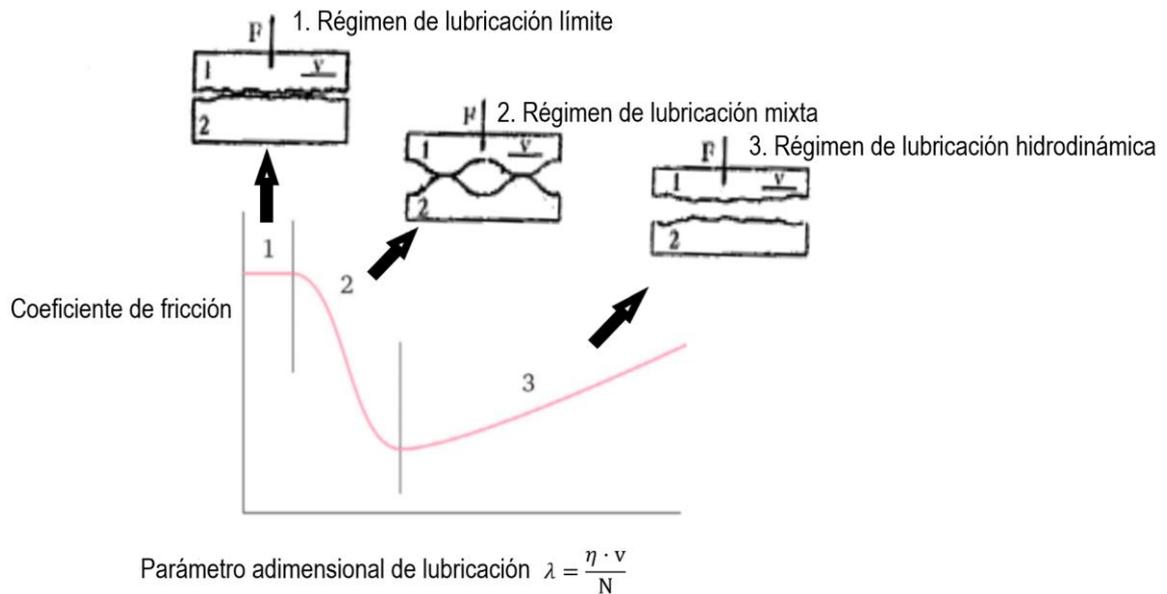


Figura 5. Curva de Stribeck y los regímenes de lubricación.

1.2.1. Tipos de lubricantes

Aceites Biológicos: Los lubricantes biológicos son los de origen animal o vegetal, son biodegradables y, por tanto, los más amables con el medio ambiente, y menos tóxicos. Aunque la biodegradabilidad es una cualidad interesante para los lubricantes, también supone una desventaja, ya que favorece la degradación del lubricante, acortando su rango de trabajo y durabilidad. Esto implica que su estabilidad frente a la oxidación y al almacenamiento, a largo plazo, es inferior a la de los aceites de origen mineral, o que su rango de temperaturas de trabajo es bastante inferior [22].

Aceites Minerales: Los aceites de origen mineral se obtienen de la destilación del petróleo, compuestos, en su mayoría, por hidrocarburos. Estos aceites son lo más utilizados, ya que tienen un mayor rango de trabajo, presentando mayor estabilidad frente a las variaciones de temperatura, a la oxidación, y pudiendo conservarse durante largos periodos de tiempo, además de que su obtención es más económica que la de los aceites sintéticos. La principal desventaja reside en que son contaminantes y tóxicos para el medio ambiente [23].

Aceites Sintéticos: Los aceites sintéticos tienen origen mineral, pero se lleva a cabo un proceso de refinado mucho más específico y costoso que en los aceites minerales convencionales. El proceso de refinado produce aceites de mayor calidad y pureza, eliminando las impurezas, y mejorando las prestaciones del lubricante.

Los aceites sintéticos son lo más estables frente a las cargas de trabajo, tanto en cuando a la oxidación, como a rango de temperaturas, protección contra la formación de

depósitos y demás, pero debido a sus elevados costes de producción se limitan a aquellos casos específicos en los que los lubricantes de origen mineral no cumplen con las demandas de funcionamiento [24].

1.2.2. Aditivos

Los aceites se aditivan con diferentes sustancias con la finalidad de mejorar sus prestaciones y durabilidad, las características más comunes que se pretenden alcanzar con estos aditivos son:

Mejorar el índice de viscosidad: El objetivo es mantener estable la viscosidad del lubricante ante las variaciones de temperatura, para ello se utilizan diferentes polímeros, siendo los más comunes polimetacrilato, copolímeros de hidrocarburos etilénicos, copolímeros mixtos y derivados de estireno.

Aditivos anti-desgaste: Tienen la función de mejorar la acción anti-desgaste el lubricante, formando una capa protectora sobre las superficies de trabajo. Los más comunes son los alquilo-ditiofosfatos de zinc y de numerosos derivados fosforados.

Aditivos antioxidantes: Tienen la finalidad de retrasar la oxidación del aceite. Habitualmente se componen de ditiofosfatos, utilizados también como anti-desgaste, además también se utilizan fenoles.

Aditivos detergentes: Evitan la formación de depósitos, especialmente en aquellos equipos que trabajan a altas temperaturas, o en los que hay combustión, como en los motores. Se componen más comúnmente por sales metálicas de calcio o de magnesio.

Aditivos de basicidad: Se utilizan para mantener el pH del lubricante en un valor deseable, neutralizando los ácidos que se forman por el funcionamiento del equipo, como en el caso de los motores de combustión. Se componen de fenoles, sulfatos y silicatos, aunque hay caos en los que se añaden carbonatos o hidróxidos.

Aditivos dispersantes: Tienen la finalidad de mantener en suspensión todas las impurezas limpiadas por los aditivos detergentes. Generalmente están formados por compuestos polares de la familia de los alquenilsuccinioamidas.

Aditivos anticorrosivos: Impiden el ataque corrosivo a las superficies ferrosas en aquellos casos en los que pueda existir presencia de agua en el aceite, o del aire. Se componen, normalmente, de sulfonatos alcalinos o alcalino-terrosos, neutros o básicos.

Aditivos anticongelantes: Bajan la temperatura de congelación de los lubricantes, manteniéndolos bombeables a bajas temperaturas. Suele tratarse de los copolímeros maleatoestireno, de las parafinas naftalenas, y de los poliésteres de tipo acetato de vinilo-fumarato.

Aditivos anti-espuma: Evitan la aparición de burbujas en el fluido. Puede tratarse de aceites de silicona, o acrilatos de alquilo.

Aditivos de extrema presión: Tienen el objetivo de proteger a las superficies de grandes cargas. Normalmente se trata de derivados órgano-metálicos del molibdeno, y algunos derivados de ácidos grasos [25].

1.3. Fluidos de transmisión

Los fluidos de transmisión automática, cuyas siglas en inglés son ATF, tienen como objetivo proteger los componentes mecánicos de la transmisión. Por lo general, estos fluidos son aceites de origen mineral. Los ATF, deben cumplir con los requisitos habituales de los lubricantes y proporcionar un nivel de fricción adecuado para permitir el embrague [26].

Los aceites minerales son lo más usados como líquidos de transmisión, ya que tienen una muy buena combinación de características técnicas y precio. Son productos derivados del petróleo, que se obtienen tras un proceso de destilación y refinado. Este tipo de lubricantes son altamente contaminantes y tóxicos para el medio ambiente. En el siglo XX se desarrollaron los aceites sintéticos, con la finalidad de que sustituyeran a los minerales, pero debido a su elevado costo solo se utilizan en aplicaciones muy específicas, en las que los aceites minerales no puedan garantizar un funcionamiento seguro [16].

Los fluidos de transmisión automática deben cumplir una serie de características específicas, para ello se utilizan diferentes paquetes de aditivos que aporten o favorezcan estas cualidades. Las proporciones más comunes suelen estar en una proporción de entre el 80 y el 95 % de aceite mineral base, y entre el 5 y el 20 % de paquete de aditivos [17].

Los fluidos de transmisión automática con uso en motores eléctricos, deben cumplir algunos requisitos adicionales a los fluidos de transmisión con aplicación en elementos puramente mecánicos, puesto que están sometidos a grandes corrientes eléctricas y campos magnéticos [27].

Es importante tener en cuenta los valores de conductividad, puesto que podría producirse cortocircuitos entre el lubricante y la carcasa del motor si la conductividad eléctrica es muy elevada. Sin embargo, también existe la posibilidad de que se den acumulaciones de carga, dando lugar a deterioro de algunos elementos, además de la aparición de polaridad en la película de lubricante más próxima a las superficies cargadas, originándose oxidación. Por esta razón algunos fabricantes han estudiado la variación de conductividad eléctrica en función de la temperatura, y es necesario que los ATF tengan capacidad de conducción eléctrica dentro de valores disipativos [28].

1.3.1. Líquidos iónicos

Los líquidos iónicos son sales que se encuentran en estado líquido por debajo de los 100 °C. Están compuestos por un catión orgánico, y un anión, que puede ser orgánico o no. Se diferencian de otras sales por están compuestas por iones asimétricos, de manera que las fuerzas de unión entre los iones son más débiles que en otras sales. Esto les confiere a los líquidos iónicos una serie de características de interés, como baja volatilidad, un punto de fusión bajo, un alto punto de ebullición, estabilidad térmica y química, no son inflamables, además, poseen una alta viscosidad [29].

Una de las propiedades destacadas de los líquidos iónicos es su alta viscosidad, lo que les permite formar una capa lubricante resistente y duradera entre las superficies en contacto. Esta capa lubricante reduce significativamente la fricción y el desgaste, protegiendo eficazmente los materiales de la maquinaria y prolongando su vida útil [30, 31].

Además de su viscosidad, los líquidos iónicos exhiben una excelente estabilidad térmica y química. Esto significa que pueden soportar altas temperaturas y resistir la oxidación y la degradación química, lo cual es fundamental en aplicaciones donde se generan condiciones de alta fricción y calor. Su estabilidad les permite mantener sus propiedades lubricantes incluso en entornos adversos y exigentes [32].

Otra propiedad destacada de los líquidos iónicos es su capacidad para formar una película lubricante uniforme y adherente en las superficies metálicas. Esta película lubricante se adhiere a las rugosidades de las superficies, llenando los espacios microscópicos y evitando el contacto directo entre ellas. De esta manera, los líquidos iónicos reducen la fricción y el desgaste, proporcionando una lubricación eficiente y mejorando el rendimiento de la maquinaria [33, 34].

Además de sus propiedades lubricantes, los líquidos iónicos presentan otras ventajas importantes. Son no volátiles, lo que significa que no se evaporan fácilmente, lo cual es beneficioso para aplicaciones de larga duración. También son no inflamables y tienen una baja toxicidad, lo que los hace más seguros y respetuosos con el medio ambiente en comparación con algunos lubricantes convencionales [35].

En resumen, los líquidos iónicos destacan por sus propiedades lubricantes excepcionales, como su alta viscosidad, estabilidad térmica y química, capacidad de formar una película lubricante adherente y resistente, y su no volatilidad. Estas características los convierten en lubricantes prometedores en una amplia gama de aplicaciones industriales donde se requiere una lubricación eficiente y duradera.

1.4. Objetivos

El objetivo general de este trabajo fin de máster es estudiar la factibilidad del uso de líquidos iónicos en la formulación de fluidos de transmisión automática.

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

- Seleccionar los líquidos iónicos, paquete de aditivos y aceites bases necesarios para la preparación de las mezclas lubricantes
- Preparar las mezclas lubricantes para su estudio
- Evaluar la influencia en el comportamiento tribológico (coeficiente de fricción y desgaste)
- Determinar la influencia del tipo de líquido iónico y su concentración en los resultados tribológicos
- Determinar el mecanismo de desgaste

2. Procedimiento experimental

2.1. Materiales utilizados

2.1.1. Líquidos iónicos y mezclas

En el presente estudio se utilizaron cuatro líquidos iónicos comerciales suministrados por IOLITEC como aditivos en tres aceites de transmisión automática (siglas en inglés: ATF), en la Tabla 1 se muestran sus propiedades. Los ATFs se formularon mezclando dos aceites minerales como fluido base y un paquete de aditivos de uso común en la industria. Las propiedades de estos componentes se detallan en las Tabla 2 y 3. Posteriormente, se añadieron los líquidos iónicos, cuyas características de muestran en la Tabla 1, como aditivos en dos concentraciones diferentes: 0,5 % y 3,0 % en peso. Para mantener la concentración total de aditivos, la cantidad del paquete de aditivos se redujo en proporción.

Tabla 1. Propiedades fisicoquímicas de los líquidos iónicos utilizados.

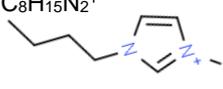
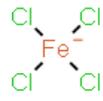
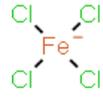
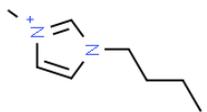
IL	Catión	Anión
1-Butyl-3-methylimidazolium Tetrachloroferrate [BMIM][FeCl ₄] Formula empírica: C ₈ H ₁₅ Cl ₄ FeN ₂ Pureza: > 97% Peso molecular: 336.87	1-butyl-3-methyl- 1H-imidazol-3-ium C ₈ H ₁₅ N ₂ ⁺ 	Cloruro férrico FeCl ₃ 
1-Ethyl-3-methylimidazolium Tetrachloroferrate [EMIM][FeCl ₄] Formula empírica: C ₆ H ₁₁ Cl ₄ FeN ₂ Pureza: 98% Peso molecular: 308.8	1-Ethyl-3- methylimidazolium C ₆ H ₁₁ N ₂ ⁺ 	Cloruro férrico FeCl ₃ 
1-Butyl-3-methylimidazolium bis (trifluoromethylsulfonyl) ime [BMIM][Tf ₂ N] Formula empírica: C ₁₀ H ₁₅ F ₆ N ₃ O ₄ S ₂ Pureza: 98% Peso molecular: 419.4	1-butyl-3-methyl- 1H-imidazol-3-ium 	1,1,1-Trifluoro-N- ((trifluoromethyl)sulfonyl)methanesulfonamide 
1-Ethyl-3-methylimidazolium bis (trifluoromethyl sulfonyl) imide [EMIM][Tf ₂ N] Formula empírica: C ₈ H ₁₅ Cl ₄ FeN ₂ pureza: > 97% Peso molecular: 419.4	1-Ethyl-3- methylimidazolium C ₆ H ₁₁ N ₂ ⁺ 	1,1,1-Trifluoro-N-((trifluoromethyl) sulfonyl) methanesulfonamide 

Tabla 2. Propiedades de los líquidos de transmisión automática.

ATFs	Aceites base (Peso %)	Aditivos (Peso %)	Viscosidad cinemática (mm ² /s)		IV
			40 °C	100 °C	
A	Grupo I (77.7)	11,70	44.312	7.968	153
	Grupo I (10.6)				
B	Grupo III (38.3)	11,00	28.515	5.787	150
	Grupo III (50.7)				
C	Grupo III (45.0)	17,00	33.787	7.122	180
	Grupo III (38.0)				

Tabla 3. Contenido de elementos aditivos en los ATF comerciales no modificados.

Elementos aditivos	Estándares	ATF A	ATF B	ATF C
Ca, ppm	ASTM D 4951	150 – 240	–	170 – 220
B, ppm	ASTM D 4951	78	59 – 88	140 – 210
P, ppm	ASTM D 4951	160 – 250	136 – 194	410 – 540
Zn, ppm	ASTM D 4951	–	20	–
S, %	ISO 8754		0.192	0.066
N, %	ASTM D 5291	0.105 – 0.162	–	–

2.2. Preparación de las mezclas

La preparación de las muestras se llevó a cabo utilizando una mezcladora centrífuga planetaria (Kakuhunter SK-300 SII), que se muestra en la Figura 6, durante 10 minutos a una velocidad de 1600 rpm. Durante este tiempo y a esta velocidad, se consiguió una mezcla homogénea de los aceites base ATF, el porcentaje del paquete de aditivos y el líquido iónico correspondiente. Estos procedimientos permitieron obtener diferentes formulaciones de ATF con concentraciones variables de líquidos iónicos como aditivos.



Figura 6. Mezcladora Centrífuga Planetaria Kakuhunter SK-300 SII.

Las muestras se prepararon calculando las cantidades de cada componente en tanto por ciento en peso, para ello se utilizó una báscula de precisión RADWAG, modelo AS 310.R2 PLUS, con una capacidad máxima de 310 g, y una precisión de 0,1 mg, se puede ver en la Figura 7.



Figura 7. Báscula de precisión RADWAG.

2.3. Viscosidad

El estudio de viscosidad se hizo mediante el viscosímetro de alta precisión rotacional Stabinger SVM 3001 (Figura 8). Se caracterizó para un rango de temperaturas de 20 a 125 °C, en saltos de 5 °C. El equipo obtiene resultados de densidad y viscosidad dinámica, y a partir de estos datos calcula los valores de viscosidad cinemática e índice de viscosidad.



Figura 8. Viscosímetro de alta precisión rotacional Stabinger SVM 3001 [16].

2.4. Conductividad Eléctrica

Los ATF han de cumplir con unas características de conductividad eléctrica específicas, por ello se realizaron ensayos de conductividad a 20 °C, a 80 °C y a 130 °C con el conductímetro digital EMcee Electronic 1153, con un rango de conductividad de 0 a 20 pS/cm, con una precisión del 1 %. El método de medición del equipo consiste en generar una caída de tensión constante, por el fluido, mediante dos electrodos concéntricos, que produce una corriente de pequeña intensidad, que se amplifica para su lectura en la pantalla del equipo (Figura 9).



Figura 9. Conductímetro digital Emcee Electronics [16].

Las medidas se hicieron calentando las muestras en un baño de agua (Figura 10), colocado sobre una placa calefactora, modelo IKA RCT basic, con un rango de temperatura de 5 a 310 °C, y una capacidad máxima de 20 l. En este proceso, una vez las muestras alcanzaron la temperatura deseada, controlada mediante un termómetro de alcohol introducido en la muestra. Una vez estabilizada la temperatura deseada, se procedió a la medición de la conductividad eléctrica.

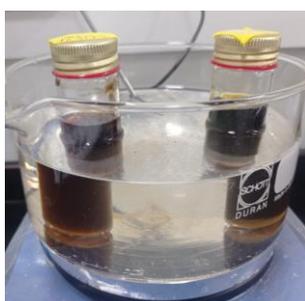


Figura 10. Baño térmico en la placa calefactora IKA RCT Basic.

Las medidas de conductividad eléctrica requieren que el sensor del equipo tenga una temperatura estable, para ello se introdujo el dispositivo en las muestras calentadas, y se esperó 1 minuto, tras lo que se realizó la medida durante 3 segundos.

2.5. Caracterización Tribológica

En la caracterización tribológica se estudió el comportamiento de las distintas muestras a fricción y desgaste, utilizando un tribómetro y distintos microscopios.

2.5.1. Medida del Coeficiente de Fricción

El coeficiente de fricción se determinó por medio de ensayos de rodadura/deslizamiento, llevado a cabo con el Tribómetro CETER UMT- 3 que se puede ver en la Figura 11.

El funcionamiento del equipo consiste en mover la superficie plana en relación a la bola, que se encuentra fija en la parte superior. Previo a iniciar el movimiento se determina una distancia de desplazamiento en vaivén, así como una fuerza normal fija, y con estos valores preestablecidos, se obtiene el valor del coeficiente de fricción, que calcula de forma automática el propio tribómetro, con soporte de un programa de ordenador. La carga aplicada y el par se miden por medio de sensores de galgas, que transmiten la información al software.



Figura 11. Tribómetro CETER UMT- 3.

Los materiales utilizados para los ensayos fueron unas bolas de acero AISI 52100 de diámetro 19,05 mm, con una dureza de 800-920 Hv, y una rugosidad superficial menor a 0,02 μm , y como superficie plana discos de acero AISI 52100 de diámetro 46 mm, con una dureza inferior a la de las bolas, de 720-780 HV, con una rugosidad superficial inferior a 0,02 μm (Figura 12).



Figura 12. Probetas de ensayo tras realizar la prueba.

Los ensayos comenzaron por la limpieza de las probetas, para ello se introdujeron en heptano, y se colocaron en la máquina de ultrasonidos por 10 minutos, tras lo que se secaron con aire caliente. Una vez realizada la limpieza se pusieron en el tribómetro, tal como se ve en la Figura 13. La prueba realizada consistió en hacer rozar la bola contra la pieza metálica más blanda con una capa de lubricante de 0,6 ml, con una carga de 10 N durante 60 minutos, a 100 °C con una frecuencia de 15 Hz. Este proceso se realizó con cada muestra, realizando al menos dos réplicas de cada uno.

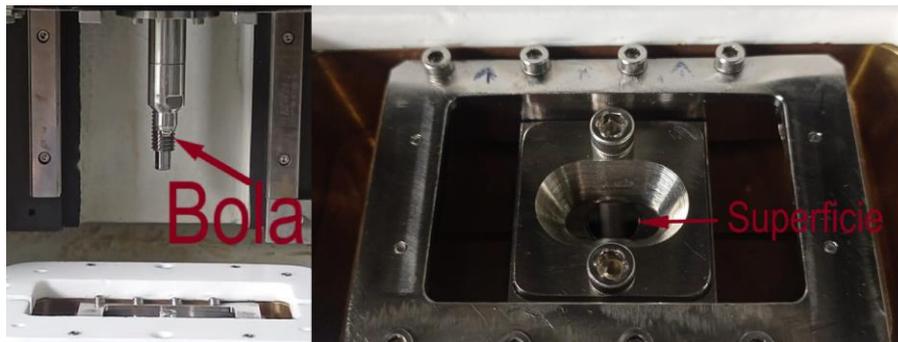


Figura 13. Probeta colocada en el Tribómetro.

Concluidos los ensayos, y obtenidos los valores del coeficiente de fricción, se procedió a la limpieza de las probetas, que se hizo con acetona, heptano y etanol, 10 minutos en la máquina de ultrasonidos respectivamente, y finalmente se secaron con aire caliente, para su posterior estudio al microscopio.

2.5.2. Estudio del volumen de desgaste

Tras realizar los ensayos de rozadura se procedió a medir en volumen de desgaste, mediante el microscopio óptico confocal Leica DCM 3D, que utiliza un método de medición no destructivo, empleando perfilometría óptica. En la Figura 14 se puede observar el microscopio confocal, durante la medición de una probeta.



Figura 14. Microscopio Confocal Leica DCM3D.

El microscopio tiene una resolución de hasta 0,1 nm, gracias a combinar la tecnología confocal y la interferometría. Además, tiene la capacidad de medir a gran velocidad y realizar imágenes confocales y de campo claro a la misma vez.

Tras determinar el volumen de desgaste se procedió a enviar las muestras a los servicios científico técnicos de la universidad de Oviedo, con objetivo de estudiar las probetas con el microscopio electrónico de barrido para conocer el mecanismo de desgaste.

El equipo utilizado fue el microscopio electrónico de barrido JEOL 6610LV SEM (Figura 15 con cañón de electrones de filamento de tungsteno con un voltaje de aceleración de 20 kV, la resolución máxima es de 3,0 nm, con un total de aumentos de abarca des de 5 a 50.000, además dispone de un detector de electrones secundarios. El sistema cuenta con un equipo de microanálisis integrado, que dispone de 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.



Figura 15. Microscopio electrónico de barrido JEOL 6610LVS.

3. Discusión de los Resultados

3.1. Materiales utilizados

En la Tabla 4 se muestran los valores de viscosidad cinemática a 40 y 100 °C, y el índice de viscosidad de las muestras estudiadas.

Tabla 4. Viscosidad cinemática de las muestras de ATFs con ILs.

ATFs	IL	IL (%)	Viscosidad cinemática (mm ² /s)		VI	
			40 °C	100 °C		
A	[BMIM][FeCl ₄]	0,5	39,510	7,677	167	
		3	39,553	7,677	167	
	[BMIM][Tf ₂ N]	0,5	39,869	7,793	170	
		3	40,138	7,716	165	
	[EMIM][FeCl ₄]	0,5	41,272	7,767	161	
		3	43,946	8,108	160	
	[EMIM][Tf ₂ N]	0,5	41,903	7,858	161	
		3	49,622	8,889	161	
	B	[BMIM][FeCl ₄]	0,5	30,555	6,083	151
			3	30,580	6,073	150
[BMIM][Tf ₂ N]		0,5	30,736	6,111	151	
		3	30,886	6,099	149	
[EMIM][FeCl ₄]		0,5	31,628	6,199	149	
		3	31,698	6,311	154	
[EMIM][Tf ₂ N]		0,5	31,773	6,196	148	
		3	32,888	6,502	156	
C		[BMIM][FeCl ₄]	0,5	37,405	7,562	176
			3	37,433	7,617	178
	[BMIM][Tf ₂ N]	0,5	37,962	7,718	179	
		3	38,526	7,740	176	
	[EMIM][FeCl ₄]	0,5	37,026	7,565	178	
		3	37,282	7,617	179	
	[EMIM][Tf ₂ N]	0,5	38,428	7,781	178	
		3	40,081	8,078	178	

En el caso del ATF A, en general se produce una disminución de la viscosidad a 40 °C respecto al aceite sin añadir ningún IL, mientras que para 100 °C el valor de la viscosidad se mantiene bastante próximo al ATF A puro, aunque, para el [EMIM][Tf₂N] al 3 % la viscosidad aumenta, tanto a 40 como a 100 °C en relación al ATF A sin IL. En todos los casos se aprecia un aumento en el índice de viscosidad.

En las muestras realizadas con ATF B, para todas ellas, se muestra un aumento en la viscosidad a 40 y 100°C, mientras que el índice de viscosidad se mantiene bastante próximo

al del ATF B sin IL, siendo el valor más bajo para el [EMIM][Tf₂N] al 0,5% y el más alto, para el mismo IL al 3%.

Por último, en el caso de las mezclas realizadas con ATF C en todos los casos se aprecia un aumento de la viscosidad tanto a 40 como a 100 °C, aunque el índice de viscosidad se ve reducido. La variación más significativa nuevamente se encuentra en la mezcla de [EMIM][Tf₂N] al 3 %.

Las muestras obtenidas fueron homogéneas, aunque tras un largo tiempo en reposo, se apreciaba una decantación en aquellas con partículas magnéticas sólidas, que al momento de realizar las distintas pruebas se agitaron manualmente, hasta conseguir que se disolvieran totalmente. En la Figura 16 se muestra una imagen de la mezcla del ATF A con 0,5 % IL [BMIM][Tf₂N], donde se puede ver que solo hay una fase, y se trata de un fluido homogéneo.

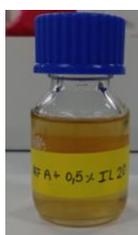


Figura 16. Muestra de ATF A con 5 % de [BMIM][Tf₂N].

3.2. Viscosidad

En la Figura 17 se muestra el comportamiento de la viscosidad de los diferentes ATFs sin líquidos iónicos, frente a la temperatura. En todos ellos el valor de la viscosidad disminuye al aumentar la temperatura, como se esperaba.

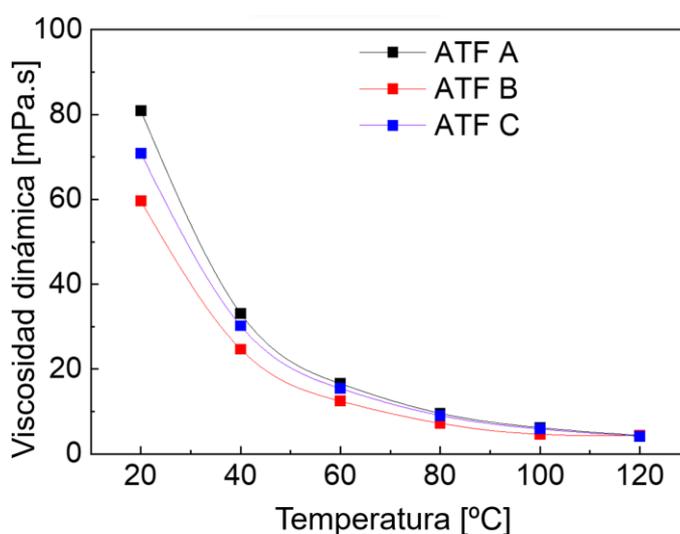


Figura 17. Viscosidad dinámica de los ATFs puros frente a la temperatura.

En las Figuras 18, 19 y 20 se observan los distintos ATF con ILs en una concentración 0,5 %. Al igual que en el caso anterior, la viscosidad disminuye con el aumento de temperatura en todos ellos, además se observa que no hay diferencias apreciables con los ATF sin ILs.

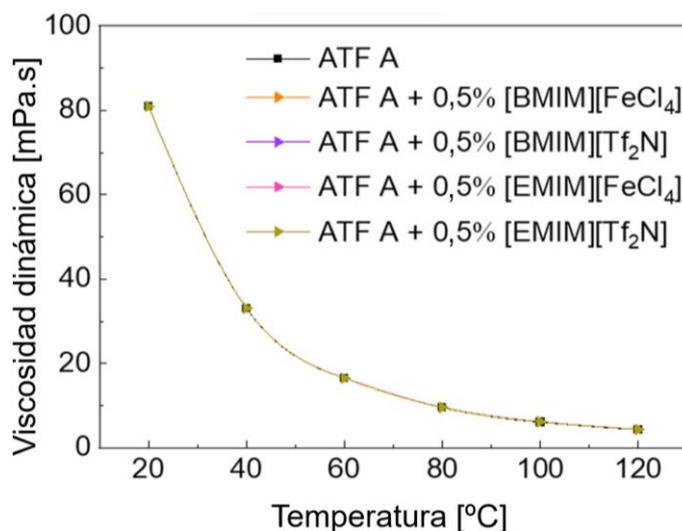


Figura 18. Viscosidad dinámica frente a la temperatura del ATF A con una concentración de ILs al 0,5 %.

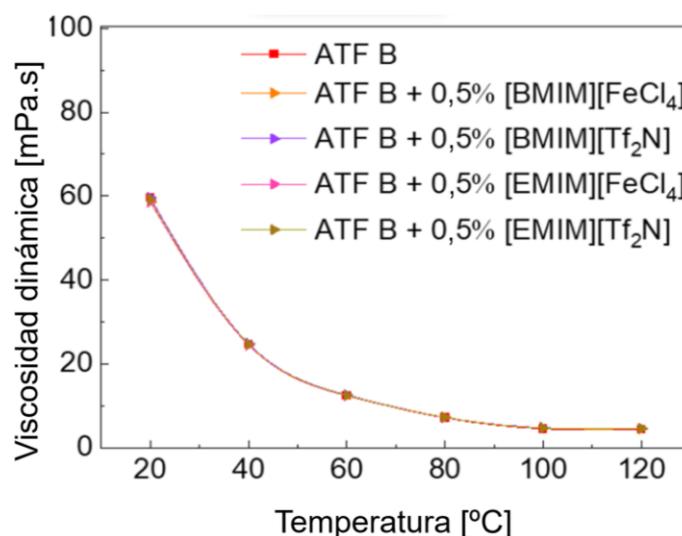


Figura 19. Viscosidad dinámica frente a la temperatura del ATF B con una concentración de ILs al 5%.

Aunque el comportamiento de estas muestras, con ILs al 0,5 %, es muy similar a los ATF sin IL, en el caso del ATF C con 0,5 % de [EMIM][Tf₂N] (Figura 20), produce un aumento de la viscosidad para bajas temperaturas, que podría deberse a que la estructura molecular del IL afecte a la movilidad e interacción entre las moléculas del lubricante, produciendo alteraciones en las fuerzas que actúan entre ellas [36, 37].

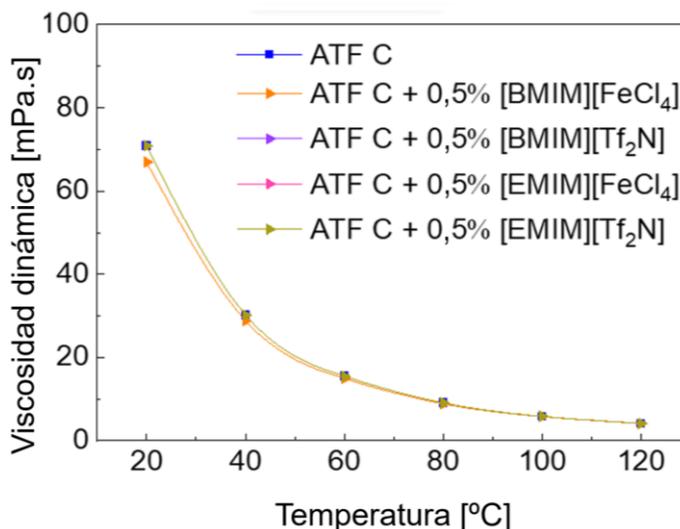


Figura 20. Viscosidad dinámica frente a la temperatura del ATF C con una concentración de ILs al 0,5%.

En las Figuras 21,22 y 23 se muestra la variación de viscosidad en relación con la temperatura de los ATFs con 3 % de ILs. En este caso se reflejan cambios mucho mayores entre los aceites con IL al 3 % y los ATFs base.

En el ATF A (Figura 21), en todos los casos, se produce un incremento de la viscosidad en relación al aceite base para bajas temperaturas, sin embargo, para el ATF C (Figura 23) y ATF B (Figura 22) se produjo una disminución del valor de la viscosidad, excepto para el ATF B con el líquido iónico [BMIM][FeCl₄], en este caso, se incrementa la viscosidad, especialmente con la disminución de la temperatura.

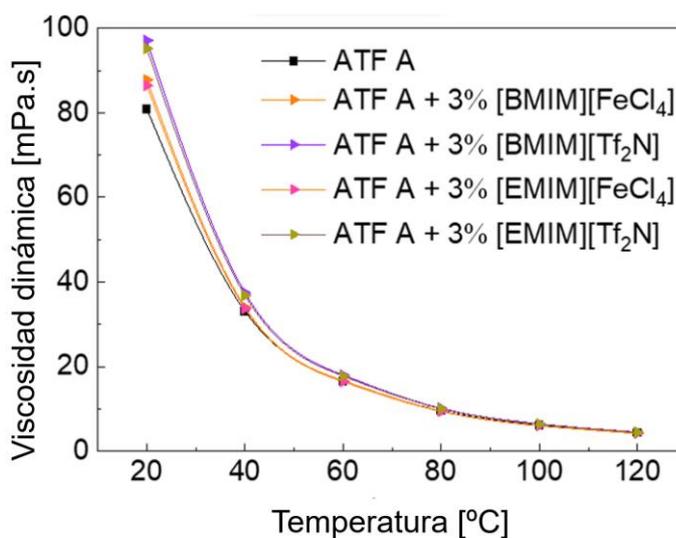


Figura 21. Viscosidad dinámica frente a la temperatura para el ATF A con una concentración de ILs al 3%.

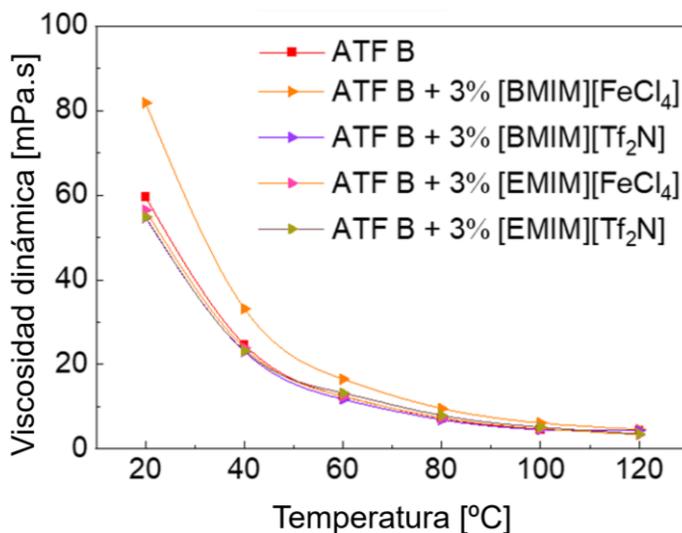


Figura 22. Viscosidad dinámica frente a la temperatura del ATF B con una concentración de ILs al 3 %.

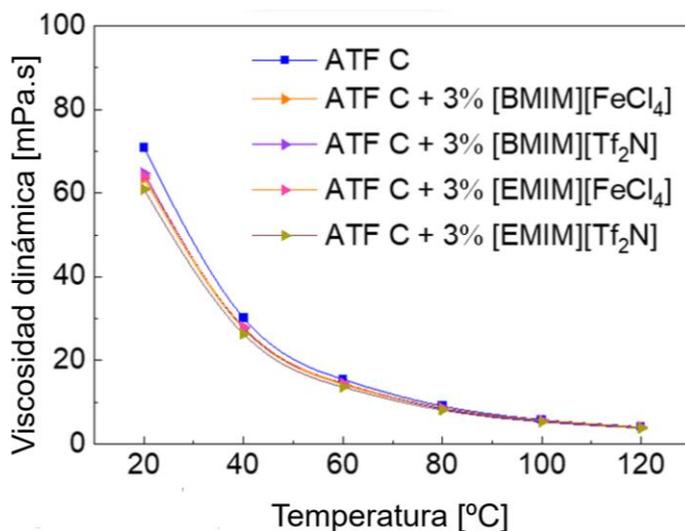


Figura 23. Viscosidad dinámica frente a la temperatura del ATF C con una concentración de ILs al 3 %.

Estos resultados podrían deberse, para aquellos casos en los que la viscosidad disminuye, a las propiedades disolventes de algunos ILs, pudiendo darse la disolución de algunos componentes de los lubricantes, que puedan influir en la viscosidad, lo que provoca una disminución de la misma en algunos casos [38].

Por otra parte, determinados ILs alteran la estructura molecular de algunos lubricantes, dando lugar a formaciones más ordenadas, de manera que se pueden producir modificaciones en las fuerzas que interactúan, lo que puede generar un incremento de la viscosidad [38, 39].

3.3. Conductividad Eléctrica

En la Figura 24 se puede ver la conductividad eléctrica de los ATFs, sin ILs, en relación con la temperatura. En todos ellos la conductividad eléctrica, normalmente expresada por sus siglas CE, aumenta con la temperatura.

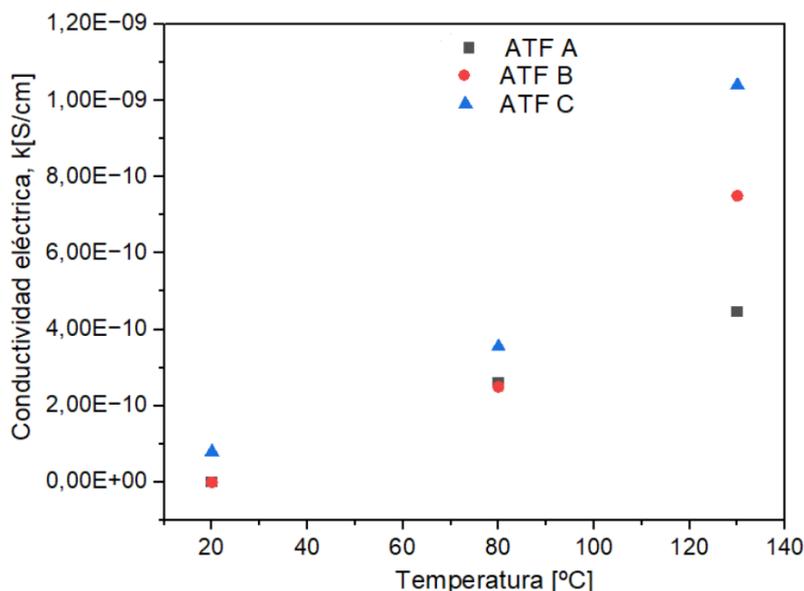


Figura 24. Conductividad eléctrica (CE) frente a la temperatura de los ATFs sin ILs.

Se puede ver que existen variaciones entre los ATFs en relación a su CE, aunque para todos ellos se produce un incremento con la temperatura, siendo el valor más alto para el ATF C y el más bajo para el ATF A. El aumento en la conductividad eléctrica de las muestras podría deberse a la viscosidad, que disminuye con la temperatura, facilitando que los portadores de cargas se muevan más libremente por el fluido [40, 41].

La diferencia en el comportamiento de cada ATF podría ser causa los paquetes de aditivos, ya que cada uno de ellos posee unas características y viscosidad diferentes [41].

En las Figuras 25 y 26 se muestra el ATF A con ILs al 0,5 y 3%, respectivamente. En ambos casos la variación a bajas temperaturas, consideradas de 20 a 80 °C, no es significativa. Para el caso de ILs al 3%, para temperaturas superiores a 80 °C se aprecia un mayor incremento, aunque estos resultados podrían ser causa de la viscosidad propia de cada IL [42].

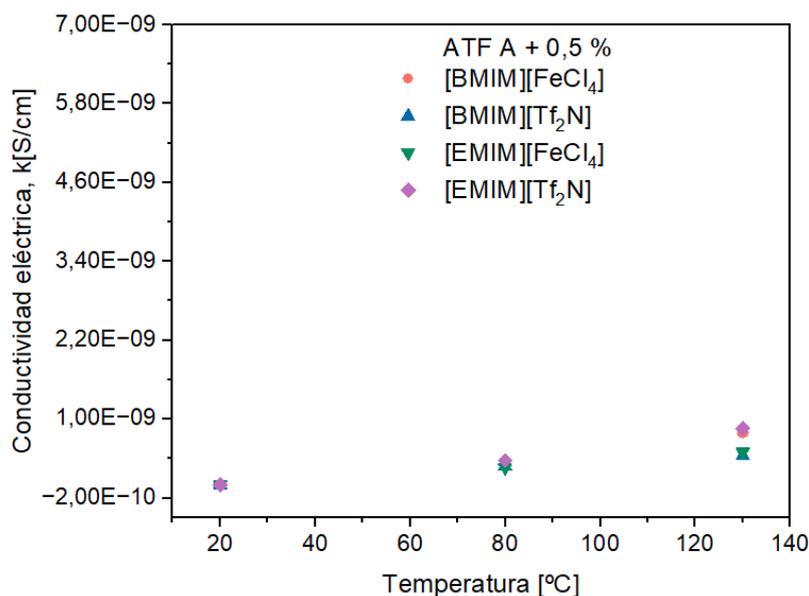


Figura 25. Conductividad eléctrica (CE) frente a la temperatura para el ATF A con una concentración ILs al 0,5 %.

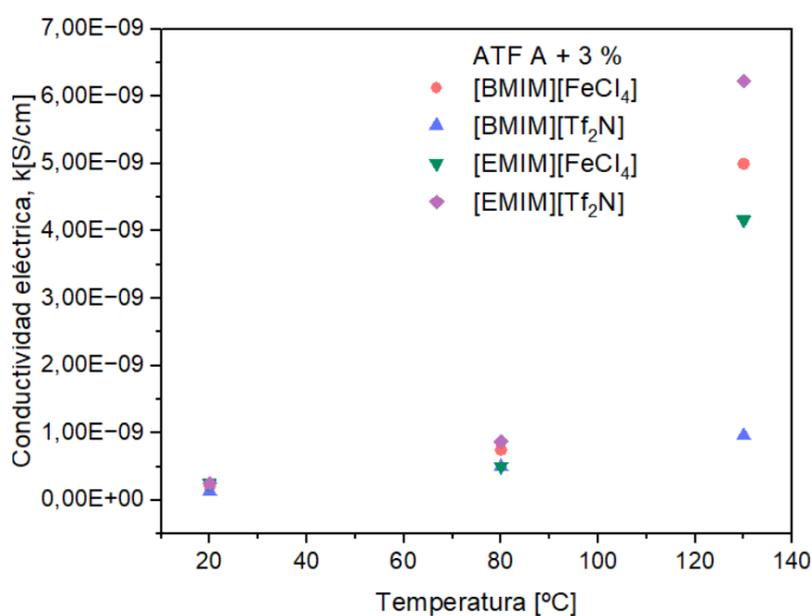


Figura 26. Conductividad eléctrica (CE) frente a la temperatura del ATF A con una concentración de ILs al 3 %.

En las Figuras 27 y 28 se muestra el ATF B con ILs al 0,5 y 3 %. En este caso, al igual que para el ATF A, las variaciones a bajas temperaturas no son significativas, mientras que por encima de los 80 °C se puede apreciar un incremento, nuevamente, las mayores cifras se obtienen para el 3 %, por lo que el aumento en la CE podría estar relacionado con una mayor viscosidad, debido a la temperatura, de los propios ILs [42, 43].

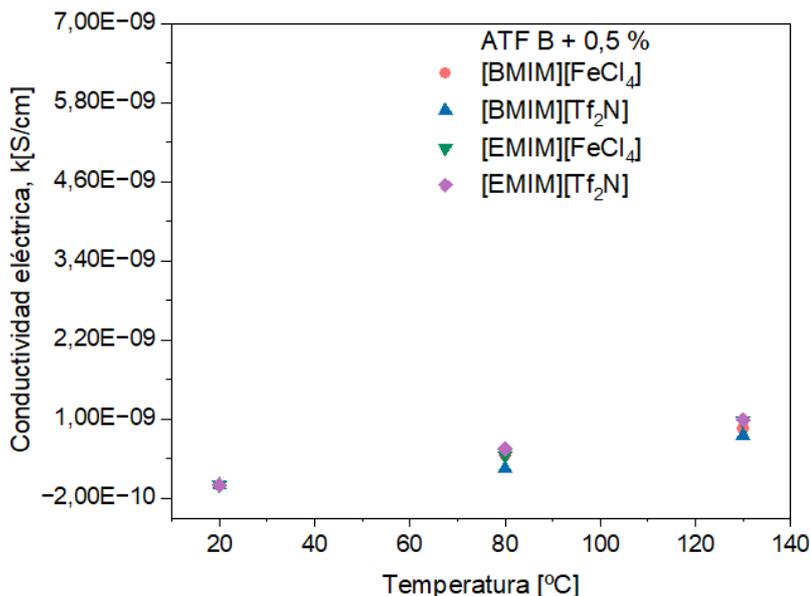


Figura 27. Conductividad eléctrica (CE) frente a la temperatura del ATF B con concentraciones de ILs al 3 %.

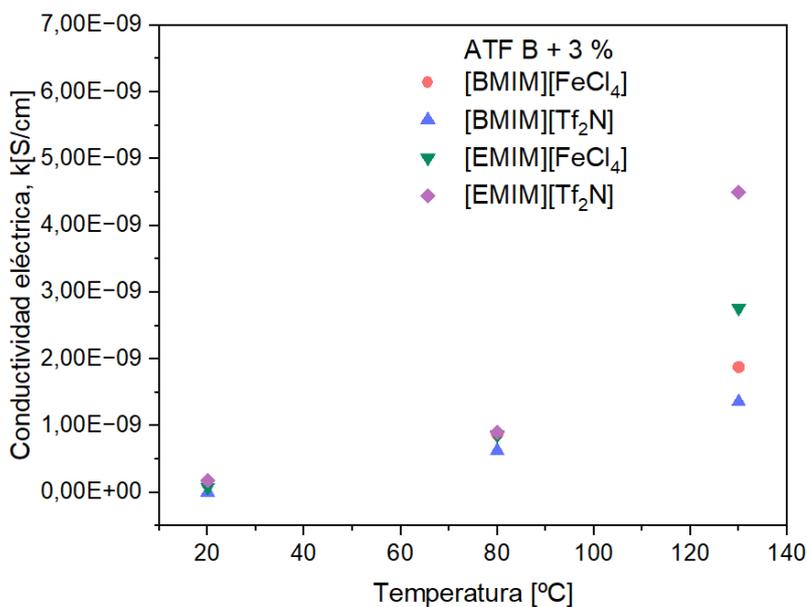


Figura 28. Conductividad eléctrica (CE) frente a la temperatura del ATF B con concentraciones de ILs al 3 %.

Por último, en las Figuras 29 y 30 se observa el ATF C con ILs al 0,5 y 3 % respectivamente. Al igual que para el ATF A y ATF B, las diferencias de 20 a 80 °C son muy pequeñas, y de igual manera, se notan cambios más destacables para elevadas temperaturas, de la misma manera estos valores pueden deberse a la viscosidad propia de cada IL [42, 43].

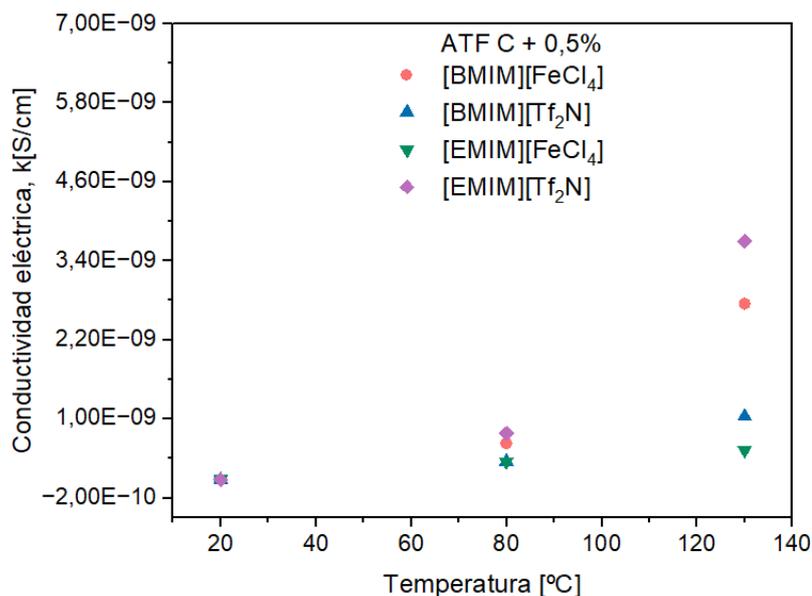


Figura 29. Conductividad eléctrica (CE) frente a la temperatura del ATF C para concentraciones de ILs al 0,5 %.

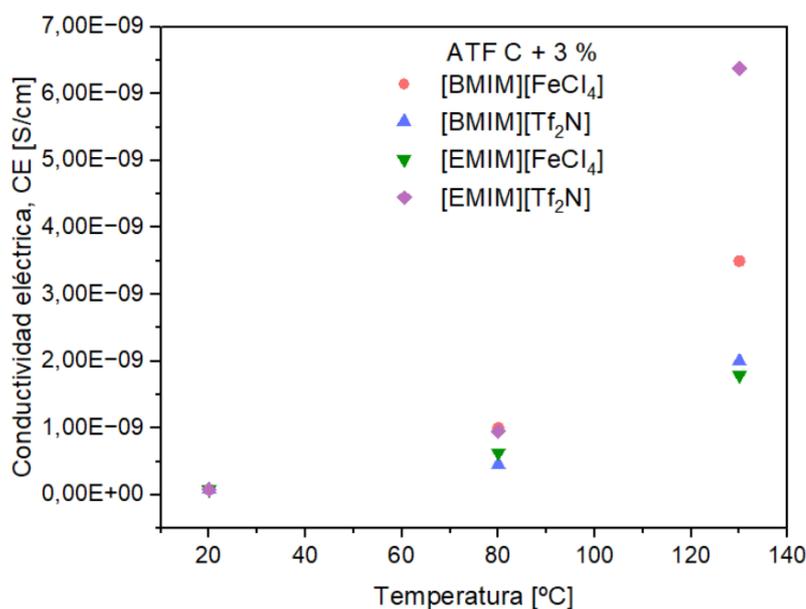


Figura 30. Conductividad eléctrica (CE) frente a la temperatura para el ATF C con concentraciones de ILs al 3 %.

En todos los casos, el valor de conductividad eléctrica más elevado se obtuvo con el líquido iónico [EMIM][Tf₂N], mientras que los valores más bajos se observaron para el ATF A y ATF B con la adición de [BMIM][Tf₂N], y [EMIM][FeCl₄] con el ATF C.

Observando los resultados obtenidos se puede concluir que la influencia en la conductividad eléctrica de los ATFs a causa de los ILs es bastante baja, de hecho, se mantiene en valores disipativos [44]. En las Figuras 31, 32 y 33 se muestra el diagrama de Walden con los ATFs y los ATFs con IL al 3 %.

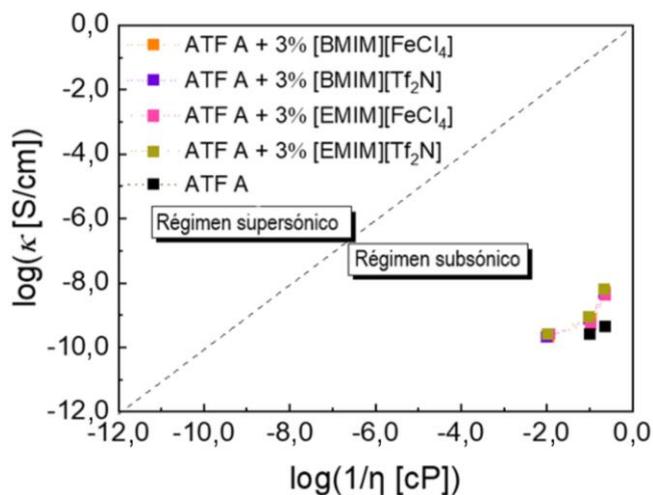


Figura 31. Diagrama de Walden para el ATF A con ILs al 3%.

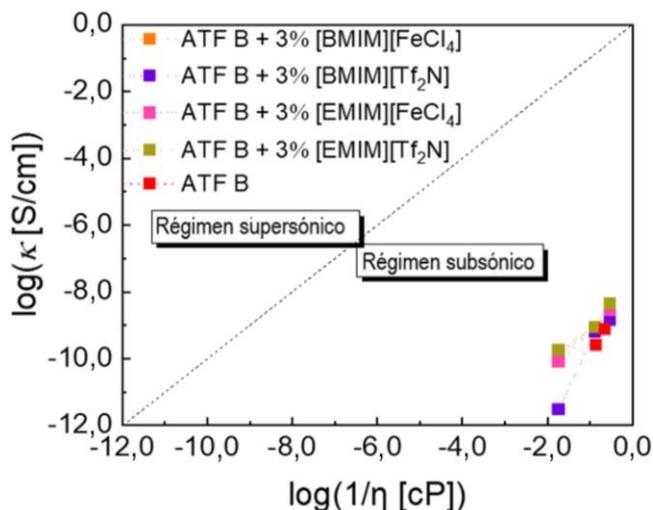


Figura 32. Diagrama de Walden para el ATF B con ILs al 3%.

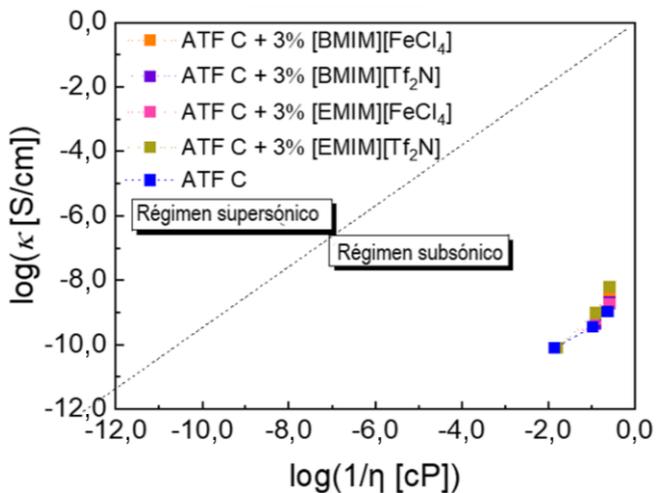


Figura 33. Diagrama de Walden para el ATF C con ILs al 3%.

En el diagrama de Walden se puede evaluar la ionicidad de un fluido, ya que se consideran líquidos iónicos aquellos que quedan por encima de la línea de puntos trazada (Figuras 31,32 y 33) [17]. En este caso, todas las muestras han dado un valor inferior y bastante alejado de esta línea de puntos, zona considerada para líquidos no iónicos o disipativos.

3.4. Coeficiente de fricción

En la Figura 34 se muestra el valor del coeficiente de fricción para el ATF A en función de la concentración de los ILs. Se aprecia que para todos ellos aumenta, aunque no hay una gran diferencia entre el 0,5 y el 3 %.

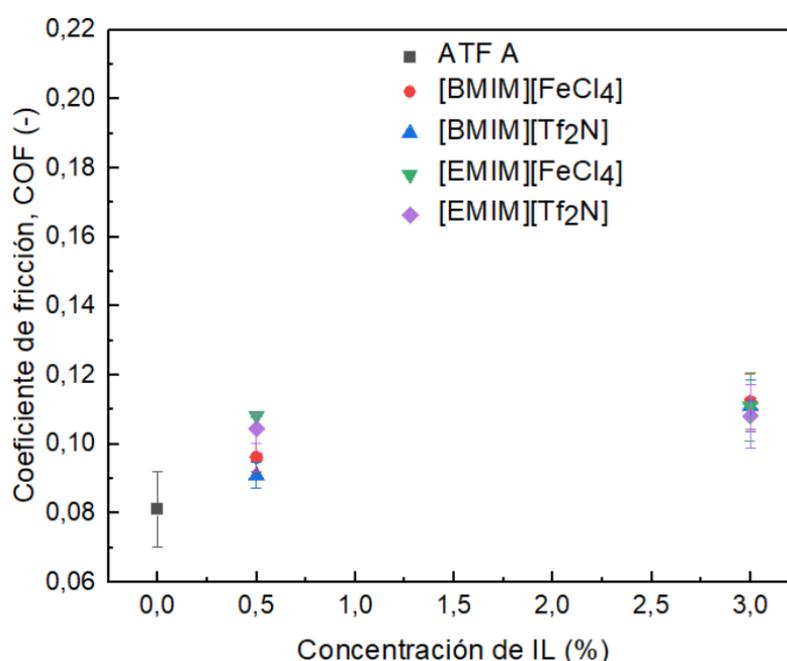


Figura 34. Coeficiente de fricción (COF) frente a las concentraciones de ILs para el ATF A.

En la Figura 35 se muestra el coeficiente de fricción en función de la concentración de IL para el ATF B. En este caso, a excepción del 0,5 % [EMIM][FeCl₄] y el 3% del [BMIM][FeCl₄], en todas las demás concentraciones el coeficiente de fricción aumenta.

En las mezclas realizadas con ATF B, si bien es cierto, que en la mayoría de los casos el coeficiente de fricción aumenta, se aprecia una disminución del 3 al 0,5 % en los casos del [BMIM][FeCl₄] y [EMIM][Tf₂N], mientras que en el [EMIM][FeCl₄] y [BMIM][Tf₂N] ocurre, al contrario.

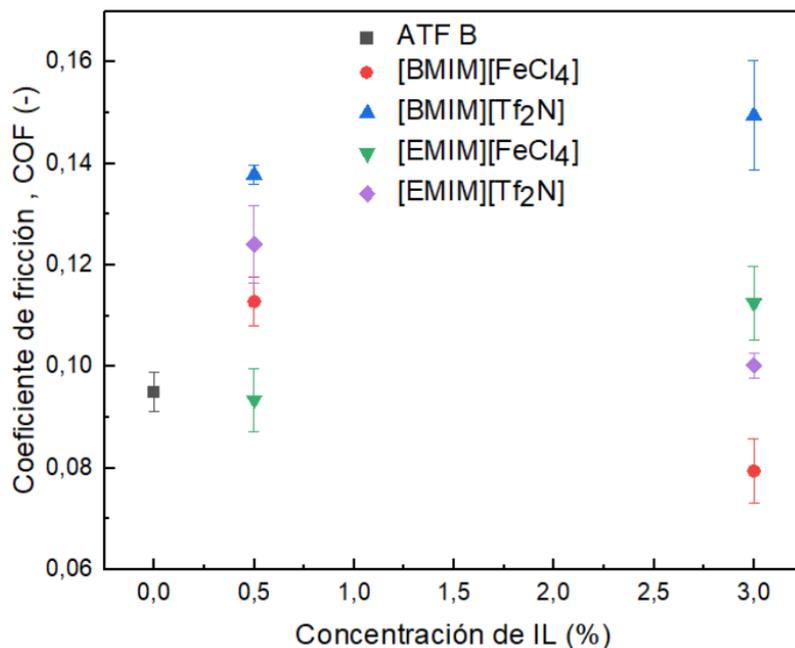


Figura 35. Coeficiente de fricción (COF) frente a las concentraciones de ILs para el ATF B.

Por último, en la Figura 36 se observan los valores de coeficiente de fricción frente a las concentraciones de ILs para el ATF C. En este caso, al contrario que los dos anteriores, en la mayoría de las muestras con IL se puede ver una disminución en el coeficiente de fricción a excepción de las muestras con IL al 3 % de [BIMIM][Tf₂N]. El valor más bajo obtenido se encuentra en la muestra con IL [EMIM][FeCl₄] al 0,5 %.

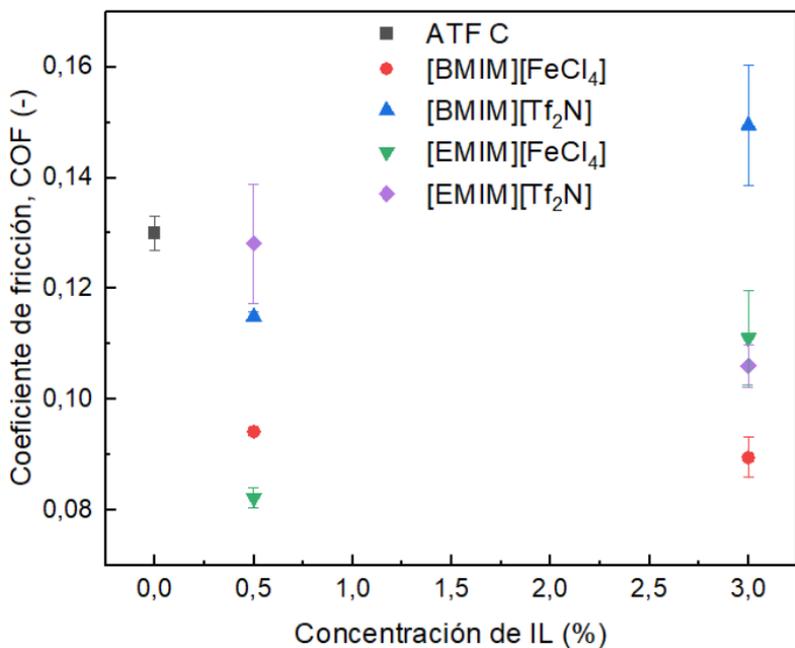


Figura 36. Coeficiente de fricción (COF) frente a las concentraciones de ILs para el ATF C.

En este caso, al igual que en las muestras hechas con ATF B, para el [BMIM][FeCl₄] y el [EMIM][Tf₂N] se produce un descenso en el coeficiente de fricción entre el 3 y el 0,5 %, y con el [EMIM][FeCl₄] y el [BMIM][Tf₂N], sin embargo, va en aumento con la proporción de IL.

De los resultados obtenidos se puede concluir que las partículas magnéticas no tienen una influencia significativa en el coeficiente de fricción de los aceites, ya que en los ILs con estas partículas presentan comportamientos opuestos, en el caso del [BMIM][FeCl₄] el valor del coeficiente de fricción disminuye a medida que aumenta la concentración de IL, salvo para el ATF A, y en el [BMIM][FeCl₄] el valor del coeficiente de fricción lo hace con el porcentaje de IL.

En el caso del ATF A, no existe mejora respecto a los valores de coeficiente de fricción, aunque, para el ATF C se produce una disminución en casi todos ellos, y para el ATF B en las mezclas de [BMIM][FeCl₄] al 3% y de [EMIM][FeCl₄] al 0,5 %.

En algunos estudios, como el de Shahsharif Shaikh et al [45], el que se utiliza un IL similar, compartiendo el catión [EMIM], se formaba una película absorbida en la superficie de los materiales en contacto, provocando una reducción en el coeficiente de fricción, lo que podría ocurrir para estos ILs, que podría explicar los casos en el que el coeficiente de fricción se reduce. Aunque, al mismo tiempo, podría darse la formación de un tribopelícula que incremente la resistencia al movimiento, que podría justificar aquellos casos en los que el coeficiente de fricción aumenta [46].

Así mismo, en bibliografía actual, se refleja que la acción del anión puede modificar el comportamiento de los líquidos iónicos, como el caso del [Tf₂N], que tiende a provocar estructuras más estables, pudiendo alterar el comportamiento tribológico de los ATFs, de manera que podría darse una reducción del coeficiente de fricción en algunos casos [47].

3.5. Volumen de desgaste

En las Figuras 37, 38 y 39 se muestran los valores de volumen de desgaste de los ATFs frente a las concentraciones de ILs.

En la Figura 37, para el ATF A, el valor más bajo del volumen de desgaste corresponde al [EMIM][FeCl₄] al 3 %. Aunque en este caso la variación entre las concentraciones al 0,5 y 3 % tampoco son muy elevadas, se puede apreciar más diferencia, siendo el valor más estático para el [BMIM][FeCl₄]. En ese caso los valores que casi todas las mezclas reducen el volumen de desgaste a mayor proporción de IL, salvo para el [EMIM][Tf₂N].

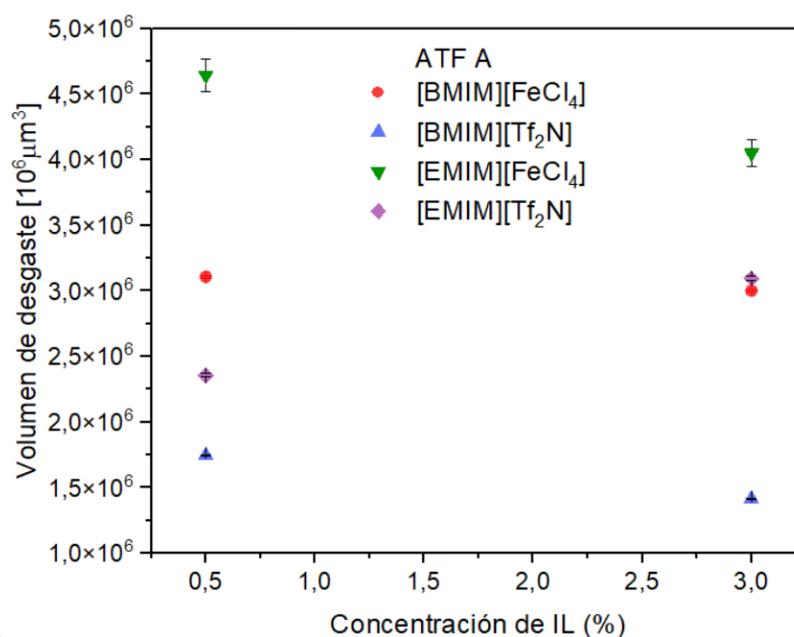


Figura 37. Volumen de desgaste frente a las concentraciones de IL para el ATF A.

En la gráfica del ATF B se aprecia, que, al igual que para el coeficiente de fricción, tanto en las mezclas de [BMIM][FeCl₄] como en las de [EMIM][Tf₂N] se reduce el volumen de desgaste a medida que aumenta la concentración de IL. En las otras dos muestras, [BMIM][Tf₂N] y [EMIM][FeCl₄] el volumen de desgaste aumenta con el porcentaje de IL.

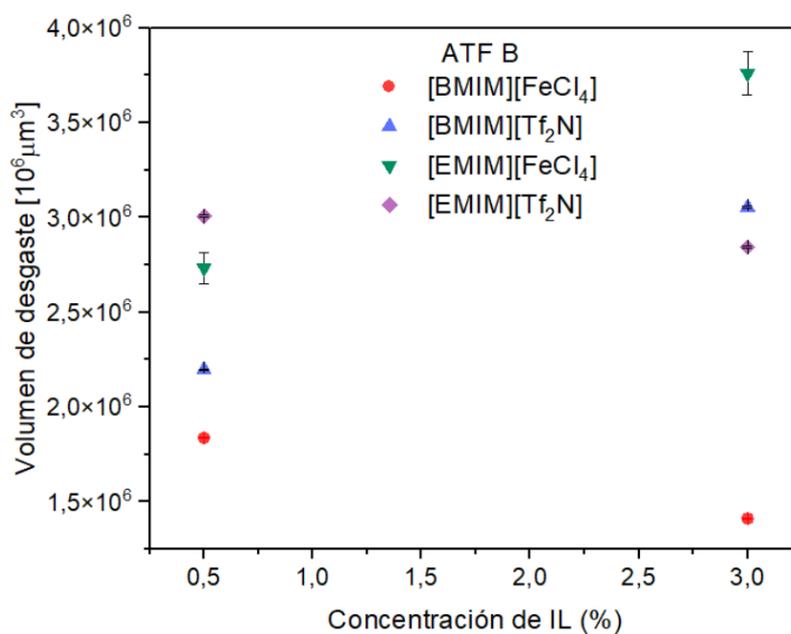


Figura 38. Volumen de desgaste frente a las concentraciones de ILs para el ATF B.

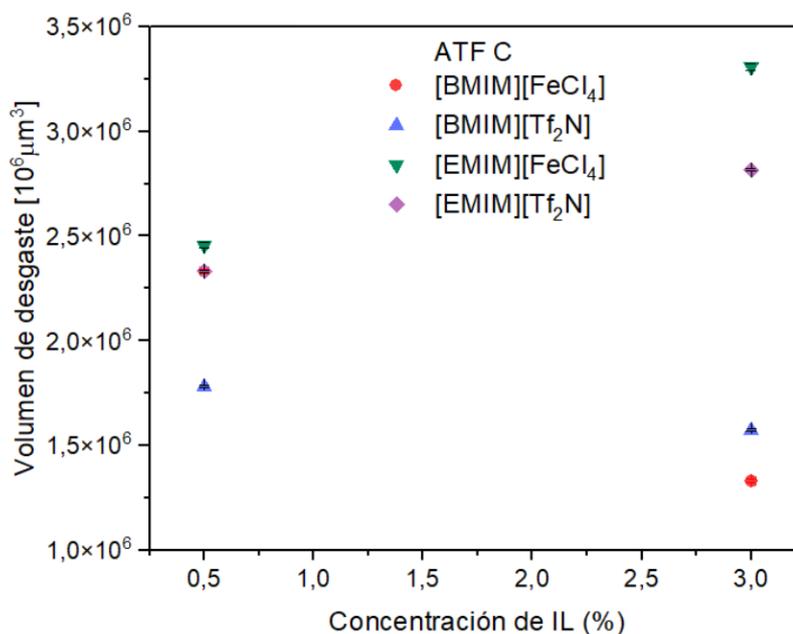


Figura 39. Volumen de desgaste frente a las concentraciones de ILs para el ATF C.

En el ATF C se observa una variación dispar en referencia a los resultados del coeficiente de fricción, pero más aproximados a los resultados obtenidos en el ATF A. En este caso, de igual forma que en todos los demás, para la mezcla con [BMIM][FeCl₄] se produce una disminución del volumen de desgaste a medida que aumenta la concentración, y lo mismo ocurre con las mezclas de [BMIM][Tf₂N], mientras en para los otros dos ILs pasa lo contrario, aumenta el volumen de desgaste conforme aumenta el porcentaje de IL.

Se puede decir que en todas las mezclas de ATFs con el IL [BMIM][FeCl₄] se produce una disminución del volumen de desgaste a medida que aumenta el porcentaje de IL, de la misma manera que, al menos para los ATF B y C una concentración de este IL al 3 % podría suponer mejoras en su comportamiento tribológico, reduciendo tanto el volumen de desgaste como el coeficiente de fricción.

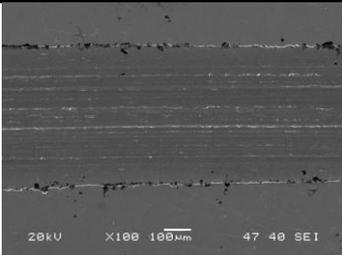
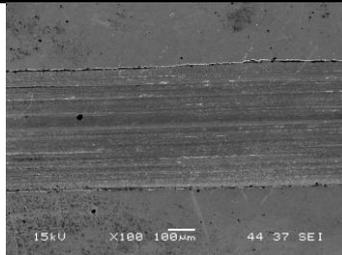
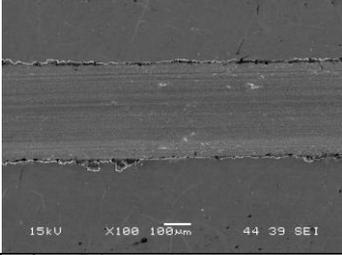
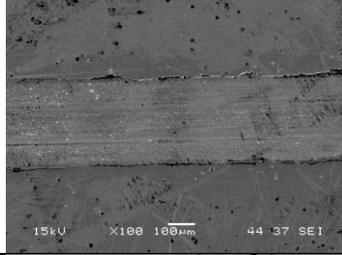
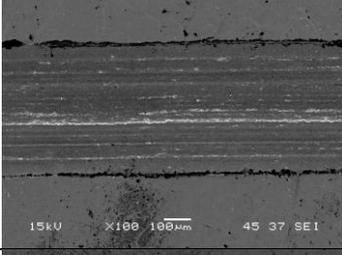
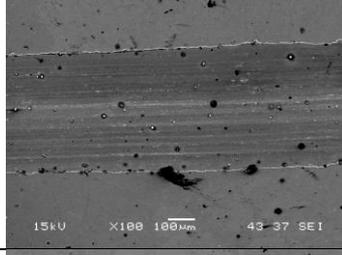
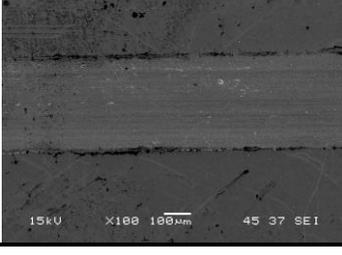
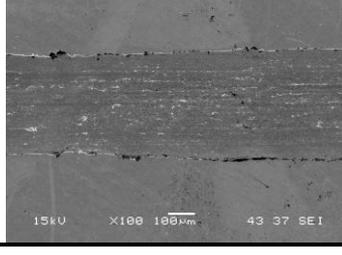
En el caso de las mezclas con IL [BMIM][FeCl₄] la reducción tanto, en el volumen de desgaste como en el coeficiente de fricción, podría deberse a la aparición de una capa absorbida, en combinación con la creación de una tribopelícula fina que facilite el deslizamiento y reduzca el desgaste [48].

En la mezcla de ATF C con 3% de [EMIM][Tf₂] se aprecia una reducción tanto del volumen de desgaste como del coeficiente de fricción. Esto podría ser causa de la acción conjunta de una posible formación más estructurada del ATF, debido a la acción del anión, junto con la posibilidad de que se haya podido crear una capa absorbida que permita una reducción de la fricción y el desgaste [46, 47].

3.6. Microscopio electrónico de barrido

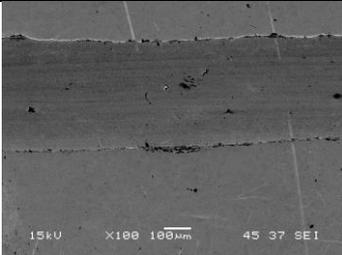
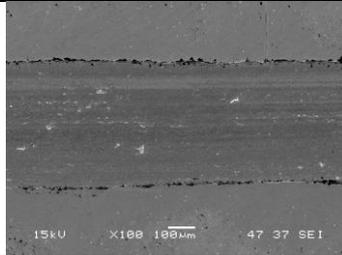
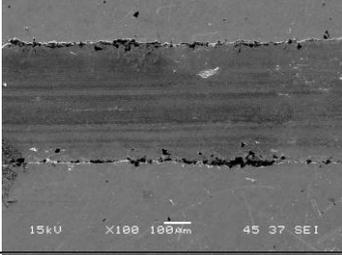
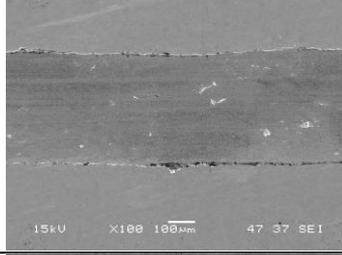
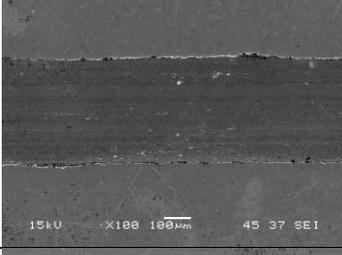
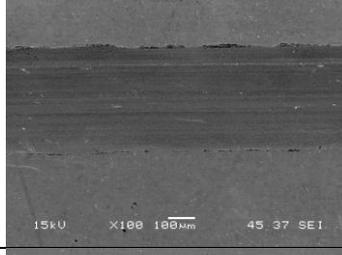
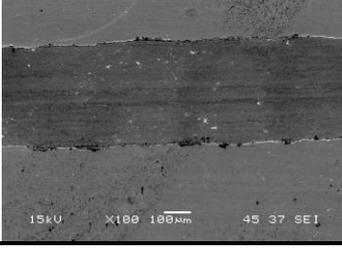
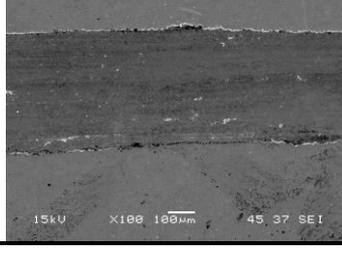
En las Tablas 5, 6 y 7 se muestran las imágenes del microscopio electrónico de barrido, del estudio superficial del mecanismo de desgaste para todos los ATF's con ILs al 0,5 y 3%. En todos los casos el mecanismo de desgaste es tipo adhesivo.

Tabla 5. Imágenes del microscopio electrónico de barrido para las concentraciones de ILs para el ATF A.

IL	ATF A	
	0,5 %	3 %
[BMIM][FeCl ₄]		
[BMIM][Tf ₂ N]		
[EMIM][FeCl ₄]		
[EMIM][Tf ₂ N]		

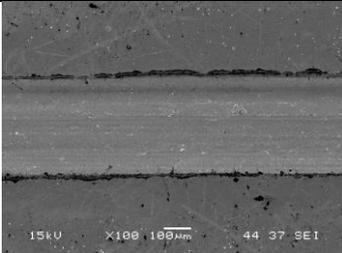
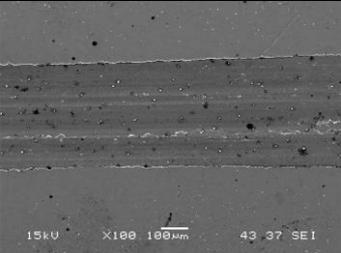
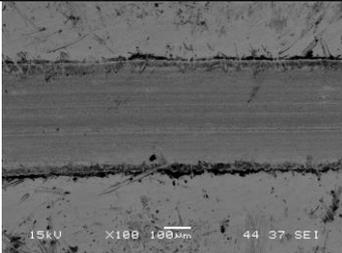
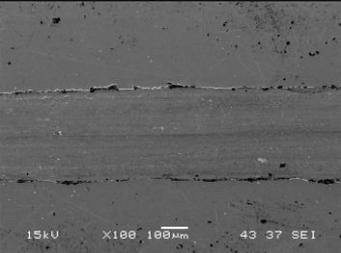
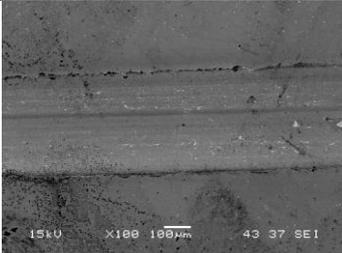
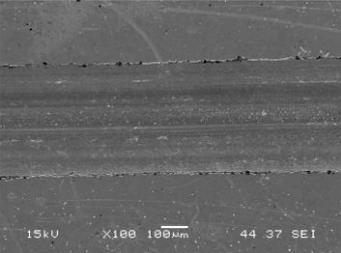
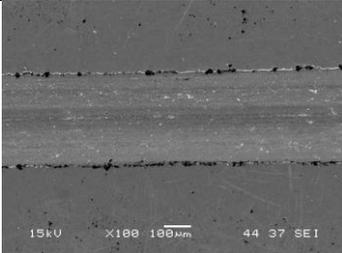
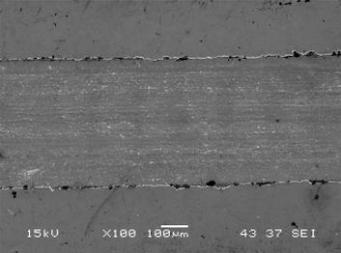
En la Tabla 5 se muestra el ATF A con concentraciones al 0, 5 y 3 %, tal como en los datos de volumen de desgaste, aunque existen diferencias de tamaño, no son excesivamente notorias, aunque si se puede ver una disminución en el tamaño de la huella para el [BMIM][FeCl₄].

Tabla 6. Imágenes del microscopio electrónico de barrido para las concentraciones de ILs para el ATF B.

IL	ATF B	
	0,5 %	3 %
[BMIM][FeCl ₄]		
[BMIM][Tf ₂ N]		
[EMIM][FeCl ₄]		
[EMIM][Tf ₂ N]		

En la Tabla 6, se muestran las imágenes para el ATF B con ILs al 0,5 y 3 %. Al igual que en el caso del ATF A, aunque existen diferencias entre las imágenes, no son demasiado significativas.

Tabla 7. Imágenes del microscopio electrónico de barrido para las concentraciones de ILs para el ATF C.

IL	ATF C	
	0,5 %	3 %
[BMIM][FeCl ₄]		
[BMIM][Tf ₂ N]		
[EMIM][FeCl ₄]		
[EMIM][Tf ₂ N]		

En la Tabla 7 se muestran las imágenes del ATF C para concentraciones de ILs del 0,5 y 3%, al igual que para los demás casos, las diferencias de tamaño entre las huellas no son excesivamente notorias, aunque se puede apreciar un aumento en las imágenes del [EMIM][Tf₂N].

4. Conclusiones

En este trabajo de fin de master se llevó a cabo la preparación y caracterización tribológica de diferentes muestras con líquidos iónicos para determinar su viabilidad como aditivos en fluidos de transmisión.

Las muestras obtenidas fueron homogéneas y aptas para los ensayos, aunque en aquellas con partículas magnéticas, transcurridos varios días se produce decantación de las partes sólidas, por lo que su aplicación quedaría limitada a instalaciones en las que el fluido esté en constante circulación.

En cuando a la caracterización del fluido, la influencia de la adición de ILs a los ATFs en relación a la viscosidad es mínima para bajas concentraciones, aunque para concentraciones más altas y a baja temperatura la viscosidad disminuye.

La conductividad eléctrica no se vio alterada por la adición de ILs, manteniéndose todas las muestras en un rango disipativo.

EL comportamiento tribológico de las mezclas con [BMIM][FeCl₄] para los ATFs B y C, a mayor concentración del IL, supuso una mejora en cuanto a coeficiente de fricción y volumen de desgaste, además para el ATF B, la adición de [EMIM][Tf₂N] también produjo una mejora, tanto en el coeficiente de fricción como en el volumen de desgaste, sin embargo, en los demás casos no se obtuvo una influencia significativa de los ILs.

El mecanismo de desgaste que se produjo en todas las muestras es desgaste adhesivo.

5. Líneas Futuras

A la vista de los resultados obtenidos en este trabajo, se proponen las siguientes líneas futuras:

- Ampliar el estudio del líquido iónico [BMIM][FeCl₄] en mayores porcentajes en los fluidos de transmisión B y C.
- Ampliar el estudio del líquido iónico [EMIM][Tf₂N] en mayores porcentajes para el fluido de transmisión C.

6. Bibliografía

- [1] Acciona, “<https://www.acciona.com>,” https://www.acciona.com/es/cambio-climatico/?_adin=02021864894.
- [2] National Geographic, “<https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/que-es-el-calentamiento-global>.”
- [3] Gobierno de España, “<https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/default.aspx>.”
- [4] “EMSA FACTS & FIGURES 2022 European Maritime Safety Agency.”
- [5] eea.europa.eu, “<https://www.eea.europa.eu/es/highlights/el-transporte-maritimo-en-la#:~:text=Con%20un%2077%20%25%20del%20comercio,la%20cadena%20de%20suministro%20internacional>.”
- [6] Emsa and Eea, “European Maritime Transport Environmental Report 2021”, doi: 10.2800/3525.
- [7] España fascinante, “<https://espanafascinante.com/aire-libre/hundimiento-del-torrey-canyon/>.”
- [8] M. A. Cabrera, “ICADE BUSINESS SCHOOL LA CONTAMINACIÓN MARINA Y LA EVOLUCIÓN DE SU NORMATIVA INTERNACIONAL MASTER EN NEGOCIO Y DERECHO MARÍTIMO (MNDM).”
- [9] “CONVENIO INTERNACIONAL PARA PREVENIR LA CONTAMINACIÓN POR LOS BUQUES, DE 2 DE NOVIEMBRE DE 1973 CONVENIO MARPOL (CON EL PROTOCOLO DE LONDRES DE 17 DE FEBRERO DE 1978 Y ENMIENDAS,” 2010.
- [10] Diario el Canal, “<https://www.diarioelcanal.com/convenio-marpol-cumplira-50-anos-compromiso-ambiental/>.”
- [11] Ministerio de asuntos sociales y agenda 2030, “<https://www.mdsocialesa2030.gob.es/agenda2030/index.htm>.”
- [12] Instituto Nacional de Estadística, “<https://www.ine.es/dynngs/ODS/es/objetivo.htm?id=5198#:~:text=Objetivo%2015.-,Proteger%2C%20restablecer%20y%20promover%20el%20uso%20sostenible%20de%20los%20ecosistemas,de%20la%20p%C3%A9rdida%20de%20biodiversidad>.”
- [13] C. R. Pedro Albarracin Aguillon, “TRIBOLOGÍA Y LUBRICACIÓN Dictado a: Servicio Nacional de Aprendizaje-SENA.” [Online]. Available: www.pedroalbarracinaguillon.com;

Bibliografía

- [14] K. Holmberg and A. Erdemir, "Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions," *Friction*, vol. 5, no. 3. Tsinghua University Press, pp. 263–284, Sep. 01, 2017. doi: 10.1007/s40544-017-0183-5.
- [15] I. O. Linares, "TRIBOLOGÍA Y MANTENIMIENTO PROACTIVO Generalidades de la Tribologia Fundamentos de la Lubricación, Fricción y el Desgaste."
- [16] F. Pagano, "Universidad del País Vasco POTENTIAL USE OF IONIC LIQUIDS IN TRIBOLOGY," 2017.
- [17] C. Sanjurjo Muñiz, N. Rivera, y R. Rubén González Rodríguez, "ESCUELA SUPERIOR DE LA MARINA CIVIL DE GIJÓN Trabajo Fin de Máster."
- [18] Lubritec.com <https://www.lubritec.com/tribologia-que-es-por-que-es-importante/>.
- [19] J. Granizo, publicación, Tribología y sus aplicaciones a la industria
- [20] Julio de F. J. Domínguez Abascal, Fdo-Sergio Muñoz Moreno Doctorando Tesis doctoral, "Estimación de vida a fatiga por fretting Aplicación a componentes recubiertos."
- [21] I. O. Linares, "TRIBOLOGÍA Y MANTENIMIENTO PROACTIVO Generalidades de la Tribologia Fundamentos de la Lubricación, Fricción y el Desgaste."
- [22] Noria.mx, "<https://noria.mx/seleccion-del-lubricante-s/lubricantes-de-base-biologica-versus-lubricantes-a-base-de-petroleo.>"
- [23] Oiltanking, "<https://www.oiltanking.com/es/publicaciones/glosario/lubricantes-y-aceites-de-base.html.>"
- [24] Mobil.com, "<https://www.mobil.com.mx/es-mx/lubricantes/consumidor/hombre-camion/por-que-mobil-delvac/por-que-utilizar-lubricantes-sinteticos.>"
- [25] "Aceites Base y Aditivos" "<http://ulpgc.com/lubricantes/aceitesbase/aditivos-tribos-sinteticos>"
- [26] Castrol, "https://www.castrol.com/es_es/spain/home/electric-vehicle-fluids.html#/."
- [27] A. García Tuero, N. Rivera, E. Rodríguez, A. Fernández-González, J. L. Viesca, and A. Hernández Battez, "Influence of Additives Concentration on the Electrical Properties and the Tribological Behaviour of Three Automatic Transmission Fluids," *Lubricants*, vol. 10, no. 11, Nov. 2022, doi: 10.3390/lubricants10110276.
- [28] M. P. Kazmierkowski, "Advanced Electric Drive Vehicles [Book News]," *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 9, no. 4, pp. 65–68, Dec. 2015, doi: 10.1109/MIE.2015.2485198.

- [29] Noelia Rivera Rellán, Tesis doctoral “Evaluación tribológica de líquidos iónicos derivados de ácidos grasos octanoico, láurico y pamítico”.
- [30] I. Alumno *et al.*, “Líquidos iónicos como lubricantes del contacto titanio-acero a altas temperaturas. Titulación: Ingeniería en Organización”, 2020.
- [31] A. Romero Salvador, “LÍQUIDOS IÓNICOS A TEMPERATURA AMBIENTE: UN NUEVO MEDIO PARA LAS REACCIONES QUÍMICAS,” 2008.
- [32] Uptc.es “UNIVERSIDAD DE MURCIA”, “https://www.upct.es/grupos-investigacion/grupos_ID/proyectos.php?id=20”.
- [33] J. L. Viesca Rodríguez, A. E. Hernández Battez, R. González Rodríguez, A. Fernández González, and A. Higuera Garrido, “Asociación Española de Ingeniería Mecánica XIX CONGRESO NACIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA Líquidos iónicos como lubricantes de recubrimientos de PVD.”
- [34] J. L. Viesca, M. Anand, D. Blanco, A. Fernández-González, A. García, and M. Hadfield, “Tribological behaviour of PVD coatings lubricated with a FAP- anion-based ionic liquid used as an additive,” *Lubricants*, vol. 4, no. 1, Mar. 2016, doi: 10.3390/lubricants4010008.
- [35] A. Romero Salvador, “LÍQUIDOS IÓNICOS A TEMPERATURA AMBIENTE: UN NUEVO MEDIO PARA LAS REACCIONES QUÍMICAS,” 2008.
- [36] A. G. Tuero, C. Sanjurjo, N. Rivera, J. L. Viesca, R. González, and A. H. Battez, “Electrical conductivity and tribological behavior of an automatic transmission fluid additised with a phosphonium-based ionic liquid,” *J Mol Liq*, vol. 367, p. 120581, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.molliq.2022.120581.
- [37] K. R. Harris and M. Kanakubo, “Temperature and Pressure Dependence of the Viscosity of the Ionic Liquids 1-Hexyl-3-methylimidazolium Tetrafluoroborate and 1-Ethyl- and 1-Hexyl-3-methylimidazolium Bis(trifluoromethylsulfonyl)amides,” *J Chem Eng Data*, vol. 66, no. 12, pp. 4618–4628, Dec. 2021, doi: 10.1021/acs.jced.1c00628.
- [38] Z. K. Koi, W. Z. N. Yahya, R. A. Abu Talip, and K. A. Kurnia, “Prediction of the viscosity of imidazolium-based ionic liquids at different temperatures using the quantitative structure property relationship approach,” *New Journal of Chemistry*, vol. 43, no. 41, pp. 16207–16217, 2019, doi: 10.1039/C9NJ03436F.
- [39] P. Pandey, A. E. Somers, S. K. Hait, and S. S. V. Ramakumar, “Synthesis of Oil Miscible Novel Silane Functionalised Imidazoline-Based ILs as Lubricant Additives: Characterization and Tribological Evaluations,” *Tribol Lett*, vol. 70, no. 1, p. 25, Mar. 2022, doi: 10.1007/s11249-022-01567-6.

Bibliografía

- [40] S. Kawada, S. Watanabe, R. Tsuboi, S. Sasaki, and B. Prakash, "Lubrication mechanism of halogen-free ionic liquids," *Tribology Online*, vol. 12, no. 4, pp. 155–161, 2017, doi: 10.2474/trol.12.155.
- [41] A. Bolotov and G. Burdo, "Effect of magnetic field on the physical and mechanical properties of oils and non-magnetic substance," 2022, p. 020004. doi: 10.1063/5.0092876.
- [42] G. T. Abdel-Jaber, M. K. Mohamed, and W. Y. Ali, "Effect of Magnetic Field on the Friction and Wear of Polyamide Sliding against Steel," *Materials Sciences and Applications*, vol. 05, no. 01, pp. 46–53, 2014, doi: 10.4236/msa.2014.51007.
- [43] E. Rodríguez, N. Rivera, A. Fernández-González, T. Pérez, R. González, and A. H. Battez, "Electrical compatibility of transmission fluids in electric vehicles," *Tribol Int*, vol. 171, p. 107544, Jul. 2022, doi: 10.1016/j.triboint.2022.107544.
- [44] C. McFadden, K. Hughes, L. Raser, and T. Newcomb, "Electrical Conductivity of New and Used Automatic Transmission Fluids," *SAE Int J Fuels Lubr*, vol. 9, no. 3, pp. 2016-01–2205, Oct. 2016, doi: 10.4271/2016-01-2205.
- [45] S. Shaikh, T. Omiya, A. Cavaleiro, L. Vilhena, A. Ramalho, and F. Ferreira, "Impact of Temperature Variation on Friction Behaviour of Rare Earth-Doped Diamond-like Carbon Coatings with Ionic Liquid Lubricants," *Lubricants*, vol. 11, no. 7, Jul. 2023, doi: 10.3390/lubricants11070302.
- [46] S. Shaikh, T. Omiya, A. Cavaleiro, L. Vilhena, A. Ramalho, and F. Ferreira, "Impact of Temperature Variation on Friction Behaviour of Rare Earth-Doped Diamond-like Carbon Coatings with Ionic Liquid Lubricants," *Lubricants*, vol. 11, no. 7, Jul. 2023, doi: 10.3390/lubricants11070302.
- [47] A. E. Somers, P. C. Howlett, D. R. MacFarlane, and M. Forsyth, "A review of ionic liquid lubricants," *Lubricants*, vol. 1, no. 1. MDPI AG, pp. 3–21, Mar. 01, 2013. doi: 10.3390/lubricants1010003.
- [48] H. Khanmohammadi, W. Wijanarko, S. Cruz, M. Evaristo, and N. Espallargas, "Triboelectrochemical friction control of W- and Ag-doped DLC coatings in water-glycol with ionic liquids as lubricant additives," *RSC Adv*, vol. 12, no. 6, pp. 3573–3583, Jan. 2022, doi: 10.1039/d1ra08814a.