



## EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO TRIBOLÓGICO DE LÍQUIDOS IÓNICOS

**Nora Argelia Tafoya Medina**

*Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas*  
[ntafoya@ipn.mx](mailto:ntafoya@ipn.mx)

### Resumen

*Los líquidos iónicos (LI) son un grupo de sales orgánicas con un rango de punto de fusión por debajo del punto de ebullición del agua y cercano a la temperatura ambiente. Entre sus propiedades se encuentra su gran potencial lubricante debido a su alta estabilidad térmica y química, por lo que suelen tener mejores características lubricantes que los convencionales. En este trabajo se investigó el comportamiento tribológico del líquido iónico tetrafluoroborato de 1-butil-2,3-dimetilimidazolio, [BMIM][BF<sub>4</sub>] que se comparó contra el lubricante comercial (SAE 25W-50), en un par tribológico Poli-éter-éter-cetona (PEEK)/Acero Inoxidable. Las pruebas tribológicas se llevaron a cabo en un triboreómetro híbrido DHR-3 de TA Instruments, la geometría del sistema fue anillo sobre plato para un rango de velocidades de 0.001 a 100 rad s<sup>-1</sup> y cargas normales de 10 N y 30 N. En todas las pruebas, el coeficiente de fricción (CoF) para el líquido iónico [BMIM<sup>+</sup>][BF<sub>4</sub><sup>-</sup>] presentó valores en el rango de 0.076-0.21 y para el aceite comercial SAE 25W-50 en el rango de 0.09-0.16. El mejor comportamiento de lubricación corresponde al líquido iónico [BMIM<sup>+</sup>][BF<sub>4</sub><sup>-</sup>] que presenta un comportamiento de lubricación que se puede dividir en dos zonas: a velocidades angulares inferiores a 1 rad/s, tiene el CoF más alto de todos los lubricantes; a velocidades superiores a 1 rad/s, el CoF disminuye significativamente, alcanzando valores inferiores a los del lubricante comercial SAE 25W-50.*

*Palabras clave: Líquidos Iónicos; Tribología; Coeficiente de fricción; PEEK.*

Actualmente, el deterioro ambiental nos obliga al uso de fluidos ecológicos [1] en diversas aplicaciones. Con respecto a los fluidos usados como lubricantes, muchos se

basan en aceites minerales obtenidos como derivados del petróleo y, son utilizados en fluidos de transmisión de automóviles, aceites de corte limpios, fluidos hidráulicos, aceites de



engranajes industriales, aceites de laminación en frío y lubricantes de engranajes de automóviles [2]. Su mayor desventaja es su baja biodegradabilidad además de su alta toxicidad. Por ello, se ha vuelto imperativo el desarrollo de lubricantes alternativos que tengan características, tales como baja contaminación ambiental, combinaciones fáciles de aditivos [3], biodegradabilidad [4], costos de producción bajos, toxicidad baja, puntos de inflamación altos, volatilidad baja e índices de viscosidad alta [5].

En este contexto, una alternativa viable al uso de aceites minerales son los líquidos iónicos que son sustancias que poseen un amplio rango de estabilidad térmica y pueden ser utilizados en numerosas aplicaciones en ingeniería. Poseen propiedades como volatilidad baja, estabilidad térmica alta y temperatura de fluidez baja, que caracterizan a un buen lubricante [6,7]. Se ha comprobado la eficacia de los líquidos iónicos para reducir los coeficientes de fricción y las tasas de desgaste en una variedad de contactos metal-polímero, en un amplio rango de temperaturas, incluyendo condiciones criogénicas. Es decir, poseen propiedades tribológicas similares e incluso superiores a las de los lubricantes convencionales [8]. Wu, et. al., estudiaron el rendimiento antifricción y antidesgaste del líquido iónico hexilfluorofosfato de butil-3-metilimidazolio, como lubricante externo para el tribopar PEEK/Acero Inoxidable utilizando altas cargas (150–1500 N), sin enfriamiento, y se contrastó con el comportamiento de un aceite lubricante tradicional (aceite hidráulico antidesgaste LHM46).

Los resultados mostraron que este líquido iónico presentó un coeficiente de fricción más bajo en condiciones de alta carga debido a que existe una fuerte interacción sólido-líquido en la interfaz acero-LI por reacciones triboquímicas. Para el sistema de estudio (PEEK/Acero Inoxidable) el deslizamiento cae en la región de lubricación elastohidrodinámica cerca de 1500

N, manteniendo constante el coeficiente de fricción, mientras que con el aceite falla a 800 N [9].

En otra investigación, Wu et. al. utilizaron cinco LI's libres de halógenos (lh-LI) para investigar el rendimiento de PEEK-304ss a una temperatura elevada de 160 ° C, así como dos líquidos iónicos con halógeno (h-LI) que se utilizaron como referencias. Los estudios mostraron que los lh-LI's pueden funcionar como excelentes lubricantes para PEEK-304ss sin problemas de corrosión. Las tasas de desgaste del acero inoxidable lubricado por lh-LI's fueron del 71% de aquellas bajo lubricación de h-LI's, mientras que los coeficientes de fricción utilizando lh-LI's fueron el 33% de los que se obtuvieron con h-LI [10]. Con base en estos hallazgos, los líquidos iónicos libres de halógenos (lh-LI) como lubricantes externos, para el sistema PEEK-Acero inoxidable han mostrado un excelente rendimiento antidesgaste y, por lo tanto, grandes expectativas para reemplazar los aceites lubricantes tradicionales [11], aunque su alto costo de producción a escala industrial es el principal reto para resolver.

## 2. Metodología

### 2.1 Materiales

Los lubricantes externos seleccionados fueron un aceite de motor de alto desgaste, un aceite vegetal y un líquido iónico. El aceite de motor utilizado en este trabajo fue 25W-50, marca Roshfrans que presenta buenas propiedades antidesgaste y resistencia a la espuma. El líquido iónico utilizado fue *tetrafluoroborato de 1-butil-3-metilimidazolio*,  $[BMIM^+][BF_4^-]$ , adquirido a través de Sigma Aldrich.

Las superficies deslizantes en este trabajo fueron PEEK HPV compuesto, suministrados por Quadrant (MX) en forma de barra (productos Ketron®), sus dimensiones de



diámetro y espesor fueron de 1½" x 3/16", respectivamente. La composición del PEEK HPV es: 80% PEEK, 5% grafito, 10% PTFE y 5% fibras de carbono. El módulo de elasticidad del PEEK HPV es 8.62 GPa, y su resistencia a la tracción es de 131 MPa, respectivamente. Las características generales de ambos polímeros son las siguientes:

La superficie contraparte fue un anillo de acero inoxidable austenítico AISI304 con un diámetro externo de 32 mm, un diámetro interno de 30 mm y un espesor de 2 mm cuya composición química nominal fue de 18.51% en peso de Cr, 9.42% en peso de Ni, 2.12% en peso de Mn, 0.07% en peso de C y el resto de Fe, que exhibe un excelente rendimiento anticorrosivo en contacto con LI basados en derivados de imidazolio con diferentes sustituyentes y aniones [12]. El platillo donde se deposita la pieza polimérica también está fabricado de acero inoxidable austenítico AISI304 con un diámetro interno de 55 mm y un espesor de pared de 2 mm.

## 2.2 Pruebas de tribología

Las propiedades tribológicas del PEEK HPV/Acero Inoxidable con lubricación externa se estudiaron con un Reómetro Híbrido DHR-3 de TA Instruments Inc. [13], que permite obtener las curvas de flujo de los lubricantes, así como medir el coeficiente de fricción entre dos superficies sólidas en condiciones lubricadas o secas. El equipo consta de un conjunto de triboreómetro, módulo de control, y computadora, con un software denominado TRIOS para la adquisición de datos.

La configuración de prueba fue *Ring-On-Plate* (ROP), es decir que la superficie polimérica constituye la parte del plato que permanece fija mientras la contrasuperficie está conformada por el anillo de acero inoxidable como cuerpo deslizante (Figura 1) donde se muestra un acercamiento a las superficies en interacción donde se distingue un anillo de

acero inoxidable que rotará a una velocidad angular y fuerza normal predeterminadas, poniéndose en contacto con la muestra polimérica que se coloca dentro de un plato que posteriormente se inundara con el lubricante externo de estudio.

Las pruebas se realizaron a condiciones ambientales (temperatura 25 °C, humedad relativa 60%) con control de temperatura. Las cargas normales aplicadas en la muestra fueron de 10 y 30 N, el rango de velocidades angulares probadas fue de 0.001-100 rad/s. El software TRIOS calculó los valores del coeficiente de fricción para cada prueba. Todos los experimentos se llevaron a cabo por triplicado, los datos graficados corresponden al valor promedio de las tres pruebas.

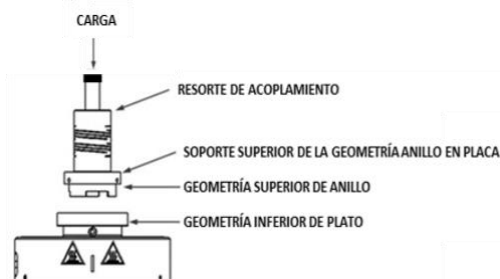


Figura 1. Configuración del Sistema Triboreológico [12]. Tomado de: <https://www.tainstruments.com/tribo-rheometry-accessory>.



### 2.3. Estudios de superficie de fricción

La morfología de las superficies de PEEK puro y PEEK HPV se analizó antes y después de las pruebas de fricción y desgaste, mediante un microscopio óptico modelo Quanta-200.

## 3. Resultados

### 3.1 Comportamiento tribológico

El comportamiento tribológico del sistema PEEK HPV-Lubricante-Acero inoxidable se puede observar en las Figuras 2 y 3, donde se presentan las curvas Stribeck para los lubricantes de estudio propuestos (aceite de motor 25W-50 y el líquido iónico [BMIM<sup>+</sup>][BF<sub>4</sub><sup>-</sup>], bajo condiciones de carga de 10 N y 30 N en un intervalo de velocidad angular de 0.001-100 rad/s, a la temperatura de 25°C.

En estos gráficos se puede observar en forma general el comportamiento tribológico del sistema PEEK HPV/ Acero inoxidable, donde los valores de CoF dependen de la velocidad angular aplicada. En general, a velocidades menores a 1 rad/s, el aceite comercial 25W-50 exhibe menores coeficientes de fricción a cualquier carga aplicada; a velocidades mayores de 1 rad/s, el líquido iónico [BMIM<sup>+</sup>][BF<sub>4</sub><sup>-</sup>] presenta coeficientes de fricción menores, aunque no muy alejados de los exhibidos por el aceite comercial 25W-50. Por ejemplo, para 10 N y 10 rad/s se alcanza una reducción del CoF del 20% con respecto al SAE 25W-50. A cargas mayores (30 N) y velocidades mayores a 1 rad/s, esta diferencia se reduce sustancialmente y el coeficiente de fricción se vuelve independiente de la carga aplicada e incluso exhibe valores de CoF muy cercanos para cada uno de los lubricantes de estudio, como puede observarse en las figuras 4 y 5.

Este efecto puede asociarse al comportamiento viscoso de los lubricantes, los

cuales, a cargas mayores de 10 N, presentan viscosidades muy similares en todos los regímenes de lubricación.

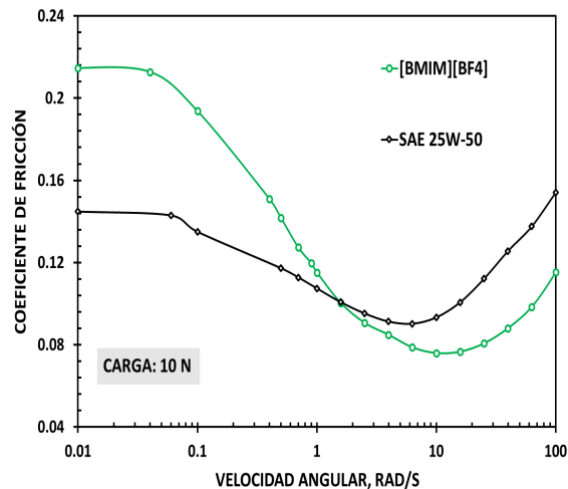


Figura 2. Coeficientes de fricción del sistema PEEK HPV/Acero Inoxidable con diferentes lubricantes (condiciones: 10 N; 0.001-100 rad/s) (elaboración propia).

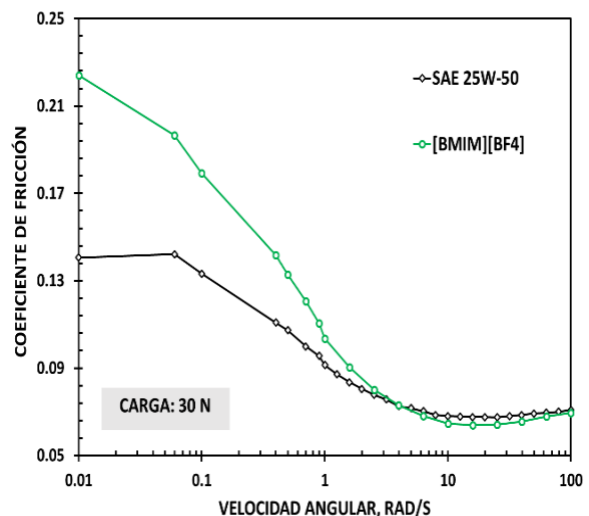


Figura 3. Coeficientes de fricción del sistema PEEK HPV/Acero Inoxidable con diferentes lubricantes (condiciones: 30 N; 0.001-100 rad/s) (elaboración propia).

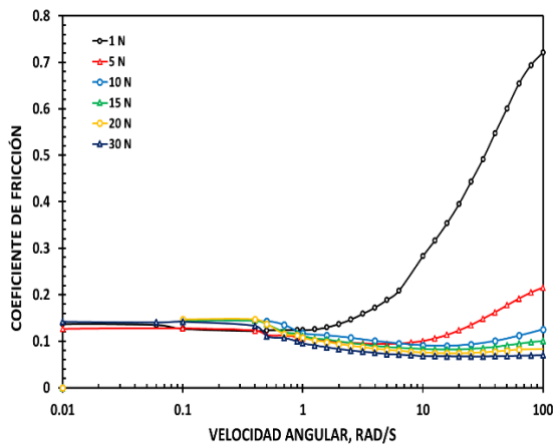


Figura 4. Coeficientes de fricción del sistema PEEK HPV/Acero Inoxidable con lubricante SAE 25W-50, condiciones: 1, 5, 10, 15, 20, 30 N y 0.001-100 rad/s (elaboración propia).

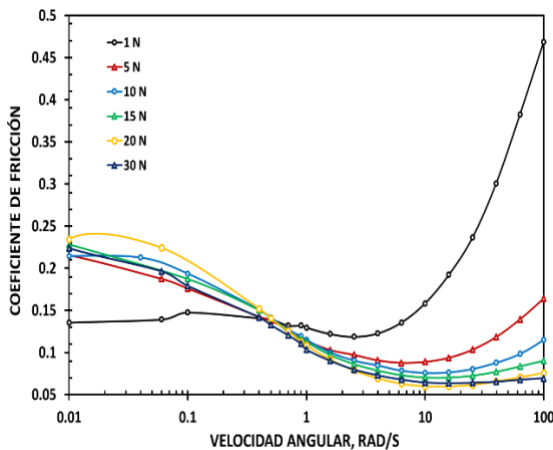


Figura 5. Coeficientes de fricción del sistema PEEK HPV/Acero Inoxidable, con lubricante [BMIM<sup>+</sup>][BF<sub>4</sub><sup>-</sup>], condiciones: 1, 5, 10, 15, 20, 30 N y 0.001-100 rad/s (elaboración propia).

### 3.3 Influencia de la viscosidad en el CoF

En los experimentos triboreológicos que se llevaron a cabo, al mismo tiempo que se realiza la medición del coeficiente de fricción, se cuantifica la viscosidad del lubricante, lo que permite establecer una relación entre su comportamiento viscoso y el coeficiente de fricción, bajo las condiciones de operación establecidas.

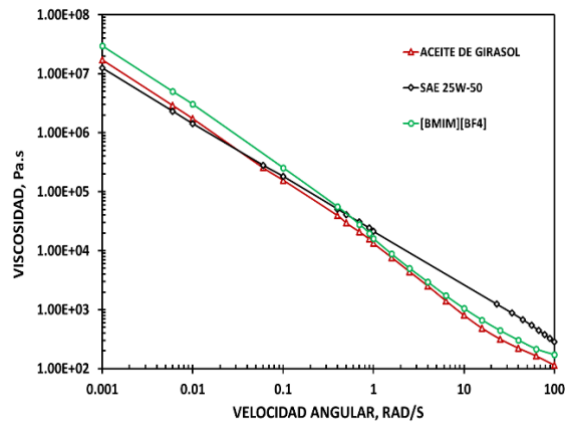


Figura 6. Comportamiento viscoso de los lubricantes (condiciones: 10 N y 0.001-100 rad/s). Elaboración propia.

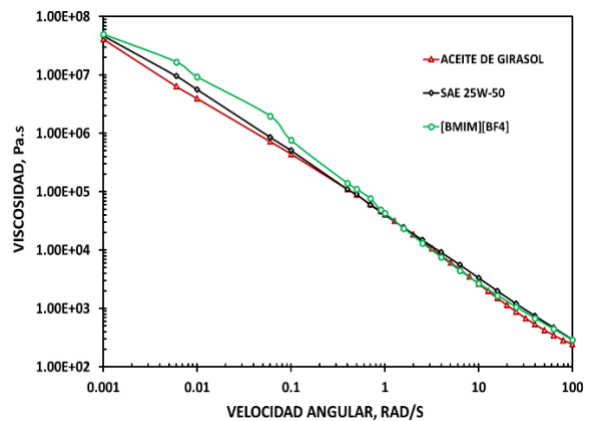


Figura 7. Comportamiento viscoso de los lubricantes (condiciones: 30 N y 0.001-100 rad/s). Elaboración propia.

Las Figuras 6 y 7 muestran la variación de la viscosidad a medida que aumenta la velocidad angular en el rango de 0.001-100 rad/s, aplicando cargas de 10 N y 30 N, respectivamente. A 10 N, se observa la relación entre la viscosidad de los lubricantes y el coeficiente de fricción medido (Figura 6), donde el líquido iónico [BMIM<sup>+</sup>][BF<sub>4</sub><sup>-</sup>], presenta viscosidades mayores que el aceite SAE 25W-50 a velocidades menores de 1 rad/s; por el contrario, a velocidades mayores de 1 rad/s, el comportamiento se invierte, es decir la viscosidad del [BMIM<sup>+</sup>][BF<sub>4</sub><sup>-</sup>], es menor que la

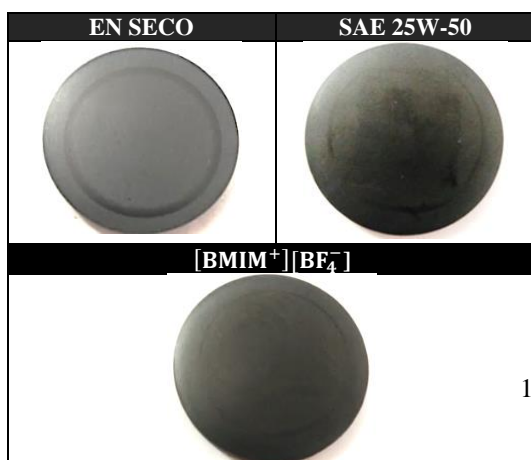


del aceite SAE 25W-50. Esto coincide con el comportamiento del coeficiente de fricción antes estudiado, por lo que es posible establecer que el lubricante que presente mayor viscosidad en un cierto rango de velocidad tendrá un mayor coeficiente de fricción y aquel que su viscosidad sea menor, exhibirá valores menores del coeficiente de fricción. También resalta el hecho que para cargas mayores de 10 N (Figura 7) y velocidades angulares mayores a 1 rad/s, el comportamiento viscoso es muy similar para ambos lubricantes, lo cual también coincide con el comportamiento del coeficiente de fricción que también es muy similar para los lubricantes en estudio.

#### 3.4. Análisis de superficies.

El análisis de superficie de las muestras de PEEK HPV después de los experimentos tribológicos a través de Microscopía Óptica (MO) mostró que los especímenes poliméricos presentaron una marca característica del tipo de contacto (ROP) que se estableció con el contracuerpo durante la interacción, es decir, una marca circular sobre la superficie del espécimen polimérico (Tabla 1).

Tabla 1. Especímenes de PEEK HPV con las marcas después del contacto Ring on Plate para cada lubricante externo. Microscopía óptica (elaboración propia).



1 Song, Z., Yu, Q., Cai, M., Huang, G., Yao, M., Li, D., Zhou, F. (2015). Green Ionic Liquid Lubricants Prepared from Anti-Inflammatory Drug. Tribology Letters, 60(3). doi:10.1007/s11249-015-0611-5

La marca de desgaste es menos evidente para el espécimen polimérico donde se empleó el líquido iónico como lubricante, comparándola con el lubricante comercial. Ambas marcas se comparan contra la de lubricación seca (sin lubricante externo), donde el desgaste es mucho más dramático.

#### 4. Conclusiones

En este trabajo se investigó el comportamiento triboreológico del sistema PEEK HPV/Acero Inoxidable, utilizando dos lubricantes de diferente naturaleza, un aceite mineral, SAE 25W-50 y un líquido iónico, Tetrafluoroborato de 1-butil-3-metilimidazolio [BMIM<sup>+</sup>][BF<sub>4</sub><sup>-</sup>]. Los hallazgos encontrados a partir de los resultados del experimento fueron los siguientes:

- El líquido iónico [BMIM<sup>+</sup>][BF<sub>4</sub><sup>-</sup>] exhibió los CoF más altos a velocidades menores a 1 rad/s, no obstante, a velocidades mayores este comportamiento se invierte, es decir, presenta CoF menores que los correspondientes al lubricante comercial.

- Conforme la carga aumenta, el comportamiento tribológico del sistema de estudio es prácticamente independiente del tipo de lubricante utilizado ya que los coeficientes de fricción correspondientes a cada lubricante son muy similares entre sí. Este comportamiento tribológico tiene que ver con el comportamiento viscoso de los lubricantes, es decir, a medida que aumenta la carga las diferencias entre los valores de viscosidad se reducen significativamente.

#### Referencias



2. Hoshi, M. (1984). Reducing friction losses in automobile engines. *Tribology International*, 17(4), 185–189. doi:10.1016/0301-679x(84)90017-3
3. Palacio, M., & Bhushan, B. (2010). A Review of Ionic Liquids for Green Molecular Lubrication in Nanotechnology. *Tribology Letters*, 40(2), 247–262. doi:10.1007/s11249-010-9671-8
4. Scott, M.P.; Benton, M.G.; Rahman, M.; Brazel, C.S. Plasticizing effects of imidazolium salts in PMMA: High-temperature stable flexible engineering materials. In *Ionic Liquids As Green Solvents: Progress and Prospects*; ACS Symposium Series 856; American Chemical Society: Washington, DC, 2003; pp. 468-477.
5. Castejón, H. J., Wynn, T. J., & Marcin, Z. M. (2014). Wetting and Tribological Properties of Ionic Liquids. *The Journal of Physical Chemistry B*, 118(13), 3661–3668. doi:10.1021/jp411765f
6. Zhou, F., Liang, Y., & Liu, W. (2009). Ionic liquid lubricants: designed chemistry for engineering applications. *Chemical Society Reviews*, 38(9), 2590. doi:10.1039/b817899m
7. Earle, M. J., Esperança, J. M. S. S., Gilea, M. A., Canongia Lopes, J. N., Rebelo, L. P. N., Magee, J. W., Widegren, J. A. (2006). The distillation and volatility of ionic liquids. *Nature*, 439(7078), 831–834. doi:10.1038/nature04451
8. Kondo, Y., Koyama, T., & Sasaki, S. (2013). Tribological Properties of Ionic Liquids. In *Ionic Liquids-New Aspects for the Future*. <https://doi.org/10.5772/52595>
9. Wu, J., Zhu, J., Mu, L., Shi, Y., Dong, Y., Feng, X., & Lu, X. (2016). High load capacity with ionic liquid-lubricated tribological system. *Tribology International*, 94, 315–322. doi:10.1016/j.triboint.2015.08.022
10. Wu, J., Lu, X., Feng, X., & Shi, Y. (2016). Halogen-free ionic liquids as excellent lubricants for PEEK-stainless steel contacts at elevated temperatures. *Tribology International*, 104, 1–9. doi:10.1016/j.triboint.2016.08.009
- Gusain, R., & Khatri, O. P. (2015). Halogen-free ionic liquids: effect of chelated orthoborate anion structure on their lubrication properties. *RSC Advances*, 5(32), 25287–25294. doi:10.1039/c5ra03092g.
- Hagiwara, R., & Ito, Y. (2000). Room temperature ionic liquids of alkylimidazolium cations and fluoroanions. *Journal of Fluorine Chemistry*, 105(2), 221–227. doi:10.1016/s0022-1139(99)00267-5.
- TA Instruments. (s.f.). *Tribo-Rheometry*. Recuperado de: <https://www.tainstruments.com/tribo-rheometry-accessory/>