

Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey

Campus Estado de México

Escuela de Ingeniería y Ciencias



Estudio triboreológico del sistema PEEK/Acero Inoxidable usando  
biolubricantes

Disertación presentada por

Nora Argelia Tafoya Medina

sometida a la

Escuela de Ingeniería y Ciencias

como un requisito parcial para obtener el grado académico de

Doctora en

Ciencias de Ingeniería

Atizapán de Zaragoza, Estado de México, Junio 21 de 2021

## Dedicatoria

*A Luis Uriel*

*A la memoria de Luis Armando Tafoya Briseño  
(q.e.p.d)*

## **Agradecimientos**

Al Instituto Politécnico Nacional, mi Alma Mater, por otorgarme las facilidades para dedicar todo el tiempo a la realización de mis estudios de posgrado. Es un privilegio pertenecer a esta noble institución.

Al Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey por darme la oportunidad de superarme profesionalmente otorgándome una beca de estudio durante todo el posgrado. La formación recibida es de un valor incalculable y determinará mi desempeño profesional de hoy en adelante. Será un gran honor ser EXATEC, lo agradeceré toda mi vida.

A mi familia, por apoyarme y darme el soporte emocional necesario para emprender la apasionante aventura de realizar un doctorado.

A la Dra. Dora Iliana Medina Medina por su invaluable apoyo, conocimiento, paciencia y tiempo invertido en mi formación.

A la Dra. Lindsay Sidney Hernández Muñoz por su ayuda profesional en el desarrollo de este trabajo.

Al Dr. Heriberto Cruz Martínez por su acompañamiento durante el doctorado, su ayuda profesional, orientación y motivación constante.

A los miembros del comité, Dra. Elvia Patricia Sánchez Rodríguez y Dra. Anai Alicia Valencia Lazcano por sus valiosas aportaciones para mejorar este trabajo.

Triborheological studio of PEEK/Stainless Steel system using biolubricants  
by  
Nora Argelia Tafoya Medina

**ABSTRACT**

Currently, the climate change affecting the world is advancing at great speed and it is imperative to act quickly in all areas to try to reverse it and avoid the consequences for the human species. In this sense, tribology is a science that can provide valuable information to generate highly sustainable solutions in the area of lubrication.

In this context, the present work is framed where the triborheological behavior of the Polyetheretherketone (PEEK)/Lubricant/Stainless Steel system was investigated, which has acquired great relevance in recent years in the metal-mechanical industry due to the enormous variety of applications it can have, making it of great interest in the research area.

The configuration of the system was the ring disk (ROP) and the measurements were realized with a hybrid triboreometer (TA Instruments) for a speed range of 0.001-100 RAD/S and normal loads of 10 N and 30 N. The biolubricants selected for the study were vegetable sunflower oils and ionic liquids: 1-butyl-3-methylimidazolium tetrafluoroborate,  $[\text{BMIM}^+][\text{BF}_4^-]$  and methyl [trioctyl-] bis [trifluoro-methyl-imide] ammonium,  $[\text{MTOA}^+][\text{NTF}_2^-]$ , whose triborheological responses were contrasted with that of the commercial lubricant SAE (25W-50), widely used in motor vehicles.

The findings found in the study show that the lowest coefficients of friction correspond to sunflower oil in the range of angular velocities (0.001-100 RAD/S) and applied loads (10 N and 30 N), although at angular velocities greater than 1 RAD/S the ionic liquid  $[\text{BMIM}^+][\text{BF}_4^-]$  shows a triborheological behavior very close to that of vegetable lubricant, both superior to that of commercial oil SAE 25W-50.

This behavior is related to the type of film that forms between the sliding surfaces of the triborheological pair (PEEK/Stainless steel). The high concentration of mono and polyunsaturated fatty acids presents in vegetable oil, improve tribological performance by establishing dense and compact layers on interaction surfaces that minimize friction between them, preventing wear.

# Estudio triboreológico del sistema PEEK/Acero Inoxidable usando biolubricantes

por

Nora Argelia Tafoya Medina

## RESUMEN

Actualmente el cambio climático que afecta al mundo está avanzando a gran velocidad y es imperativo actuar de manera rápida en todos los ámbitos para tratar de revertirlo y evitar las consecuencias para la especie humana. En este sentido, la tribología es una ciencia que puede aportar información de valor para generar soluciones altamente sustentables en el rubro de la lubricación. En este contexto se enmarca el presente trabajo donde se investigó el comportamiento triboreológico del sistema Poliéterétercetona (PEEK)/Lubricante/Acero inoxidable, que ha adquirido gran relevancia en los últimos años dentro de la industria metal-mecánica debido a la enorme variedad de aplicaciones que puede tener, por lo que es de gran interés en el área de investigación.

La configuración del sistema fue la de anillo en disco (ROP) y las mediciones se realizaron con un triboreómetro híbrido (marca TA Instruments) para un rango de velocidades de 0.001-100 RAD/S y cargas normales entre 1 N y 30 N. Los biolubricantes seleccionados para el estudio fueron aceites vegetales de girasol y los líquidos iónicos: tetrafluoro borato de 1-butil-3-metilimidazolio,  $[BMIM^+][BF_4^-]$  y bis[trifluoro-metil-sulfonil]imida de metil-trioctil-amonio,  $[MTOA^+][NTF_2^-]$ , cuyas respuestas triboreológicas fueron contrastadas con la del lubricante comercial SAE (25W-50), utilizado ampliamente en automotores.

Los hallazgos encontrados en el estudio muestran que los coeficientes de fricción más bajos corresponden al aceite de girasol en el rango de velocidades angulares (0.001-100 RAD/S) y cargas aplicadas (1 N y 30 N), aunque a velocidades angulares mayores a 1 RAD/S el líquido iónico  $[BMIM^+][BF_4^-]$  muestra un comportamiento triboreológico muy cercano al del lubricante vegetal, ambos superiores al del aceite comercial SAE 25W-50. Este comportamiento está relacionado con el tipo de película que se forma entre las superficies deslizantes del par triboreológico (PEEK/Acero inoxidable). La alta concentración de ácidos grasos mono y poliinsaturados presentes en el aceite vegetal, mejoran el rendimiento tribológico al establecer capas densas y compactas en las superficies de interacción que minimizan el rozamiento entre ellas, evitando el desgaste.

## ÍNDICE DE FIGURAS

| No.         | Figura                                                                                                                                                                        | Pag. |
|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Figura 2.1  | Sistema tribológico.                                                                                                                                                          | 4    |
| Figura 2.2  | Coeficiente de fricción.                                                                                                                                                      | 6    |
| Figura 2.3  | Comportamiento de lubricación en sistemas tribológicos. Curva Stribeck                                                                                                        | 9    |
| Figura 2.4  | Curva Stribeck: Lubricación límite.                                                                                                                                           | 10   |
| Figura 2.5  | Curva Stribeck: Lubricación mixta.                                                                                                                                            | 10   |
| Figura 2.6  | Curva Stribeck: Lubricación hidrodinámica.                                                                                                                                    | 11   |
| Figura 2.7  | Aniones y cationes comunes de líquidos iónicos                                                                                                                                | 16   |
| Figura 4.1  | Superficies de una muestra circular del polímero (a) PEEK puro, (b) PEEK HPV, $\theta=2''$                                                                                    | 34   |
| Figura 4.2  | Estructura química de lubricantes y superficies tribológicas                                                                                                                  | 35   |
| Figura 4.3  | (a) Partes del triboreómetro, (b) Vista cercana de las superficies deslizantes en la prueba ROP.                                                                              | 36   |
| Figura 4.4  | Configuración del sistema triboreológico                                                                                                                                      | 38   |
| Figura 5.1  | Reología de los lubricantes externos seleccionados para el par tribológico PEEK HPV/Acero inoxidable.                                                                         | 42   |
| Figura 5.2  | Coeficientes de fricción del sistema PEEK/Ac. Inox. utilizando PEEK HPV vs PEEK puro, lubricante vegetal de aceite de girasol (condiciones: 10 N y 0.001-100 RAD/S).          | 43   |
| Figura 5.3  | Comportamiento tribológico para el sistema PEEK HPV/Ac. Inox. Modos de lubricación: a) Seca, b) Aceite de girasol c) Aceite comercial SAE 25W-50. Condiciones: 5 N y 1 RAD/S. | 44   |
| Figura 5.4  | Ángulo de contacto.                                                                                                                                                           | 44   |
| Figura 5.5  | Coeficientes de fricción del sistema PEEK HPV/Ac. Inox. con diferentes lubricantes (condiciones: 10 N y 0.001-100 RAD/S).                                                     | 46   |
| Figura 5.6  | Coeficientes de fricción del sistema PEEK HPV/Ac. Inox. con diferentes lubricantes (condiciones: 30 N y 0.001-100 RAD/S)                                                      | 47   |
| Figura 5.7  | Coeficientes de fricción del sistema PEEK HPV/Ac. Inox. con diferentes lubricantes (condiciones: 1 N y 0.001-100 RAD/S)                                                       | 48   |
| Figura 5.8  | Coeficientes de fricción del sistema PEEK HPV/Ac. Inox. con diferentes lubricantes (condiciones: 5 N y 0.001-100 RAD/S)                                                       | 48   |
| Figura 5.9  | Coeficientes de fricción del sistema PEEK HPV/Ac. Inox. con diferentes lubricantes (condiciones: 10 N y 0.001-100 RAD/S)                                                      | 49   |
| Figura 5.10 | Coeficientes de fricción del sistema PEEK HPV/Ac. Inox. con diferentes lubricantes (condiciones: 15 N y 0.001-100 RAD/S)                                                      | 49   |

| No.         | Figura                                                                                                                                                            | Pág. |
|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Figura 5.11 | Coeficientes de fricción del sistema PEEK/Ac. Inox. con diferentes lubricantes (condiciones: 20 N y 0.001-100 RAD/S).                                             | 50   |
| Figura 5.12 | Coeficientes de fricción del sistema PEEK/Ac. Inox. con diferentes lubricantes (condiciones: 30 N y 0.001-100 RAD/S).                                             | 50   |
| Figura 5.13 | Coeficientes de fricción del sistema PEEK HPV/Ac. Inox. con lubricante vegetal de aceite de girasol, condiciones: 1, 5, 10, 15, 20, 30 N y 0.001-100 RAD/S.       | 51   |
| Figura 5.14 | Coeficientes de fricción del sistema PEEK HPV/Ac. Inox. con lubricante SAE 25W-50, condiciones: 1, 5, 10, 15, 20, 30 N y 0.001-100 RAD/S.                         | 51   |
| Figura 5.15 | Coeficientes de fricción del sistema PEEK/Ac. Inox. con líquido iónico [BMIM <sup>+</sup> ][BF <sub>4</sub> <sup>-</sup> ] (condiciones: 10 N y 0.001-100 RAD/S). | 52   |
| Figura 5.16 | Viscosidades de cada lubricante alcanzadas durante el contacto tribológico del sistema PEEK/Ac. Inox. (condiciones: 30 N y 0.001-100 RAD/S).                      | 52   |
| Figura 5.17 | Comportamiento viscoso de los lubricantes (condiciones: 10 N y 0.001-100 RAD/S).                                                                                  | 54   |
| Figura 5.18 | Comportamiento viscoso de los lubricantes (condiciones: 30 N y 0.001-100 RAD/S).                                                                                  | 54   |
| Figura 5.19 | Análisis SEM para la muestra lubricada con aceite de girasol a 30 N. Magnificación: a) 100X y b) 500X.                                                            | 57   |
| Figura 5.20 | Análisis por Energía de Dispersión de Rayos X (EDX) de la muestra lubricada con aceite de girasol a 30 N.                                                         | 57   |

## ÍNDICE DE TABLAS

| No.       | Tabla                                                                                                                 | Pág. |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Tabla 2.1 | Tipos de desgaste                                                                                                     | 7    |
| Tabla 2.2 | Factores que influyen en la lubricación                                                                               | 13   |
| Tabla 2.3 | Comparación entre lubricación interna y externa.                                                                      | 29   |
| Tabla 5.1 | Propiedades fisicoquímicas de los lubricantes utilizados en este trabajo.                                             | 39   |
| Tabla 5.2 | Ángulo de contacto de lubricantes con superficies PEEK.                                                               | 40   |
| Tabla 5.3 | Ecuaciones reológicas de los lubricantes                                                                              | 41   |
| Tabla 5.4 | Ángulo de contacto formado entre lubricante vegetal con superficies PEEK                                              | 45   |
| Tabla 5.5 | Comparación de resultados obtenidos con los del estado del arte                                                       | 53   |
| Tabla 5.6 | Especímenes de PEEK con las marcas después del contacto <i>Ring on Plate</i> para cada lubricante. Microscopía Óptica | 55   |
| Tabla 5.7 | Marcas PEEK después de la prueba por MO y SEM                                                                         | 56   |



# ÍNDICE

|                                                 | <b>Pág.</b> |
|-------------------------------------------------|-------------|
| <b>Abstract</b>                                 | iii         |
| <b>Resumen</b>                                  | iv          |
| <b>Índice de figuras</b>                        | v           |
| <b>Índice de tablas</b>                         | vii         |
| <br>                                            |             |
| <b>I. Introducción</b>                          | 1           |
| <b>II. Antecedentes</b>                         | 3           |
| 2.1 Tribología                                  | 3           |
| 2.1.1 Sistemas triboreológicos                  | 3           |
| 2.2 Fricción                                    | 4           |
| 2.2.1 Coeficiente de fricción                   | 5           |
| 2.3 Desgaste                                    | 7           |
| 2.4 Lubricación                                 | 8           |
| 2.4.1 Concepto                                  | 8           |
| 2.4.2 Regímenes de lubricación. Curva Stribeck. | 8           |
| 2.4.3 Factores que influyen en la lubricación   | 12          |
| 2.4.4 Tipos de lubricación                      | 14          |
| 2.5 Lubricantes innovadores                     | 15          |
| 2.5.1 Líquidos iónicos                          | 15          |
| 2.5.2 Biolubricantes (aceites vegetales)        | 18          |
| 2.6 Superficies tribológicas poliméricas        | 20          |
| 2.6.1 Polímeros                                 | 20          |
| 2.6.2 Aplicaciones poliméricas en tribología    | 23          |
| <br>                                            |             |
| <b>III. Justificación y objetivos</b>           | 30          |
| <br>                                            |             |
| <b>IV. Materiales y métodos</b>                 | 33          |
| 4.1 Materiales                                  | 33          |
| 4.1.1 Superficies                               | 33          |
| 4.1.2 Lubricantes                               | 34          |
| 4.2 Pruebas de triboreología                    | 36          |
| 4.3 Mojabilidad de los lubricantes líquidos     | 37          |
| 4.4 Estudios de superficie de fricción.         | 38          |

|                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>V. Análisis y discusión de resultados</b>                                | 39 |
| 5.1 Propiedades fisicoquímicas                                              | 39 |
| 5.2 Mojabilidad de los líquidos lubricantes                                 | 40 |
| 5.3 Pruebas de triboreología                                                | 41 |
| 5.3.1 Comportamiento reológico de los lubricantes seleccionados             | 41 |
| 5.3.2 Comportamiento triboreológico PEEK puro y PEEK HPV                    | 42 |
| 5.3.3 Comportamiento triboreológico de los lubricantes de estudio.          | 46 |
| 5.3.4 Influencia de la viscosidad medida durante el contacto triboreológico | 53 |
| 5.4 Análisis de superficies                                                 | 55 |
| Conclusiones                                                                | 58 |
| Perspectivas                                                                | 59 |
| Referencias bibliográficas                                                  | 60 |
| Apéndice 1. Abreviaturas y símbolos                                         | 81 |

## I. INTRODUCCIÓN

La lubricación es el proceso que se utiliza para separar dos superficies sólidas que presentan un movimiento relativo y están siendo sometidas a rozamiento [1]. La función principal del lubricante es evitar el contacto directo entre las superficies de interacción y reducir la fricción y el desgaste, logrando con ello reducir las pérdidas de energía y los desechos producidos [2]. Para ello se realiza la adición de un lubricante, generalmente, líquido o sólido, entre las superficies deslizantes. El lubricante está constituido por un componente principal llamado *base*, al que se le pueden añadir o no, aditivos que le confieren las propiedades específicas requeridas para una cierta aplicación [3].

Los procesos de lubricación dependen de varios factores, como la geometría, la rugosidad, la textura y la composición química de las superficies en deslizamiento; la carga de contacto, la presión y la temperatura, la velocidad de deslizamiento, las condiciones del medio ambiente (humedad relativa), las propiedades físicas y químicas del lubricante, así como las propiedades de la película lubricante [4,5]. La elección del lubricante adecuado y el modo de lubricación dependen principalmente, de la aplicación y de las condiciones específicas de operación del equipo o maquinaria, tomando en cuenta consideraciones de seguridad y ambientales [6].

Los aceites a base de minerales se usan ampliamente como lubricantes en aplicaciones industriales, por ejemplo, como fluidos de corte en procesos de mecanizado [7]. Tienen la ventaja de presentar buena lubricidad y alta estabilidad, lo que garantiza una larga vida útil [8], no obstante, los residuos de estos lubricantes pueden causar una serie de efectos no deseados en la salud humana y el medio ambiente. Alrededor del 85% del volumen de lubricantes utilizados en la industria del mecanizado se basa en minerales [9]. Se estima que en 2014 se consumieron 36.36 millones de toneladas de lubricantes en todo el mundo, y se proyecta que este volumen crecerá a 43.87 millones de toneladas para 2022 [10].

El impacto ambiental de estos desechos es motivo de preocupación por lo que se ha venido promoviendo la investigación para el desarrollo de lubricantes “amigables” con el medioambiente, llamados biolubricantes [11-13]. En este contexto, los aceites vegetales son de base orgánica, ecológicos, biodegradables, menos tóxicos y muestran, en algunos casos, un mejor rendimiento en comparación con los aceites a base de minerales [14–18].

Otros lubricantes potenciales son los líquidos iónicos (IL's) conformados por cationes y aniones que poseen características únicas, entre ellas, un amplio rango de niveles de viscosidad, polaridad inherente, baja presión de vapor, baja volatilidad, bajo punto de fusión, estabilidad térmica superior, alta temperatura de inflamación y una alta miscibilidad en compuestos orgánicos [19,20]. De acuerdo con investigaciones recientes, se han encontrado evidencias de la capacidad de los IL's para formar rápidamente una capa delgada de lubricante que puede evitar el contacto directo de las superficies en el régimen de lubricación límite de forma más eficiente que el aceite mineral y el agua [21]. Estas películas tienden a ser densas y están compuestas de moléculas que se adsorben fuertemente en las superficies. La tenacidad de esta película molecular depende principalmente del tipo de anión o catión involucrados que pueden reducir sustancialmente la fricción y desgaste entre las superficies en contacto [22-24].

## II. ANTECEDENTES

### 2.1 Tribología

La *Tribología* surgió como ciencia en marzo de 1966, en la Gran Bretaña [25]. La tribología proviene etimológicamente de las palabras griegas “tribos” y “logos” que significan *fricción* y *estudio* [26], respectivamente, que hacen referencia a la ciencia y la tecnología de superficies y fluidos que interactúan en movimientos relativos y prácticas asociadas. Los fenómenos involucrados son la fricción, lubricación y desgaste [27,28], que se pueden definir de la siguiente manera: a) la fricción se define como la resistencia que presentan dos superficies a deslizarse una sobre otra [29]; b) el desgaste es la consecuencia principal de la fricción, ya que se remueve material de las superficies debido al movimiento que existe entre las mismas [30]; c) la lubricación, es el empleo de un material en estado líquido o sólido con la finalidad de disminuir los efectos en los materiales donde se presentan la fricción y el desgaste [31]. El lubricante tiene la función de reducir la fricción entre las superficies, formando una película en la interfase que evita que se pongan en contacto [32]. La lubricación abarca la selección del lubricante adecuado, de acuerdo con sus propiedades fisicoquímicas, así como el proceso de alimentación, recirculación y presurización [33].

El estudio de la fricción y sus efectos en el desgaste de superficies con su consecuente pérdida de energía se ha realizado durante años para generar soluciones que coadyuven a conservar y reducir energía, lograr movimientos más rápidos y precisos, incrementar la productividad y reducir el mantenimiento [34]. Para lograrlo es muy importante elegir el lubricante apropiado de acuerdo con la aplicación y las condiciones específicas de operación del proceso.

#### 2.1.1 Sistemas triboreológicos

Un sistema triboreológico está compuesto mínimo por dos superficies (metálicas/no metálicas) que se ponen en contacto, lo que genera una interacción entre ambas partes y con el medio que los rodea. La fuerza de fricción se opone al movimiento de una superficie con respecto a la otra, lo cual origina el proceso de desgaste del material, que implica la pérdida de materia en la interfase de ambas superficies. El uso de una sustancia intermedia llamada lubricante, tiene la función de reducir la fricción para minimizar el desgaste y extender la vida útil de las superficies [35].

Para caracterizar un sistema tribológico [36], se toman en cuenta aspectos como: la geometría de las superficies en contacto; las propiedades superficiales de los materiales y el tipo de lubricante (naturaleza, reología); las condiciones de operación (influyen directamente en las propiedades de las superficies); el régimen cinemático (velocidades relativas de los cuerpos en contacto) y el régimen dinámico (la fuerza normal sobre la superficie de contacto). En la figura 2.1 se muestra la interrelación de estos elementos.

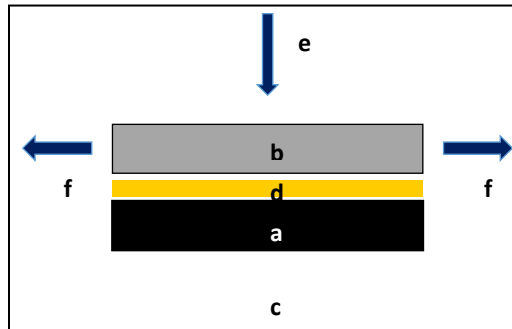


Figura 2.1. Sistema tribológico. a) Cuerpo base, b) Contracuerpo, c) Condiciones de operación (presión, temperatura, humedad relativa, etc.), d) Lubricante, e) Fuerza normal (carga) y f) Movimiento.

## 2.2 Fricción

Cuando una superficie se desliza sobre otra debe vencer una resistencia, que es una fuerza que se opone al movimiento conocida como fricción [37]. La fricción fluida es un estado de fricción en el cual el sistema tribológico está constituido por tres elementos, un par sólido friccionante y una fase líquida, es decir un lubricante líquido que separa las superficies de dicho par que es sometido a determinadas condiciones de velocidad y carga.

La resistencia a la fricción en el movimiento relativo de dos superficies sólidas es proporcional a la fuerza que ejerce presión sobre las superficies, así como su rugosidad [38]. Esta fuerza de presión que es perpendicular a las superficies ocasiona que ambas hagan contacto y se denomina ( $F_N$ ). La fuerza de fricción se define matemáticamente de la siguiente manera:

$$F_F = CoF \cdot F_N \quad (2.1)$$

$$F_N = W = mg \quad (2.2)$$

Dónde:

$F_f$ , es la fuerza de fricción.

$F_N$ , es la fuerza normal, es perpendicular a las superficies.

$CoF$ , es el coeficiente de fricción.

$m$ , es la masa de la superficie deslizante.

$g$ , es la gravedad.

$W$ , es el peso de la superficie deslizante.

La fuerza de fricción es directamente proporcional a la fuerza normal aplicada al sistema. El valor del coeficiente de fricción depende en gran medida de la viscosidad del lubricante, siendo una de las propiedades más importantes a tomar en cuenta para la selección del lubricante en una aplicación específica [39]. La viscosidad de un fluido se define como la resistencia que presenta el mismo para fluir, y esto representa un motivo de fricción. Conforme la viscosidad del fluido es menor, este fluirá más fácilmente, por lo que es necesario conocer el comportamiento de la viscosidad en el rango de las condiciones de operación de todo sistema tribológico [40].

### 2.2.1 Coeficiente de fricción

Durante la interacción de dos superficies que se encuentran en movimiento relativo se generan fuerzas tangenciales de rozamiento, cuyo sentido es opuesto al de la fuerza aplicada, como se observa en la figura 2.2. La naturaleza de esta fuerza está ligada a las interacciones de las partículas microscópicas de las dos superficies implicadas [41]. La mayoría de las superficies son rugosas si se observan a escala microscópica, aunque a simple vista se perciban pulidas.

El valor del coeficiente de fricción es característico de cada par de materiales en contacto; es decir, no es una propiedad intrínseca de un sistema [42] y es función de condiciones de operación tales como la temperatura, la velocidad relativa (angular, lineal), configuración del sistema, rugosidad de las superficies, etc.

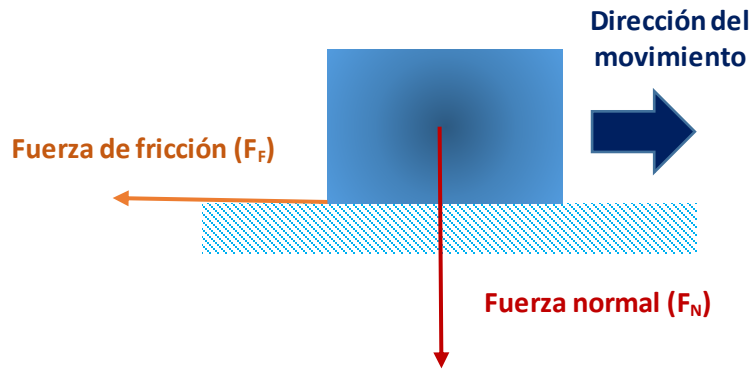


Figura 2.2. Coeficiente de fricción. [42]

Una vez conocido el valor del coeficiente de fricción aplicado, la fuerza de fricción máxima que puede ejercer una superficie sobre la otra se expresa como el producto del coeficiente de fricción por la fuerza normal (perpendicular) a ambas superficies [43].

$$F_F = Co_F F_N \quad (2.3)$$


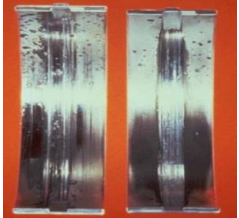



$$CoF = \frac{F_F}{F_N} \quad (2.4)$$



## 2.3 Desgaste

El desgaste es un fenómeno físico que provoca la pérdida o deformación de un material o pieza perteneciente a un equipo. El desgaste se incrementa conforme se incrementa el tiempo de operación y depende muchas veces de las condiciones de operación. Los tipos principales de desgaste son por adherencia, abrasión, fatiga, erosión, entre otros [44]. En la tabla 2.1 se muestran sus características y como se aprecia físicamente cada tipo de desgaste.

Tabla 2.1. Tipos de desgaste

| Tipo de desgaste  | Características                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | Imagen                                                                                |
|-------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Adherencia</b> | Se presenta debido a la afinidad entre superficies cuyos materiales son iguales o muy parecidos, ya que existe una transferencia de moléculas que se desprenden y pasan a formar parte de la otra superficie formando una unión [45-48]. Ejemplo: adherencia entre pistón y camisa.                               |    |
| <b>Abrasión</b>   | Se remueve material de una superficie en interacción con otra que posee partículas duras y/o afiladas. Las evidencias son ralladuras, surcos, con sus consecuentes cambios de dimensiones [49-52]. Ejemplo, desgaste en cojinetes.                                                                                |   |
| <b>Fatiga</b>     | Es el resultado de esfuerzos mecánicos cíclicos y repetidos entre las superficies en interacción, lo cual origina la formación y propagación de grietas internas y superficiales, lo que conduce finalmente a su destrucción [53-57]. Ejemplo, excesiva carga entre rodamientos.                                  |  |
| <b>Erosión</b>    | La pérdida de material en las superficies se presenta debido a su exposición al flujo de líquidos con partículas sólidas que fluyen a altas velocidades y que colisionan de manera repetida contra las superficies [58-61]. Ejemplo: erosión en un anillo de pistón.                                              |  |
| <b>Corrosión</b>  | La corrosión se presenta debido a reacciones químicas o electroquímicas de óxido-reducción, entre un material metálico y los fluidos de trabajo con los que se pone en contacto, por ejemplo, soluciones electrolíticas, de gases o líquidos. Las cargas mecánicas también pueden favorecer la corrosión [62-65]. |  |

## 2.4 Lubricación

### 2.4.1 Concepto

La lubricación es necesaria entre dos sólidos que se deslizan y consiste en la introducción de un sólido o líquido en la interfase de las superficies con el fin de reducir la fricción, el desgaste o disipar calor [66]. “El proceso de lubricación puede tomar diferentes formas, dependiendo de la configuración de las superficies en contacto, la rugosidad y la textura de las superficies en deslizamiento, la carga de contacto, la presión y temperatura, la velocidad de rodamiento o deslizamiento, condiciones ambientales, las propiedades físicas y químicas del lubricante, la composición del material y las propiedades de la capa superficial” [67]. Se puede decir que un lubricante es una sustancia capaz de alterar la naturaleza de la interacción superficial entre dos sólidos en contacto.

La lubricación en la actualidad se reconoce como uno de los aspectos claves de la tribología [68]. En la práctica, se puede realizar la lubricación mediante la aplicación de sustancias entre los pares de deslizamiento que pueden ser fluidos, tales como el agua o aceites minerales; o lubricantes sólidos tales como grafito o disulfuro de molibdeno [69]. No obstante, la lubricación líquida posee una serie de ventajas en comparación con lubricación sólida, tales como la resistencia a largo plazo, una disminución del ruido mecánico, la promoción de la conductancia térmica y una importante disminución en la fricción en el régimen elasto-hidrodinámico (Curva Stribeck) [70].

### 2.4.2 Regímenes de lubricación: Curva Stribeck.

Richard Stribeck (1861-1950), de origen alemán, ingeniero mecánico y profesor de la Universidad Técnica de Darmstadt, realizó experimentos para medir el coeficiente de fricción (CoF) entre pares mecánicos (rodamientos) en función de la velocidad de desplazamiento ( $v$ ), la carga aplicada ( $F_N$ ) y la viscosidad del lubricante ( $\eta$ ) [71]. Estas mediciones se plasmaron en un gráfico llamado Curva de Stribeck que se representa en la figura 2.3 y que es utilizado intensivamente para caracterizar el comportamiento del fenómeno de lubricación en sistemas tribológicos dado que muestra las variaciones del coeficiente de fricción en función de condiciones de operación tales como fuerza normal, velocidad de desplazamiento (lineal o angular), naturaleza del lubricante, etc. [72].

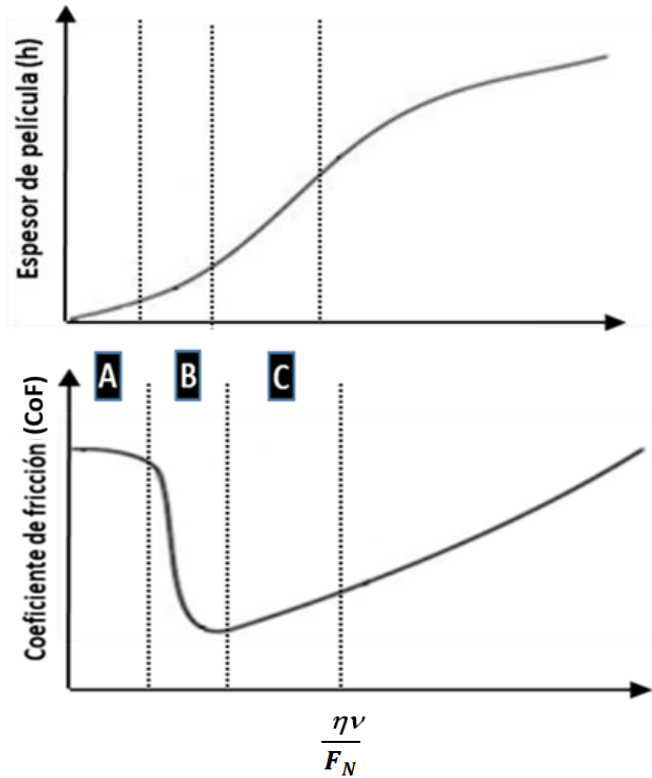


Figura 2.3. Curva Stribeck: Comportamiento de lubricación en sistemas tribológicos: A) Lubricación límite, B) Lubricación mixta/elasto-hidrodinámica, C) Lubricación hidrodinámica. [67]

La curva de Stribeck proporciona una visión completa de la variación del coeficiente de fricción en todas las etapas de lubricación y la transición entre ellas: a) lubricación límite; b) lubricación mixta/elasto-hidrodinámica, c) lubricación hidrodinámica [73]. A partir de aquí, es posible determinar las condiciones de operación más adecuadas. En la Fig. 2.3, la carga  $F_N$  permanece constante y se varía la velocidad de desplazamiento para conocer su influencia en la viscosidad del fluido,  $\eta$ , y el coeficiente de fricción, **CoF**. La descripción de las tres zonas de la curva de Stribeck se presenta a continuación [74]:

a) Zona A (lubricación límite): el sistema se mueve a baja velocidad o la velocidad es casi cero. Es un régimen de alta fricción y desgaste porque existe un contacto directo sólido-sólido entre asperezas de las superficies, de modo que la carga es ejercida en los puntos de contacto entre ambas superficies como se muestra en la figura 2.4. En este caso, las propiedades de flujo del lubricante juegan un papel pequeño o nulo en el desgaste [75,76].

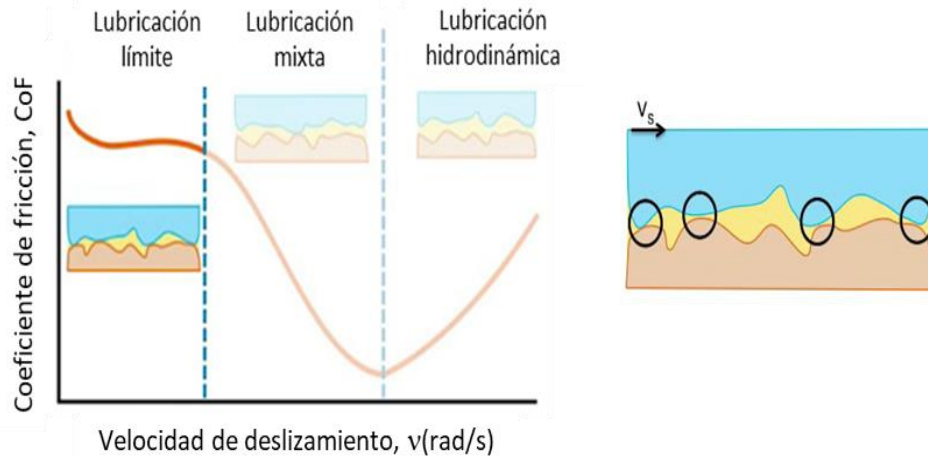


Figura 2.4. Régimen de lubricación límite. El inserto en la figura muestra el área de contacto entre ambas superficies [73].

b) Zona B (lubricación mixta o elastohidrodinámica): Es una transición entre la lubricación hidrodinámica y límite, generalmente observada al inicio/paro de la maquinaria. Los sistemas se mueven de velocidades bajas a medias (figura 2.5). Hay un ligero contacto entre algunas asperezas, por lo que es un régimen de desgaste moderado donde una película delgada del lubricante soporta la mayor parte de la carga entre las superficies, y en consecuencia el coeficiente de fricción disminuye [77,78]. A medida que disminuye la viscosidad, el espesor de la película que separa las zonas mixtas e hidrodinámicas, se reduce a un valor límite en el punto de inflexión.

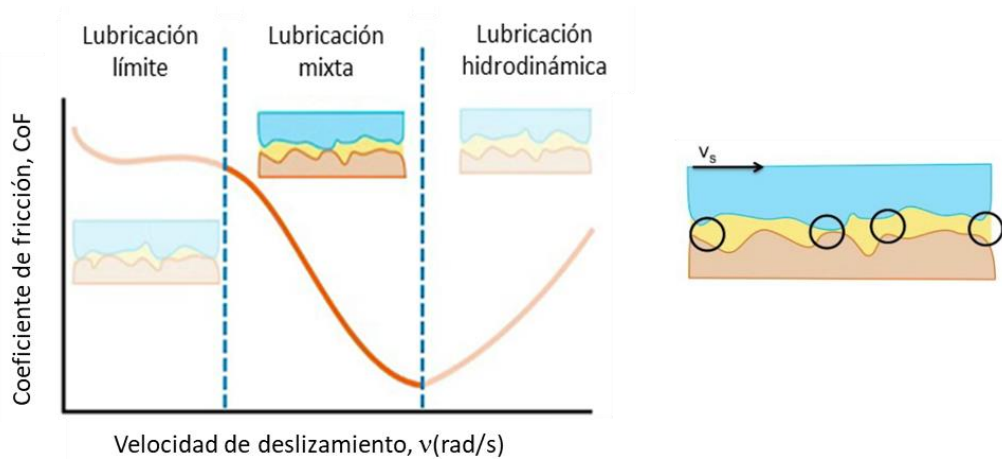


Figura 2.5. Régimen de lubricación mixta. El inserto en la figura muestra el área de contacto entre ambas superficies [73].

En condiciones de carga severa se produce una deformación elástica de la superficie, esta deformación produce un aumento en el área de carga con la consiguiente reducción de la presión entre ambas superficies. Además de este efecto, el aceite que separa ambas superficies sufre un aumento en su viscosidad debido a la presión y se incrementa la resistencia al desplazamiento del lubricante dado que se reduce la distancia entre las moléculas de este. La combinación de ambos efectos da lugar a la formación de una película de lubricante con un espesor suficiente para separar por completo a las superficies. Este tipo de película lubricante conocida como elasto-hidrodinámica tiene espesores que oscilan entre 0.25 y 1.5 micrómetros [79,80].

c) Zona C (lubricación hidrodinámica): En este régimen, el sistema se mueve a altas velocidades y las superficies están completamente separadas por una película gruesa de lubricante (figura 2.6). Al no existir contacto directo entre las superficies que están interactuando no se presenta un desgaste importante. Sin embargo, el coeficiente de fricción aumenta debido a las fuerzas de arrastre/hidrodinámicas en el lubricante [81,82].

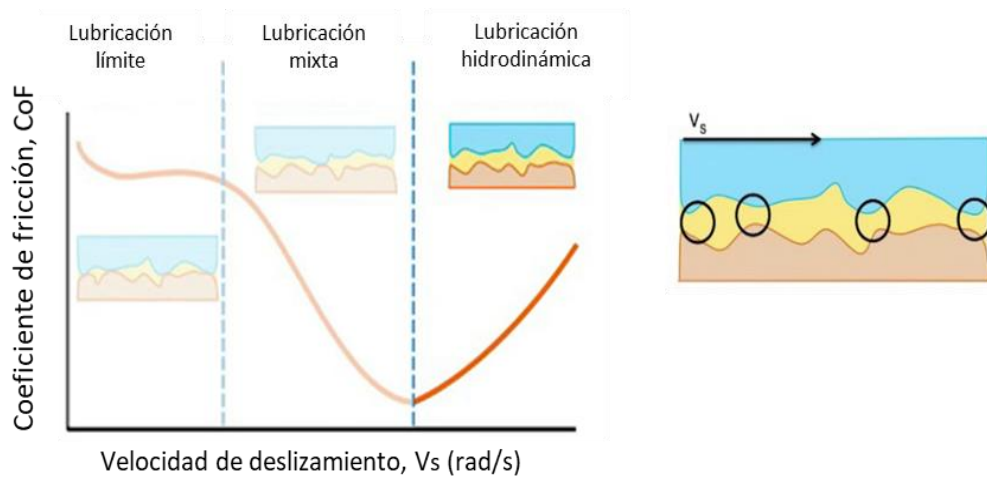


Figura 2.6. Régimen de lubricación hidrodinámica. El inserto en la figura muestra el área de contacto entre ambas superficies [73].

### 2.4.3 Factores que influyen en la lubricación

Hay una serie de variables operativas que modifican el espesor de la película lubricante. Si no se controlan adecuadamente, se reduce el espesor de la película lubricante que separa las superficies y ocurre el contacto metal-metal, lo que conlleva al desgaste prematuro del equipo. Estas variables son:

#### a) Carga

Un aumento en la carga fuerza al lubricante a salir entre las dos superficies lo que ocasiona que se acerquen. Este efecto se puede evitar incorporando un fluido con mayor resistencia al flujo entre las dos superficies. En estos casos, el uso de un lubricante de mayor viscosidad se puede usar para aumentar el espesor de la película y reducir el desgaste, si las medidas correctivas mecánicas no se pueden implementar de inmediato. Por otro lado, si se reduce la carga en un dispositivo, la viscosidad del aceite se puede reducir y la separación entre las dos superficies aún se puede mantener [83,84]. Este comportamiento se observa en elementos de la máquina que están sujetos a vibración o que tienen una reducción en el área de carga debido a una desalineación o desgaste excesivo [85].

#### b) Velocidad

Los sistemas lubricados que operan a altas velocidades no permiten que el lubricante se escape entre las dos superficies, por lo que sería suficiente con un lubricante de baja viscosidad (baja resistencia al flujo) para mantener las superficies separadas. El caso opuesto ocurre con los elementos que operan a bajas velocidades, donde el lubricante puede escapar fácilmente, por lo que se requiere un aceite con una alta resistencia al flujo (alta viscosidad). De esta manera, se requieren lubricantes de baja viscosidad para lubricar elementos que operan a altas velocidades y viceversa [86].

#### c) Temperatura

La viscosidad de cualquier lubricante se reduce cuando se calienta. Esto debe ser considerado para equipos que operan en un rango de temperatura variable, donde se debe seleccionar un lubricante de mayor o menor viscosidad, según sea el caso. Para temperaturas de operación altas, se requieren lubricantes de mayor viscosidad [87]. En la Tabla 2.2 se mencionan algunos estudios donde se pone en evidencia la influencia de estos factores en la lubricación en el comportamiento tribológico del sistema.

Tabla 2.2. Factores que influyen en la lubricación

| Factores               | Sistema de estudio                                                                     | Lubricante                                                                                  | Condiciones                           | Hallazgos                                                                                                                                                                  |
|------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Carga<br>[88-90]       | Aleación LM 13 / hierro fundido gris (Pin on Disc)                                     | Aceite mineral – Aceite de Neem como aditivo al 5, 10, 15 % vol.                            | 30, 60, 90 N                          | Cuando la carga aumenta, la fricción aumenta y se alcanza una mayor fricción con una carga de 90N                                                                          |
|                        | Aleación de aluminio y silicio/ Acero EN31 (Pin on Disc)                               | Aceite mineral, SAE 20W-40/ Aceite de Polanga como aditivo al 15, 30, 50 % vol.             | 50, 100, 150 N                        | El coeficiente de fricción aumenta con el aumento de la carga. Con diferentes cargas aplicadas, la mezcla de 15 % vol. muestra mejores resultados entre todas las mezclas. |
|                        | Aleación de aluminio y silicio/ Acero EN31 (Pin on Disc)                               | Aceite mineral SAE 20W-40/ Biodiesel de aceite de Pongamia como aditivo al 5, 10, 20 % vol. | 50, 100, 150 N                        | El coeficiente de fricción aumenta con el incremento de la carga. Las mezclas con 5 y 10 %vol. mostraron los coeficientes de fricción más bajos y menor desgaste.          |
| Velocidad<br>[91-93]   | PEEK compósito/Acero Inoxidable (Ball on Plate)                                        | Aceite ISO46                                                                                | 5, 10, 15 N<br>3, 4, 5 cm/s           | A carga constante, los valores de COF aumentan más del 50% con el aumento en la velocidad de deslizamiento.                                                                |
|                        | Acero inoxidable SS304 ambas superficies (Pin on disc)                                 | Lubricación seca                                                                            | 1, 2, 3 m/s<br>1 kg                   | El coeficiente de fricción disminuyó con el aumento de la velocidad de deslizamiento (rango de 0.15-0.28)                                                                  |
|                        | Acero AISI D2 con película de carbón tipo diamante DLC. (Block on Ring)                | Aceite mineral SAE 10W-40                                                                   | 17.2 N<br>3, 5, 7, 8, 12, 17, 165 rpm | El coeficiente de fricción disminuyó con el aumento de la velocidad angular.                                                                                               |
| Temperatura<br>[94-96] | Acero inoxidable /Carbón tipo diamante hidrogenado amorfo (a-C:H) DLC. (Ball on Plate) | Aceite mineral SAE 40                                                                       | 50, 100, 150°C<br>392 N<br>0.64 m/s   | El aumento de temperatura disminuye el coeficiente de fricción y aumenta la tasa de desgaste.                                                                              |
|                        | Acero inoxidable /Carbón tipo diamante hidrogenado amorfo (a-C:H) DLC. (Ball on Plate) | Aceite de Jatropha curcas L.                                                                | 50, 100, 150°C<br>392 N<br>0.64 m/s   | El aceite de Jatropha posee mejor lubricidad y el CoF disminuye con el incremento de temperatura.                                                                          |
|                        | Compósitos de poliuretano-poliétileno (PU-PEW)/ Bronce (Ring on Plate)                 | Agua                                                                                        | 0.5 MPa<br>60, 70, 80°C<br>250 rpm    | Las altas temperaturas tienen un impacto negativo en el coeficiente de fricción de todos los materiales compósitos.                                                        |

## 2.4.4 Tipos de lubricación

### a) Lubricación sólida

Los lubricantes sólidos son sustancias que poseen una baja resistencia al corte. Estos son utilizados donde no es posible mantener una película hidrodinámica de lubricante líquido. Para seleccionar este modo de lubricación debe tomarse en cuenta las propiedades del lubricante, las características de las superficies, la composición del lubricante sólido, la configuración del sistema, las condiciones de operación, y los procesos que ocurren en las superficies de soporte [97]. Los lubricantes sólidos más comunes son el grafito, el disulfuro de molibdeno ( $\text{MoS}_2$ ), y el politetrafluoroetileno (PTFE) [98-100]. Estos lubricantes pueden utilizarse en forma de polvos, o integrarse con fluidos tales como aceites y agua. El grafito que es una forma cristalina del carbono, posee una distancia entre átomos dentro de la red hexagonal de  $1.42 \text{ \AA}$ , pero entre las laminillas la separación es de  $3.35 \text{ \AA}$ . Las fuerzas entre las laminillas son muy pequeñas, lo cual les permite deslizarse fácilmente entre sí, bajo la acción de un esfuerzo cortante [101].

Ningún polímero tiene una estructura molecular de naturaleza laminar, no obstante, el PTFE tiene el coeficiente de fricción más bajo de todos los lubricantes sólidos. El PTFE se comporta bien trabajando a vacío y hasta temperaturas de  $315 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $600 \text{ }^\circ\text{F}$ ) a la cual comienza a descomponerse [102].

### b) Lubricación líquida

Los aceites minerales se utilizaron con éxito en el siglo XVIII como lubricantes en las máquinas que se desarrollaron después de la Revolución Industrial. Una de las principales desventajas de estos lubricantes era su alta capacidad oxidativa a temperaturas mayores a los  $100^\circ\text{C}$ , así como su alta viscosidad a temperaturas por debajo de los  $20^\circ\text{C}$  [103]. No obstante, estos inconvenientes no fueron importantes hasta la mitad del siglo XX, cuando se registraron ciertos avances en la aviación durante la Segunda Guerra Mundial, tales como el descubrimiento de la turbina de gas, el desarrollo de motores para cohetes y vehículos espaciales, donde los movimientos entre los componentes de estos dispositivos fueron expuestos a temperaturas más extremas, y pusieron en evidencia la nula funcionalidad de estos lubricantes [104]. De aquí surgió la necesidad de desarrollar nuevos lubricantes, en especial de tipo sintético y aditivos que presentaran una mayor eficacia de lubricación, así como una reducción ante el desgaste, que pudieran ser utilizados con cargas altas a temperaturas variables. Los aceites de



silicona fueron utilizados con éxito en la industria aeroespacial, debido a su excelente fluidez en una amplia gama de temperaturas y por su alto índice de viscosidad, no obstante, su capacidad limitada para tolerar altas presiones [105].

Los lubricantes PerFluoroPoliEter (PFPE) fueron descubiertos en la década de los 60's, originalmente para la aplicación de fluidos hidráulicos resistentes al fuego en la Fuerza Aérea de los Estados Unidos. Los PFPE son considerados generalmente no tóxicos bajo condiciones normales de operación, no son inflamables, tienen baja presión de vapor, estabilidad a la oxidación y una gran capacidad para soportar cargas altas [106]. El desempeño de los aceites y grasas de PFPE puede mejorarse con aditivos de extrema presión (EP) que actúan para operar en aplicaciones que requieren cargas más elevadas; estos aditivos inhibidores de oxidación protegen también contra la corrosión [107]. El uso de las grasas y aceites de PFPE deben de considerarse en cualquier aplicación donde exista un ambiente químico hostil, probabilidad de incendio, alto vacío y elevada temperatura por periodos prolongados, siendo muy riesgoso el uso de lubricantes ordinarios [108,109].

Otros lubricantes que se utilizan también en aviación son los poliésteres y las polialfaoleofinas (PAO) que se elaboran a partir de la polimerización de una molécula de alfa-olefina, como el etileno. El uso de estos lubricantes sintéticos se ha extendido gracias a su amplia gama de lubricación como fluido de película en un rango de temperaturas de 70-300 °C, aproximadamente [110].

## **2.5 Lubricantes innovadores**

### **2.5.1 Líquidos iónicos**

Los líquidos iónicos (LI's) son un grupo de sales orgánicas con un intervalo de punto de fusión por debajo del punto de ebullición del agua, y cercano a la temperatura ambiente. Con respecto a las sales fundidas, los líquidos iónicos se encuentran en estado líquido a menores temperaturas que las primeras [111]. Los LI's poseen una combinación de características únicas, incluyendo una volatilidad despreciable, no son inflamables, alta estabilidad térmica, bajo punto de fusión, y alta conductividad. Estas características han motivado su investigación y conducido al desarrollo de diversas aplicaciones en muchos campos; por ejemplo, como disolventes, electrolitos, en síntesis orgánicas, catálisis, fotoquímica, entre otros [112,113]. En general, los LI's están constituidos por cationes orgánicos que se encuentran unidos con un anión orgánico o inorgánico. Los cationes

más comunes son compuestos que contienen nitrógenos (imidazolio, piridinio, amonio cuaternario, y el grupo cuaternario fosfonio); tanto los aniones inorgánicos (p. ej.,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Br}^-$ ,  $\text{BF}_4^-$ ,  $\text{PF}_6^-$ ) como los orgánicos (p. ej. trifluorometilsulfonato [ $\text{CF}_3\text{SO}_3^-$ ], bis[(trifluorometil) sulfonil]amida [ $(\text{CF}_3\text{SO}_2)_2\text{N}^-$ ], tri-fluoroetanoato [ $\text{CF}_3\text{CO}_2^-$ ],) pueden ser usados como la contraparte aniónica (figura 2.7); usualmente estos cuentan con una carga negativa difusa o protegida [114-117].

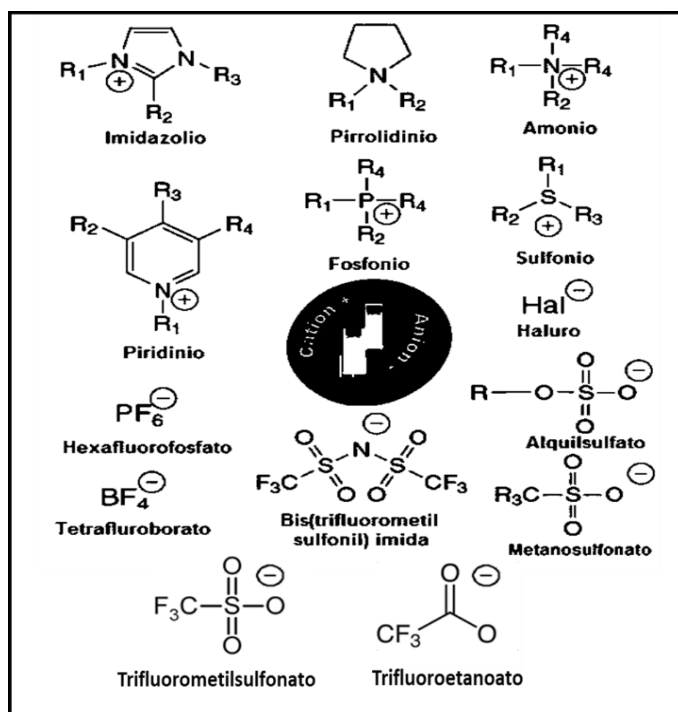


Figura 2.7 Aniones y cationes comunes en líquidos iónicos. [118]

Se trata de sustancias muy versátiles ya que al realizar combinaciones donde se modifica el anión y/o el catión, hay un cambio significativo en sus propiedades químicas tales como polaridad, hidrofobicidad, viscosidad, entre otras. Por ello se conocen como solventes de diseño [119].

Aunque el primer LI fue sintetizado desde el siglo XIX, los científicos pusieron atención especial en ellos 100 años después, generándose hasta la fecha más de 10 combinaciones posibles de aniones con cationes. Los LI's algunas veces son clasificados en cinco grupos, basándose en la estructura de su catión: (a) cationes heterocíclicos de cinco miembros, (b) cationes heterocíclicos de seis miembros y benzocondensados, (c) cationes a base de amonio, fosfonio y sulfonio, (d) cationes funcionalizados de imidazolio y (e) cationes quirales [120].

De esta manera, el número de líquidos iónicos sintetizados va en aumento y su clasificación aún no está concluida debido a la gran facilidad con la que se pueden generar [121-123].

Las aplicaciones de los líquidos iónicos son varias debido a sus propiedades distintivas: electrolitos en la industria electroquímica, catalizadores en síntesis orgánicas e inorgánicas, disolventes en procesos de extracción líquida, líquidos selectivos en la absorción de gases, materiales de fase estacionaria en cromatografía de gases, separación de mezclas azeotrópicas [124].

Recientemente se han popularizado también como fluidos de intercambio de calor gracias a su gran capacidad calorífica, así como su utilidad como soportes para membranas líquidas; agentes dispersantes, tensoactivos, plastificantes y como lubricantes en sistemas triboreológicos [125-128] que es la aplicación que se plantea en este trabajo de investigación.

En cuanto a su potencial de lubricación los LI's cumplen con las especificaciones de un lubricante de alto rendimiento en condiciones de fricción extremas debido a su alta estabilidad térmica y química. Las temperaturas de descomposición de los líquidos iónicos de imidazolio tienen valores arriba de 350 °C, algunos incluso mayores a 480 °C, y una fluidez considerable a bajas temperaturas (su temperatura de transición vítrea está por debajo de los 50 °C), lo cual significa que los LI's pueden trabajar en un amplio rango de temperaturas en estado líquido [129].

La característica más notable que distingue a los LI's de otros aceites lubricantes sintéticos es su alta polaridad. Esta característica hace que sean capaces de formar películas con una fuerte adsorción efectiva, lo cual contribuye a su destacada capacidad anti-desgaste [130]. Por otro lado, los LI's pueden ser útiles como aditivos para mejorar aún más las propiedades anti-desgaste de los lubricantes [131]. Los LI pueden tener mejores características lubricantes que los convencionales, para condiciones de trabajo que implican temperaturas y presiones extremadamente bajas o altas, y que ningún otro lubricante podría resistir. Los estudios para la obtención de nuevos lubricantes tienen como objetivo mejorar la eficiencia de las máquinas ante el desgaste, y las pérdidas de energía por fricción [132-135].

Sin duda, los líquidos iónicos constituyen un tema que requiere más esfuerzos de investigación científica para estandarizar sus aplicaciones y poder conducir a resultados exitosos en el campo industrial, por lo que es necesario tener un lubricante especializado para cada aplicación y así generar planes de negocio para comercializar su uso de manera exitosa.

### **2.5.2 Biolubricantes (origen vegetal)**

La industria de los lubricantes no solo está interesada en el desarrollo de nuevos productos para mejorar el rendimiento mecánico, sino también en mejorar los procesos desde un punto de vista ambiental. Los aceites de base mineral pueden contaminar el agua subterránea hasta por 100 años, lo que puede inhibir el crecimiento de los árboles y ser tóxico para la vida acuática [136]. Sin embargo, es bien sabido que el uso de recursos renovables para diferentes aplicaciones industriales tiene una importancia notable en nuestra sociedad debido a que no tienen un impacto negativo en el medio ambiente. Hoy en día, existe una notable tendencia a aumentar el uso de productos de consumo ecológicos, ya sea como resultado de las regulaciones gubernamentales, o simplemente debido a la creciente preocupación pública por un entorno libre de contaminación. En este contexto, los aceites vegetales y grasas siendo recursos renovables, se tienen cada vez más en cuenta como materias primas biodegradables, especialmente para aplicaciones de biodiesel y biolubricante [137,138].

En general, los aceites vegetales tienen algunas propiedades excelentes para su uso potencial como lubricantes, por ejemplo, un índice alto de viscosidad, baja volatilidad, baja toxicidad, además de una alta biodegradabilidad [139] lo que se traduce en una reducción de la contaminación al degradarse naturalmente, además de que tienen la peculiaridad de ser eficaces bajo lubricación límite e hidrodinámica [140]. Las grasas lubricantes constituyen un grupo de lubricantes con propiedades particulares relacionadas principalmente con sus características de gel, que se atribuyen principalmente al agente espesante [141]. Son suspensiones altamente estructuradas que consisten generalmente en un jabón espesante, dispersado en un líquido lubricante, aceite mineral o sintético [142]. Algunos ejemplos de biolubricantes vegetales son los aceites de ricino, girasol, coco, jatropha y palma que han mostrado propiedades lubricantes destacadas.

Los aceites minerales tienen buena capacidad de lubricación y alta estabilidad, asegurando una vida útil prolongada. Sin embargo, su toxicidad inherente y su naturaleza no bioestable hacen que los aceites a base de minerales sean una amenaza ecológica constante para el suelo y las reservas de agua [143].

Los aceites de base sintética pueden tener baja lubricidad y mayor capacidad de enfriamiento que otras bases [144]. Como no son biodegradables, su uso representa un alto riesgo ambiental, ya que la mayoría de las empresas no tienen sistemas de gestión eficaces que proporcionen la eliminación correcta de estos componentes [145]. Los aceites vegetales tienen el potencial de reemplazar a los minerales dado que algunos de ellos son capaces de asegurar una buena lubricación [146]. Las moléculas de los aceites vegetales son de naturaleza alargada, pesada y dipolar, con cargas eléctricas opuestas que se adhieren a las interfaces de contacto [147,148].

Los aceites vegetales se componen de mezclas de ácidos grasos en diferentes proporciones [149] que ayudan al lubricante a adherirse en las superficies y a evitar el roce contra el metal mientras mantienen una película lubricante entre las dos superficies. Sharma et. al [150] mostraron que las cadenas de ácidos grasos en el aceite vegetal permitían la formación de una película con una superficie resbaladiza que impedía el contacto directo entre ambas superficies. Chanes de Souza, et. al. [151] utilizaron jatropha y moringa como bases para lubricantes vegetales los cuales tienen un alto porcentaje de ácidos grasos insaturados en su composición, lo que resultó ser un indicador del potencial de formación de una película lubricante más densa que minimiza el contacto entre las superficies.

Otros estudios [152] han encontrado que las largas cadenas de carbono de los aceites vegetales y los ácidos grasos insaturados indican una formación de biopelículas más estable y con menor resistencia al movimiento entre pares tribológicos, lo que favorece un bajo CoF [153] en comparación con un aceite mineral. Por lo tanto, el alto porcentaje de ácidos grasos insaturados en la composición de aceites de girasol es un buen indicador de un alto potencial de lubricación. De acuerdo con Reeves et al. [154], el alto porcentaje de ácidos grasos insaturados, principalmente de ácido oleico (C18:1), se refleja en valores más bajos de CoF y tasas menores de desgaste. Sin embargo, los ácidos grasos insaturados al tener uno o más dobles enlaces en sus cadenas de carbonos son más reactivos y susceptibles a la termo-oxidación [155]. Esta autooxidación puede afectar algunas propiedades físicas de los aceites vegetales.

## 2.6 Superficies tribológicas poliméricas

### 2.6.1 Polímeros

Los polímeros son compuestos de elevado peso molecular que están constituidos por una gran cantidad de eslabones llamados monómeros. Dichos materiales se pueden clasificar de acuerdo con sus diferentes características [156] y principalmente con base en su respuesta física frente al calentamiento [157], es decir, si son termoplásticos, termoestables o elastómeros [158], los cuales se describen a continuación:

#### a) Termoestables

Estos polímeros son materiales insolubles y que no se funden fácilmente debido a su estructura reticulada. Son sintetizados a partir de sustancias de bajo peso molecular que generan en una primera etapa un producto intermedio poco reticulado que aún puede fundirse y puede fluir para rellenar un molde. La reticulación espacial que genera la formación macromoléculas termoestables tiene lugar por reacción química durante el moldeo de la pieza [156]. Son materiales que presentan propiedades sobresalientes a temperaturas elevadas dado que no se funden ni reblandecen, además de poseer alta resistencia térmica y química, rigidez, dureza superficial, buena estabilidad dimensional, entre otras [159,160].

No obstante, el uso de estos materiales ha ido disminuyendo en los últimos años debido a que su método de obtención es lento al llevarse a cabo la reacción de polimerización dentro del molde. Los acabados no son tan detallados en comparación con los de los termoplásticos y generalmente, las resinas termoestables son bastantes opacas y en muchos casos presentan una coloración amarillenta [156]. Ejemplos de estos materiales son los poliuretanos reticulados (PUR), las resinas de fenol-formaldehído (fenoplastos) junto con las resinas de amina-formaldehído (aminoplastos) [161,162].

#### b) Elastómeros

“Los elastómeros son generalmente compuestos que contienen dobles enlaces en la cadena principal, de modo que las cadenas de polímero se encuentran enrolladas sobre sí mismas, lo que les confiere gran flexibilidad. Estos materiales son capaces de soportar deformaciones muy grandes recuperando su forma inicial una vez que se elimina el esfuerzo. En los elastómeros suele producirse un entrecruzamiento parcial de las cadenas para evitar que cada vez que estos materiales se ven sometidos a un esfuerzo las

moléculas se deslicen unas sobre otras, lo que provocaría deformaciones irreversibles. El entrecruzamiento o curado a que se somete a estos materiales es similar al de los termoestables, pero en este caso el grado de entrecruzamiento es mucho más bajo, puesto que debe ser suficientemente espaciado, de modo que no impida el desenrollamiento de las cadenas, que es en definitiva lo que confiere al material la capacidad de recuperar su forma inicial cuando cesa el esfuerzo al que es sometido." [156,163-165].

Los elastómeros son materiales flexibles incluso a temperaturas bajas, son resistentes a los aceites, grasas, etc. y sus temperaturas de transición vítrea son menores a la del ambiente. En contraparte, su proceso de fabricación es lento y requiere de grandes recursos, además de que no son reciclables [156, 166-168].

### c) Termoplásticos

"Los termoplásticos son polímeros lineales, que pueden estar ramificados o no. Puesto que no se encuentran entrecruzados son solubles en algunos disolventes orgánicos, pueden fundirse y, por lo tanto, se consideran reciclables. Los termoplásticos se fabrican y emplean en cantidades muy grandes, los más comunes son: polietileno (PE), polipropileno (PP), poliestireno (PS) y policloruro de vinilo (PVC). De hecho, más de la mitad de los plásticos que se procesan corresponde a estos cuatro plásticos." [156,169-170]

"Para que un polímero tenga aplicación como termoplástico debe tener temperatura de transición vítrea  $T_g$  (si se trata de un material amorfo), o temperatura de fusión  $T_m$  (si se trata de un material cristalino), ambas superiores a la temperatura ambiente. Por lo general, los materiales termoplásticos presentan un buen conjunto de propiedades mecánicas, son fáciles de procesar y bastante económicos. La principal desventaja deriva del hecho de que son materiales que funden, de modo que no tienen aplicaciones a temperaturas extremas puesto que por encima de la  $T_g$  comienzan a reblandecer, con la consiguiente pérdida de propiedades mecánicas." [156,171-173]

"Estos materiales se obtienen por polimerización de monómeros que incorporan anillos de benceno en la cadena del polímero. Estos anillos aromáticos proporcionan rigidez a la cadena y confieren temperaturas de fusión muy elevadas, de modo que el plástico podrá exponerse a temperaturas superiores a los 200 °C (y en ocasiones superiores a los 300 °C) durante periodos prolongados manteniendo sus propiedades mecánicas. Algunos ejemplos de estos materiales son los plásticos de la familia de las poliimidas (PI),

poliariletercetonas (PAEK), poliésteres aromáticos (APE), polisulfonas (PSU), entre otros. Por lo general estos materiales resultan más caros y difíciles de procesar que los demás termoplásticos.” [156,177]

“Las propiedades mecánicas de estos materiales, los han colocado en el rubro de plásticos con alto desempeño, ya que, en algunas aplicaciones son capaces de reemplazar a metales tales como el aluminio, acero inoxidable, etc. No obstante, las propiedades de los plásticos, a diferencia de las de los metales, se ven muy afectadas por la temperatura de trabajo dado su típico comportamiento viscoelástico, por lo que sus propiedades mecánicas son fuertemente dependientes del tiempo de aplicación del esfuerzo. En este sentido todos los plásticos de alto desempeño están en desventaja comparados con los metales. Sin embargo, presentan algunas ventajas sobre éstos, como su baja densidad, resistencia a líquidos corrosivos que afectan a los metales, facilidad de procesamiento y pueden utilizarse para producir piezas con diseños más complejos que los metales.” [156,174-176]

#### d) Compósitos

“Los compósitos, son materiales estructurales con propiedades mecánicas sobresalientes; elevada dureza y resistencia a la tracción. Los componentes de los materiales compuestos son la fase de matriz y la fase de refuerzo que no son solubles entre sí. La matriz está incrustada en la fase de refuerzo. La matriz se trata generalmente de un polímero termoplástico y el material de la fase de refuerzo se presenta en forma de partículas, fibras o escamas, por lo general fibra de vidrio o de carbón, lo que le confiere una buena resistencia a la tracción. Los refuerzos mejoran las propiedades mecánicas de la matriz polimérica, y algunas de las ventajas de estos materiales compuestos con respecto a los materiales convencionales son un peso ligero, rigidez, resistencia a la fatiga más alta que la del metal, elevada resistencia a la corrosión, menores costos generales del sistema y una conductividad eléctrica más baja. Las piezas que se fabrican con compuestos de matriz termoplástica se pueden unir mediante calentamiento.” [156, 178-181]



### 2.6.2 Aplicaciones poliméricas en tribología.

En los últimos años, los polímeros termoplásticos y sus materiales compuestos se han utilizado como materiales de reemplazo de partes metálicas [182] y partes humanas [183] debido a su buen comportamiento mecánico y tribológico. En la industria en general (automotriz, metalúrgica, aeronáutica, aeroespacial, etc.), estos materiales se utilizan en engranajes, anillos de sellado, casquillos, cojinetes y válvulas [184,185]. En el área biomédica, los polímeros están presentes en injertos para columna vertebral, artroscopia, reconstrucción articular, trauma, procedimientos dentales y cráneo-maxilofaciales [186-191].

El poliéterétercetona (PEEK), es el polímero de mayor rendimiento en aplicaciones ingenieriles, ya que posee alta resistencia a sustancias químicas (excepto halógenos y algunos ácidos fuertes) [192], con excelente resistencia mecánica y estabilidad dimensional [193]. El PEEK tiene la capacidad de mantener la rigidez a altas temperaturas y es adecuado para uso continuo hasta una temperatura límite de 220°C [194]. Actualmente, el PEEK es utilizado ampliamente como material deslizante contra metales en sistemas de fricción dinámica, debido a su peso ligero, bajo costo y principalmente a su buen rendimiento tribológico [195]. La cadena de polímero blando puede formar una película de transferencia en la contrasuperficie metálica, derivando en un menor coeficiente de fricción y baja tasa de desgaste en comparación con otros materiales [196].

Hay dos formas de conseguir una mayor disminución en la fricción y desgaste del PEEK: a) incorporando refuerzos en la matriz de polímero para aumentar su resistencia al desgaste, así como lubricantes sólidos, dando lugar a compuestos PEEK con lubricación interna [197-200] o; b) introduciendo lubricantes líquidos entre pares de fricción para lubricación externa [201,202]. Aunque el PEEK puro posee propiedades antifricción sobresalientes, rara vez es utilizado en esta presentación y es preferible utilizarse en su variedad compósito que cuenta con propiedades tribológicas mejoradas, útiles en una gran variedad de aplicaciones [203].

### *a) Estudios tribológicos de PEEK con lubricación interna*

Respecto a la lubricación interna, se emplean sólidos como lubricantes y fibras como refuerzos para obtener materiales compuestos PEEK con mejor lubricidad y mayor vida útil en aplicaciones tribológicas con alta exigencia en varios campos de la ingeniería [204]. La adición de lubricantes sólidos reduce significativamente el coeficiente de fricción; mientras que la adición de fibra, [205] (fibra de vidrio y fibras de carbono) mejora considerablemente las propiedades de resistencia que son superiores a las de los metales, cerámicos o PEEK puro. De esta manera, la combinación de fibras y lubricantes ha dado lugar a los materiales compuestos de PEEK que constituyen una nueva clase de tribo-materiales, dotados de mayor versatilidad para una amplia gama de aplicaciones [206].

Durante la interacción entre superficies, los lubricantes sólidos facilitan la formación de la película de transferencia, la cual disminuye la fricción y el desgaste [207]. En la mayoría de los sistemas prácticos, el contacto durante el deslizamiento se produce entre un metal y un polímero [208]. La formación de esta película implica la transferencia de material del polímero a la superficie del metal debido a la adhesión entre los dos materiales durante el deslizamiento [209]. Esta es una disposición usual debido a las buenas características de transferencia de calor del material metálico. Dicha película de transferencia protege al polímero de la contraparte que posee generalmente mayor dureza y puede actuar como lubricante siendo la responsable de la transición de un comportamiento de desgaste creciente hacia el estado estable [210].

Hoy en día, la adición de rellenos, es decir, diferentes tipos de lubricantes sólidos y refuerzos a la matriz PEEK es una forma común de mejorar o modificar sus propiedades, reducir la fricción, obtener una fricción estable y disminuir la tasa de desgaste [211]. En aplicaciones relacionadas con el espacio, donde no es factible utilizar un lubricante líquido, y las temperaturas son extremas ( $-196-300$  °C), se han evaluado componentes metálicos con recubrimientos poliméricos de PEEK observándose un rendimiento tribológico sobresaliente con un bajo coeficiente de fricción y un desgaste inexistente [212]. El politetrafluoroetileno (PTFE), el grafito (C) y el disulfuro de molibdeno ( $\text{MoS}_2$ ), a menudo se utilizan como lubricantes internos en los materiales compuestos de PEEK [213] para aplicaciones industriales [214]. Otros lubricantes menos comunes son el nitruro de boro (BN), el ácido bórico ( $\text{H}_3\text{BO}_3$ ), el titanato de potasio ( $\text{K}_2\text{TiO}_3$ ), que en algunos casos pueden superar al grafito y al  $\text{MoS}_2$  [215].

i) Grafito (C)

Las propiedades lubricantes del grafito [216] se deben a la estructura laminar de los cristales de grafito, que se compone de planos de átomos de carbono policíclicos en orientación hexagonal, lo que permite su fácil deslaminación en la dirección perpendicular a los planos, donde la fuerza de unión es baja, creando una película delgada de lubricante natural de modo que las fuerzas opuestas sean casi nulas [217]. El grafito es más efectivo para aplicaciones que involucran alta temperatura y carga [218]. El grafito se agrega comúnmente junto con las fibras de carbono a la matriz PEEK, formando un compuesto considerado como un tribomaterial exitoso para muchas aplicaciones útiles [219].

ii) Politetrafluoroetileno (PTFE)

A diferencia del  $\text{MoS}_2$ , el PTFE no tiene una estructura de capas y las propiedades de lubricación son el resultado de su alto punto de reblandecimiento [220]. Las características principales del PTFE son un coeficiente de fricción muy bajo, que es más pequeño que el de cualquier otro lubricante sólido, su resistencia a la degradación atmosférica y al ataque químico por parte de la mayoría de las sustancias; no obstante, este polímero muestra una alta tasa de desgaste [221]. El PTFE forma una mezcla inmiscible con PEEK en un rango de composición y el coeficiente de fricción para el material compuesto de PEEK/PTFE, es una función de la composición porcentual. De acuerdo con estudios tribológicos, la composición de este compuesto debe oscilar entre 10-15% peso de PTFE [222] para obtener una reducción importante en el coeficiente de fricción, a expensas de una pérdida modesta en su resistencia al desgaste. Con un contenido de PTFE de 40% volumen, esta fase se vuelve continua, de modo que la pobre resistencia al desgaste del PTFE y su bajo coeficiente de fricción dominan el rendimiento de la mezcla [223].

iii) Fibras como refuerzos

Algunas investigaciones relacionadas con el comportamiento tribológico de PEEK y sus compósitos han encontrado que el PEEK reforzado con fibras tiene un efecto beneficioso sobre sus propiedades tribológicas [224-227]. La adición de fibras cortas mejora la conductividad térmica, lo cual representa una gran ventaja, especialmente si se desean evitar los efectos del incremento de la temperatura en el área de contacto para evitar un aumento en la tasa de desgaste [228].

Las fibras de vidrio (GF) tienen baja resistencia, alto módulo de flexión y baja tasa de expansión, son los refuerzos de fibra más comunes de los termoplásticos para reducir la tasa de expansión y aumentar la flexión de PEEK [229]. Los estudios han demostrado que el coeficiente de fricción y las tasas de desgaste específicas para GF/PEEK (30% en peso de fibra de vidrio) aumentan ligeramente con el aumento de la carga aplicada. El impacto de la fibra de vidrio en el coeficiente de fricción y la tasa de desgaste del compuesto GF/PEEK es más pronunciado en condiciones de lubricación secas [230]. En otros estudios, Guo et al., han investigado el mecanismo de desgaste del PEEK reforzado con fibras de carbono (CF) y PTFE como lubricante sólido. Según sus hallazgos, la adición de 30% en peso de fibras de carbono mejoró las propiedades de resistencia, pero no redujo el coeficiente de fricción. Por su parte, los lubricantes sólidos influyeron en el rendimiento de fricción y desgaste de los compuestos PEEK [231].

Por otra parte [232], se ha reportado el comportamiento de fricción y desgaste del PEEK reforzado con fibras de carbono (CF/PEEK al 30% peso) a temperaturas elevadas, con un aumento en la resistencia mecánica al incrementar la temperatura. En otro estudio, Bijwe et al. encontró que la tasa de desgaste específica se redujo en más de un orden de magnitud cuando se agregó al menos el 10% en volumen de fibras cortas de carbono y por encima de este contenido de fibra, solo hubo una leve mejoría [233].

#### *b) Estudios tribológicos de PEEK con lubricación externa*

Una limitante para usar el polímero PEEK en un sistema de fricción dinámico con alta carga y velocidad bajo condiciones de lubricación seca, es su coeficiente de fricción intrínseco que resulta ser mayor en comparación con la lubricación húmeda, dado que posee una conductividad térmica relativamente baja, lo que conduce a una rápida acumulación de calor de fricción en la interfase [234], el cual se transfiere hacia el mismo sistema a través de la difusión de calor. Si la temperatura de la superficie alcanza la temperatura de transición vítrea, las cadenas de PEEK presentan un ablandamiento y eventualmente provocan fatiga [235]. Sin enfriamiento, el aumento de temperatura en la superficie de contacto está directamente relacionado con el coeficiente de fricción, la velocidad de deslizamiento y la carga aplicada [236]. De esta manera, cuando el coeficiente de fricción y la tasa de desgaste del PEEK bajo lubricación seca son más altos que los obtenidos bajo condiciones de lubricación húmeda, es conveniente aplicar lubricación externa [237]. Este tipo de lubricación también se utiliza en casos en los que hay muchos componentes que trabajan bajo condiciones de lubricación mixta e incluso

límite, debido a condiciones de carga muy altas, frecuentes paradas y arranques, entre otros [238].

Para reducir tanto la fricción como el desgaste de los componentes metálicos sometidos a contactos de lubricación mixta y límite, es esencial evitar el roce directo de las piezas metálicas formando tribopelículas de alto rendimiento [239]. Los lubricantes más utilizados son aceites minerales, grasas y en algunos casos, agua. El aceite de motor se ha utilizado como lubricante para investigar las propiedades de fricción y desgaste del PEEK puro y PEEK compuesto que forman pares tribológicos con una superficie de acero como contracuerpo. Los resultados han mostrado que la lubricación con aceite del motor ocasiona una disminución notable de los coeficientes de fricción para los materiales de PEEK, presentando una resistencia al desgaste mucho mayor que el acero lubricado con aceite de motor [240]. El rendimiento antifricción y antidesgaste de un líquido iónico (hexilfluorofosfato de butil-3-metilimidazolio, como lubricante externo para PEEK que se desliza contra el acero utilizando altas cargas (150–1500 N), sin enfriamiento, se estudió y comparó con el comportamiento de un aceite lubricante externo tradicional (aceite hidráulico antidesgaste LHM46). Los resultados mostraron que este líquido iónico presentó el 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) 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 [241]. En este sentido, aunque los LI's pueden ser una excelente opción como lubricantes, algunos de ellos contienen halógenos que a menudo inducen un desgaste altamente corrosivo al acero a temperaturas elevadas [242]. Por lo tanto, en otra investigación, se 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 [243]. De esta forma, 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 [244], aunque su alto costo de producción a escala industrial es el principal reto por resolver.

Las necesidades actuales de la industria metalmeccánica incluyen una reducción de peso de componentes que permitan una mayor capacidad de carga. Estos materiales deben ofrecer una alta resistencia a la corrosión y al desgaste, y se deben encontrar soluciones más económicas para reducir la fricción con lubricación interna o externa en las superficies de desgaste para reemplazar metales comunes como el acero inoxidable, el aluminio y el titanio, entre otros. En este sentido, el polímero PEEK ha sido considerado un material de reemplazo útil debido a sus sobresalientes propiedades mecánicas y térmicas [245]. Sin embargo, el PEEK puro no se usa comúnmente para propósitos tribológicos porque puede tener restricciones como material antifricción. Por lo tanto, para reducir la fricción y el desgaste de este material, se requiere el uso de materiales lubricantes [246].

El uso de lubricación interna es muy común para el polímero PEEK, ya que funciona correctamente en una amplia gama de condiciones de trabajo, debido a la formación de una película de transferencia en la interfaz entre el compuesto PEEK y la superficie metálica [247]. En cuanto a los lubricantes externos, las sustancias más habituales son en su mayoría de origen mineral (derivados del petróleo) o sintéticas (vía química). Los investigadores continúan examinando opciones de lubricación externa que exhiben un gran potencial para generar mejoras en el funcionamiento de las máquinas y sus procesos. Al mismo tiempo, la investigación de esta naturaleza busca alinearse con la tendencia de conciencia ambiental en la industria de lubricantes. Al elegir un lubricante externo, se deben considerar características como la viscosidad, la resistencia a la oxidación y el punto de fluidez. Se prefiere la lubricación externa cuando existen condiciones extremas en el sistema, como cargas elevadas, altas velocidades o temperaturas [248,249].

En la Tabla 2.3, se comparan las ventajas y desventajas de ambos tipos de lubricación. En general, no existe una solución que sea capaz de satisfacer eficazmente todos los requisitos. Las propiedades que se deben tener en cuenta son el coeficiente de fricción, la capacidad de carga, la resistencia a la corrosión, así como los factores ambientales (temperatura, presión, humedad, etc.).

**Tabla 2.3. Comparación entre lubricación sólida y lubricación líquida.**

| Tipos                                | Comparación                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | Estudios                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|--------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Lubricación interna (sólida)</b>  | <p><i>Ventajas</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- La formación de una película polimérica de transferencia en la contra superficie que inhibe el desgaste, ya que actúa como una capa protectora evitando los contactos directos entre las superficies de polímero y las asperezas duras de las contrapartes metálicas [250-253].</li> <li>- A través de la adición de sólidos lubricantes y refuerzos (fibras) se pueden mejorar las propiedades mecánicas de los polímeros para minimizar la fricción y el desgaste [254-256].</li> <li>- Es más económica que la lubricación externa y la limpieza es relativamente sencilla [241].</li> </ul> | <p><i>Pruebas tribológicas Pin-On-Disc [252]</i><br/> <i>Sistema:</i> PEEK -Ac. Inoxidable; <i>Condiciones:</i> 1 MPa, 1 m/s, 15,000 ciclos.<br/> <i>Hallazgos:</i> Disminución significativa del coeficiente de fricción después de los 10,000 ciclos debido a la formación de una película de transferencia estable.</p> <p><i>Pruebas tribológicas Flat-On-Flat [258]</i><br/> <i>Sistemas:</i> PEEK puro, PEEK compuesto (PTFE, grafito, fibras de carbón)- Acero AISI 52100 (100Cr6).<br/> <i>Condiciones:</i> velocidad de 20-50 mm/s; load 6.5, 13.0 and 16.0 kN.<br/> <i>Hallazgos:</i> Se alcanzan valores más bajos del CoF con PEEK compuesto. El grafito también forma una capa de transferencia en la superficie que reduce el coeficiente de fricción.</p> |
|                                      | <p><i>Desventajas</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Los polímeros exhiben baja conductividad térmica que exhibe, lo que genera la acumulación del calor de fricción [257], especialmente bajo cargas y velocidades elevadas y puede llegar a la temperatura de transición vítrea, lo que producirá el ablandamiento del material y posteriormente una falla inminente [258-262].</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                      | <p><i>Pruebas tribológicas Pin-On-Disc [255]</i><br/> <i>Sistemas:</i> PEEK puro, PEEK compuesto (nanopartículas de TiO<sub>2</sub>, al 5%, 10% y 15%)- Acero Inoxidable.<br/> <i>Condiciones:</i> 1 MPa, 2 horas, velocidad de 0.1 m/s; temperaturas 25°C, 150°C y 210 °C.<br/> <i>Hallazgos:</i> El desgaste de PEEK puro y los compuestos de PEEK aumenta exponencialmente con la temperatura, lo que se atribuye a la disminución de la rigidez de los materiales con el aumento de temperatura.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| <b>Lubricación externa (líquida)</b> | <p><i>Ventajas</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Se prefiere la lubricación externa cuando existen condiciones de operación extremas (altas cargas, velocidades elevadas) [263-265]. El líquido lubricante actúa como refrigerante disipando el calor [266]. Junto con la lubricación interna puede ser muy efectiva para minimizar la fricción y el desgaste [267,268].</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                              | <p><i>Pruebas tribológicas Ring-On-Plate [241]</i><br/> <i>Sistemas:</i> PEEK puro, PEEK compuesto (PTFE 10%w) - Acero Inoxidable. Lubricantes: L-HM46 y [BMIM][PF<sub>6</sub>].<br/> <i>Condiciones:</i> 150-1500 N, velocidad de 0.7 m/s; temperaturas 25°C.<br/> <i>Hallazgos:</i> El PEEK compuesto bajo lubricación seca presenta falla por fatiga a 800 N. El PEEK puro falla a 800 N con el lubricante LHM46, no así con el [BMIM][PF<sub>6</sub>] donde tolero sin falla la carga hasta 1200 N.</p>                                                                                                                                                                                                                                                              |
|                                      | <p><i>Desventajas</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Muchos de los lubricantes líquidos utilizados actualmente de origen mineral o sintético son muy efectivos como lubricantes, no obstante, se trata de sustancias tóxicas y no son biodegradables [269].</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | <p>Producción de fluidos hidráulicos biodegradables, teniendo como base aceites vegetales (jatropha, soja, etc.) que han mostrado tener un gran poder de lubricación además de ser amigables con el ambiente [270].</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |

### III. JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS

Desde 1984, el desgaste en piezas metálicas se ha priorizado como temática de investigación en países desarrollados, debido a las grandes pérdidas económicas derivadas de la disipación de la energía por fricción [271], la necesidad de mantenimiento correctivo de maquinaria [272] así como el reemplazo de piezas metálicas como consecuencia del desgaste del material [273]. El uso de materiales poliméricos en sustitución de metales ha sido atractivo debido a su versatilidad, facilidad de producción y a la reducción en peso que conlleva a una reducción de costos. Además de sus propiedades de resistencia, a la corrosión, al desgaste y al impacto.

Aunado a lo anterior, las crecientes preocupaciones medioambientales motivan a aumentar la demanda y el uso de fluidos ecológicos [274] en diversos sectores industriales. Numerosos fluidos utilizados como lubricantes se basan en aceites minerales obtenidos principalmente de 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 [275]. Desafortunadamente, debido a la baja biodegradabilidad además de la alta toxicidad de estos aceites y/o grasas, se ha puesto en auge el desarrollo de una química verde que involucra la fabricación de lubricantes alternativos que tengan características, tales como baja contaminación ambiental, combinaciones fáciles de aditivos [276], biodegradabilidad [277], costos de producción bajos [278], toxicidad baja, puntos de inflamación altos, volatilidad baja e índices de viscosidad alta [279].

En este contexto, los aceites vegetales representan una buena alternativa a los aceites de petróleo debido a su excelente lubricidad, relacionada con la presencia de largas cadenas de ácidos grasos en su estructura química [280], por lo que actualmente están siendo investigados como un stock base para lubricantes y fluidos funcionales [281]. Los aceites vegetales tienen mejores propiedades anticorrosivas en contacto con la superficie metálica y mayores índices de viscosidad. Estos aceites vegetales se obtienen por extracción líquida a partir de plantas oleaginosas como girasol, soja, colza, algodón y, en la zona tropical proviene de palmeras, cocoteros, *jatropha curcas* L. [282,283].

Otra alternativa viable al uso de aceites minerales son los líquidos iónicos que poseen un amplio rango de estabilidad térmica que puede ser aprovechado en numerosas aplicaciones en ingeniería. Tienen características como volatilidad baja, estabilidad



térmica alta y temperatura de fluidez baja, que son algunas de las propiedades que debe tener un buen lubricante [284]. Asimismo, existen numerosos estudios con pares tribológicos *metal-polímero*, donde se han encontrado reducciones muy significativas de los coeficientes de fricción y las tasas de desgaste, empleando líquidos iónicos como lubricantes, en un amplio rango de temperaturas, incluso a condiciones criogénicas. De estos hallazgos, se puede inferir que algunos líquidos iónicos poseen propiedades tribológicas similares, incluso superiores a las de los lubricantes convencionales [285].

Con base en estas evidencias, en este trabajo de investigación se seleccionó como par tribológico un polímero termoplástico compuesto como cuerpo base y un contracuerpo de acero inoxidable. El PEEK HPV es un polímero compuesto que tiene como base al PEEK puro e incluye como lubricantes sólidos internos al grafito y al PTFE, además de contener fibras de carbono como refuerzo. Adicionalmente, se pretende examinar el potencial de lubricantes externos innovadores en los sistemas PEEK/Acero inoxidable y PEEK HPV/Acero inoxidable que no han sido probados hasta el momento entre los cuales se incluyen dos tipos: a) aceite vegetal de girasol; b) líquidos iónicos: tetrafluoroborato de 1-butil-3-metilimidazolio y bis[trifluorometilsulfonyl] imida de trioctilmetilamonio. Se comparará su desempeño respecto a los sistemas puramente metálicos. Esto podría contribuir al reemplazo de aceite mineral y a la búsqueda de una alternativa biodegradable y, por lo tanto, más amigable con el medio ambiente.

Por tanto, se evaluarán las propiedades triboreológicas del sistema PEEK HPV/Acero inoxidable, mediante la tecnología de triboreología de TA Instruments, que permite la medición y el registro de la evolución de la viscosidad y del coeficiente de fricción en tiempo real [286].

### 3.1 Objetivos

#### 3.1.1 Objetivo general

Determinar las propiedades triboreológicas de los sistemas PEEK puro/Acero Inoxidable y PEEK HPV/Acero Inoxidable, vía lubricación externa con aceite vegetal de girasol, así como líquidos iónicos (tetrafluoroborato de 1-butil-3-metilimidazolio y bis[trifluorometil-sulfonyl] imida de trioctilmetilamonio), contrastando los resultados contra los obtenidos utilizando el aceite comercial SAE 25W-50 para automotores.

### 3.1.2 Objetivos específicos

- a) Caracterizar el comportamiento reológico de los lubricantes utilizados en el estudio.
- b) Analizar el efecto de las variables como fuerza normal y velocidad angular, en los valores del coeficiente de fricción y viscosidad en el sistema PEEK HPV/Lubricante/Acero inoxidable.
- c) Evaluar las propiedades antidesgaste de los lubricantes seleccionados, contrastando sus efectos con los que presenta un lubricante comercial utilizado ampliamente como aceite de motor (SAE 25W-50) en vehículos automotores con alto kilometraje.

## IV. MATERIALES Y MÉTODOS

### 4.1 Materiales

#### 4.1.1 Superficies

##### a) Polímeros

Los materiales poliméricos PEEK que se investigaron en el presente trabajo fueron PEEK puro y un tipo de PEEK HPV compuesto. Estos materiales poliméricos fueron suministrados por Quadrant (MX) en forma de barra (productos Ketron® 1000 PEEK y HPV PEEK), 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. Los módulos de elasticidad del PEEK puro y PEEK HPV son 4.34 y 8.62 GPa, y sus resistencias a la tracción son 110 y 131 MPa, respectivamente. Las características generales de ambos polímeros son las siguientes:

- i. PEEK puro: se puede usar en forma continua a 480 ° F (250 ° C) en agua caliente o vapor sin pérdida permanente de propiedades físicas. Tiene una clasificación de inflamabilidad V-0, lo que implica que presenta muy baja emisión de humo y gases tóxicos cuando se expone a la llama. Entre los fluoropolímeros, el PEEK se utiliza cuando existen entornos hostiles debido a su alta resistencia química.
- ii. PEEK HPV: es un compuesto del PEEK que está reforzado con fibra de carbón y contiene lubricantes sólidos internos como grafito y PTFE. Esta composición le confiere cualidades como fricción baja, poco desgaste de las piezas, soporta velocidades y presiones altas, y las piezas son fáciles de mecanizar. Este material se puede emplear en aplicaciones bajo condiciones de operación muy agresivas e incluso bajo ambientes radiactivos.

En la figura 4.1 se observan ambas variedades del polímero PEEK suministradas por Quadrant, resaltando la coloración característica que adquieren de acuerdo con su composición.

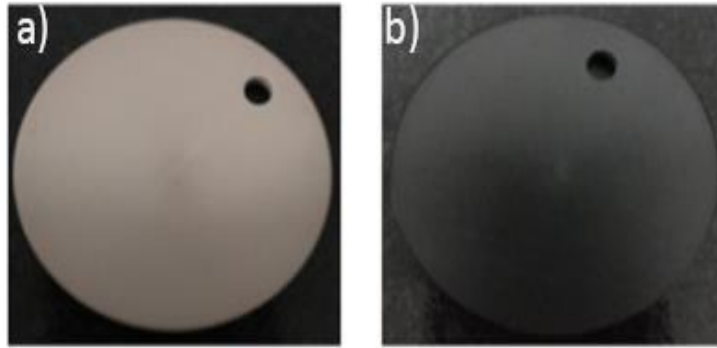


Figura 4.1. Superficies de una muestra circular del polímero  
(a)PEEK puro, (b) PEEK HPV,  $\theta=2''$

La superficie contraparte fue un anillo de acero inoxidable austenítico AISI304 (Fig. 4.3) 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's basados en derivados de imidazolio con diferentes sustituyentes y aniones [287]. 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.

#### 4.1.2 Lubricantes

Los lubricantes externos seleccionados fueron un aceite de motor de alto desgaste, un aceite vegetal y dos líquidos iónicos. El aceite de motor utilizado en este trabajo fue 25W-50, marca Roshfrans que presenta buenas propiedades antidesgaste y resistencia a la espuma. El aceite vegetal fue aceite de girasol suministrado por Lubcoco. Los líquidos iónicos utilizados fueron dos: tetrafluoroborato de 1-butil-3-metilimidazolio,  $[BMIM^+][BF_4^-]$  y bis[trifluoro-metil-sulfonil] imida de trioctilmetilamonio  $[MTOA^+][NTF_2^-]$ , ambos adquiridos a través de Sigma Aldrich. Las estructuras químicas de PEEK, los componentes principales de SAE 25W-50,  $[BMIM^+][BF_4^-]$ ,  $[MTOA^+][NTF_2^-]$  y el aceite de girasol, se muestran en la Fig. 4.2.

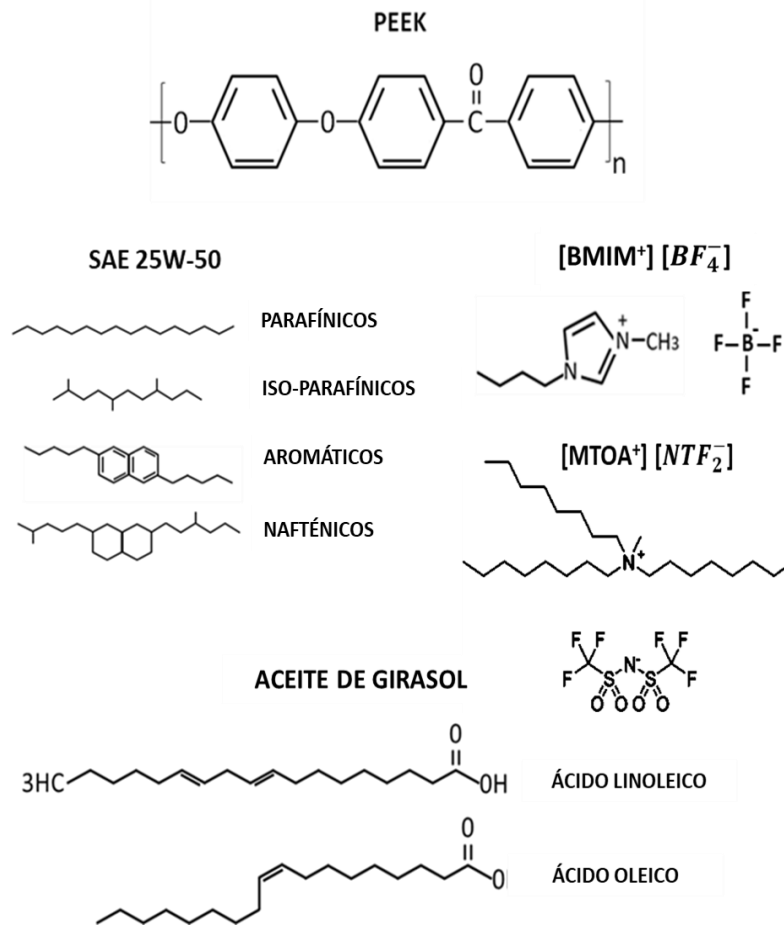


Fig 4.2 Estructura química de lubricantes y superficie [287-290]

a) Aceite de motor SAE 25W-50: brinda una gruesa película de aceite que ayuda a proteger los componentes mecánicos que operan bajo condiciones severas, como altas temperaturas, reducen el desgaste y la corrosión.

b) Aceite de girasol: es la grasa procedente de la semilla del girasol (*Helianthus annuus*), una planta originaria del continente americano. La semilla contiene aproximadamente el 25% peso de aceite. La mayor parte de estos lípidos se encuentran como triglicéridos, y los ácidos grasos que forman parte de ellos son mayoritariamente poliinsaturados (62% del total de la grasa) [288].

c) Tetrafluoroborato de 1-butil-3-metilimidazolio, [BMIM<sup>+</sup>][BF<sub>4</sub><sup>-</sup>]: es un líquido iónico formado por un catión heterocíclico sustituido [BMIM<sup>+</sup>] 1-butil-3-metilimidazolio) y un anión inorgánico [BF<sub>4</sub><sup>-</sup>] (tetrafluoroborato). Entre sus características destacan sus propiedades de lubricación, es un excelente disolvente, tiene punto de fusión bajo, es

estable en agua y aire, presenta una conductividad alta y posee un amplio rango de estabilidad electroquímica [289].

d) Bis[trifluoro-metil-sulfonil] imida de trioctilmetilamonio,  $[\text{MTOA}^+][\text{NTF}_2^-]$ : es un líquido iónico a base de amonio cuyas propiedades lubricantes aún se encuentran bajo investigación, es muy miscible en aceites y se ha encontrado que no induce corrosión en sustratos metálicos (acero, TiN, CrN y 10 ZrN), además de considerarse biocompatibles debido a su bajo nivel de toxicidad [290].

#### 4.2 Pruebas de triboreología

Las propiedades triboreológicas de PEEK puro y PEEK HPV con lubricación externa se estudiaron con un Reómetro Híbrido DHR-3 de TA Instruments Inc., 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-Computadora, con un software denominado TRIOS para la adquisición de datos (figura 4.3).



Figura 4.3. (i) Partes del triboreómetro [73]: a) Triboreómetro, b) Computadora, c) Módulo de control; (ii) Acercamiento de la zona de pruebas de las superficies deslizantes.

Este software maneja un conjunto completo de variables para llevar a cabo el análisis de datos, incluyendo el coeficiente de fricción (CoF), la fuerza de carga ( $F_N$ ), la fuerza de fricción ( $F_F$ ), entre otras. Estas variables se pueden usar para construir curvas Stribeck, para mediciones de fricción estática o para explorar combinaciones específicas de temperatura, fuerzas normales y un amplio rango de velocidades angulares. Esta tecnología permite múltiples perfiles de contacto y simulan las condiciones industriales de operación más comunes. Los accesorios de tribología son anillo en plato, bola en tres platos, tres bolas en plato y bola en tres bolas. En este trabajo se usó la de anillo en plato, conocida como *Ring-On-Plate* (ROP). 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.

La configuración de prueba se muestra esquemáticamente en la Fig. 4.4 donde se muestra el experimento tribológico montado, así como un acercamiento a las superficies en interacción donde se distingue un anillo de acero inoxidable que rotara 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. Según la teoría de contacto hertziana, las presiones medias de contacto en el caso de PEEK puro y PEEK HPV son de 0.03 y 0.05 GPa, respectivamente.

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.

### **4.3 Mojabilidad de los lubricantes líquidos**

El ángulo de contacto entre cada uno de los lubricantes externos (SAE 25W-50, [BMIM<sup>+</sup>][BF<sub>4</sub><sup>-</sup>], [MTOA<sup>+</sup>][NTF<sub>2</sub><sup>-</sup>] y el aceite de girasol) y las superficies de la muestra de PEEK HPV antes de las pruebas triboreológicas, se midieron utilizando un goniómetro de ángulo de contacto (detector Dataphysics, OCA 15ECSL2008) a una temperatura de 25 °C para evaluar la mojabilidad.

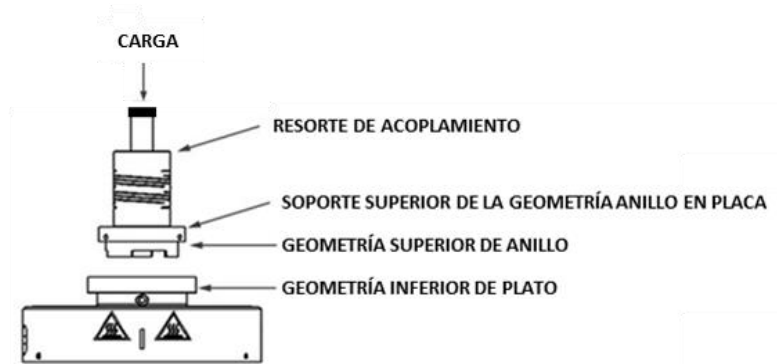


Figura 4.4. Configuración del Sistema Triboreológico.

#### 4.4. 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 electrónico de barrido modelo JEOL JSM-6360LV y un microscopio óptico modelo Quanta-200.



## V. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 5.1 Propiedades fisicoquímicas

En general, las propiedades fisicoquímicas de los aceites vegetales dependen directamente de la composición de los ácidos grasos. Se determinaron las propiedades fisicoquímicas como viscosidad cinemática y densidad de los lubricantes puros utilizados en este trabajo, mientras que el punto de inflamación fue tomado de los estudios reportados por De Gee [280]. Los valores se muestran en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1. Propiedades fisicoquímicas de los lubricantes utilizados en este trabajo.

| Propiedades                      | Aceite de girasol | SAE 25W-50 | [BMIM <sup>+</sup> ][BF <sub>4</sub> <sup>-</sup> ] | [MTOA <sup>+</sup> ][NTF <sub>2</sub> <sup>-</sup> ] |
|----------------------------------|-------------------|------------|-----------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| Viscosidad Cinemática 40°C (cSt) | 776               | 866        | 1252                                                | 278                                                  |
| Densidad a 25 °C (kg/l)          | 0.935             | 0.968      | 1.2                                                 | 1.12                                                 |
| Punto de inflamación (K)         | 525               | 524        | 561                                                 | 586                                                  |





La viscosidad cinemática del lubricante representa un indicador de las fuerzas de fricción interna a nivel molecular, lo cual influye en la capacidad de la sustancia para formar una película lubricante durante la operación. El líquido iónico [MTOA<sup>+</sup>][NTF<sub>2</sub><sup>-</sup>] es el lubricante que posee la menor viscosidad con respecto a los otros lubricantes utilizados, seguido por el aceite de girasol, aceite comercial SAE 25W-50 y el líquido iónico [BMIM<sup>+</sup>][BF<sub>4</sub><sup>-</sup>] que exhibe la viscosidad más alta (ver Tabla 5.1). Como se verá posteriormente este lubricante vegetal, presenta un comportamiento antifricción sobresaliente respecto a los otros lubricantes. Esto pone en evidencia la estrecha relación de la viscosidad con el coeficiente de fricción. Por otro lado, en triboreología es importante que el lubricante tenga una volatilidad y un punto de inflamación por encima de la temperatura de operación del sistema. En este estudio triboreológico, los experimentos se llevan a cabo a temperatura ambiente por lo que el punto de inflamación está lejos de alcanzarse y la volatilidad es baja.

## 5.2 Mojabilidad de líquidos lubricantes

Los ángulos de contacto de los lubricantes externos en interacción con las muestras de PEEK HPV usadas en las pruebas de fricción se muestran en la Tabla 5.2. De acuerdo con los resultados obtenidos, la interacción entre las moléculas del PEEK HPV y las de los lubricantes de estudio permite que estos tiendan a cubrir la superficie sólida, formándose un ángulo de contacto menor de  $90^\circ$  en todos los casos.

El aceite de girasol alcanza el valor más bajo del ángulo de contacto, seguido del aceite comercial SAE 25W-50 y el líquido iónico  $[\text{MTOA}^+][\text{NTF}_2^-]$  que tienen valores muy cercanos y duplican el correspondiente al aceite vegetal, siendo el más alto el del líquido iónico  $[\text{BMIM}^+][\text{BF}_4^-]$  que es 2.6 veces más grande que el del aceite vegetal.

Tabla 5.2. Ángulo de contacto de lubricantes con superficies PEEK HPV.

| <b>ACEITE DE GIRASOL</b>                                                                                  | <b>SAE 25W-50</b>                                                                                          |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $31 \pm 1.5^\circ$<br> | $68 \pm 1^\circ$<br>   |
| <b><math>[\text{BMIM}^+][\text{BF}_4^-]</math></b>                                                        | <b><math>[\text{MTOA}^+][\text{NTF}_2^-]</math></b>                                                        |
| $82.5 \pm 1^\circ$<br> | $69.5 \pm 1^\circ$<br> |

Este comportamiento es un indicador de que la interacción entre las moléculas del sólido y de los 3 líquidos lubricantes, aceite de girasol, SAE 25W-50 y  $[\text{MTOA}^+][\text{NTF}_2^-]$ , ocurre bajo una situación energética favorable donde el sólido presenta una energía superficial suficientemente alta para vencer la tensión superficial del líquido lubricante y formar ángulos de contacto menores a  $90^\circ$ , cubriendo la superficie de manera importante. No así para el  $[\text{BMIM}^+][\text{BF}_4^-]$  cuyas fuerzas existentes en el seno del líquido son más fuertes que las que existen entre la superficie del sólido y líquido, formando un ángulo de contacto cercano a  $90^\circ$ .

El aceite de girasol es el biolubricante que presenta una mayor afinidad con la superficie polimérica. En su composición se encuentran presentes ácidos grasos tales como el ácido oleico que es capaz de adsorberse fuertemente en las superficies, facilitando la formación de una película lubricante más estable entre las superficies de contacto [291-294] lo cual puede derivar en una reducción importante del coeficiente de fricción como se estudiará más adelante.

### 5.3 Pruebas de triboreología

#### 5.3.1 Comportamiento reológico de los lubricantes seleccionados

En la figura 5.1 se muestran las curvas de flujo de los lubricantes utilizados en este estudio, donde se observa que el esfuerzo cortante aumenta conforme se va incrementando la velocidad de deformación, mostrando una relación lineal en todos los casos. La viscosidad es constante por lo que los fluidos lubricantes utilizados se pueden considerar como fluidos newtonianos ya que existe una relación lineal entre el esfuerzo y velocidad de corte de acuerdo con la siguiente expresión, conocida como Ley de Newton de la viscosidad:

$$\tau = -\mu * \gamma$$

Donde,

$\tau$ , es el esfuerzo de corte (Pa = N/m<sup>2</sup> = Kg/m s<sup>2</sup>).

$\mu$ , es la viscosidad del fluido newtoniano (Pa.s = kg/m s).

$\gamma$ , es la velocidad de corte (s<sup>-1</sup>).

Tabla 5.3 Ecuaciones reológicas de los lubricantes.

| FLUIDO LUBRICANTE                                    | ECUACION REOLÓGICA   | R <sup>2</sup> |
|------------------------------------------------------|----------------------|----------------|
| Aceite de girasol                                    | y = 0.0645x + 0.0023 | 0.9999         |
| [BMIM <sup>+</sup> ][BF <sub>4</sub> <sup>-</sup> ]  | y = 0.0877x + 0.017  | 0.9999         |
| SAE 25W-50                                           | y = 0.3234x + 0.0146 | 0.9999         |
| [MTOA <sup>+</sup> ][NTF <sub>2</sub> <sup>-</sup> ] | y = 0.5622x + 0.0072 | 0.9999         |

Los lubricantes que presentan menor viscosidad son el aceite de girasol y el líquido iónico  $[\text{BMIM}^+][\text{BF}_4^-]$  con valores relativamente cercanos de 0.0645 y 0.0877 Pa.s y el aceite comercial SAE 25W-50 y  $[\text{MTOA}^+][\text{NTF}_2^-]$  con viscosidades 0.3234 y 0.5622 Pa.s. El comportamiento es el característico de un fluido newtoniano bajo el rango de estudio

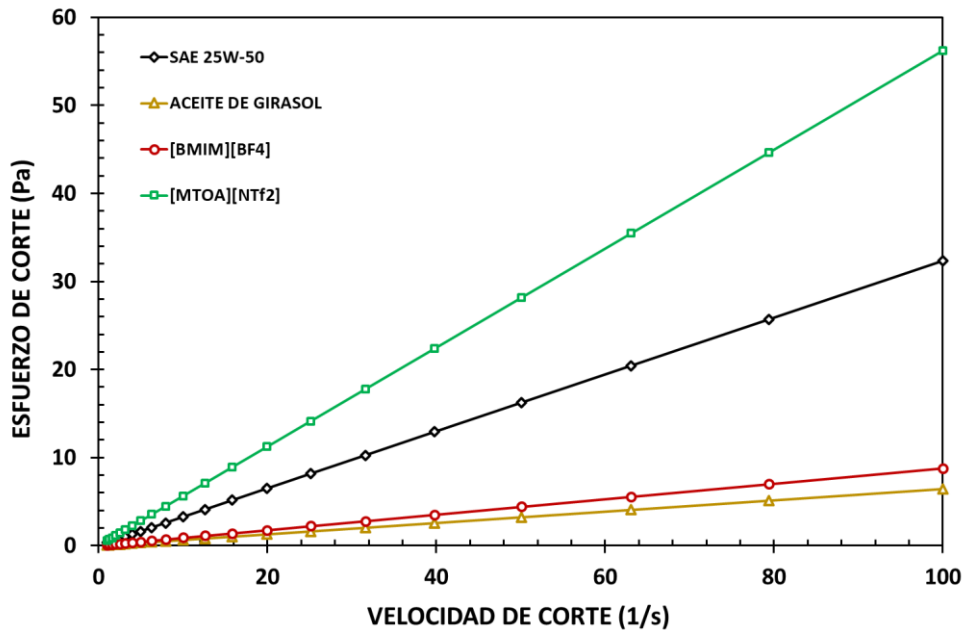


Figura 5.1. Reología de los lubricantes externos seleccionados para el par tribológico PEEK HPV/Acero inoxidable a 25°C.

### 5.3.2 Comparación de las respuestas tribológicas entre PEEK puro y compuesto (HPV).

El estudio del sistema PEEK-Acero Inoxidable, se inició comparando la respuesta tribológica del PEEK puro vs PEEK HPV compuesto usando como lubricante externo el aceite de girasol. Se registró el coeficiente de fricción vs velocidad angular en el rango de velocidades de 0.01-100 RAD/S, a la temperatura de 25°C. De acuerdo con la figura 5.1, el PEEK HPV muestra coeficientes de fricción menores que el PEEK puro en un amplio rango de velocidades angulares. Esto se debe en parte a las características tribológicas superiores que ha mostrado el PEEK HPV, que le son conferidas por los lubricantes sólidos que contiene (grafito y PTFE). El comportamiento de los coeficientes de fricción se puede dividir en dos intervalos. El primero de 0.05-1 RAD/S y de 1-100 RAD/S. En el primer intervalo ambos sistemas se comportan de forma muy similar debido a que el sistema se encuentra en la zona de lubricación límite, en la cual el lubricante juega un papel nulo.

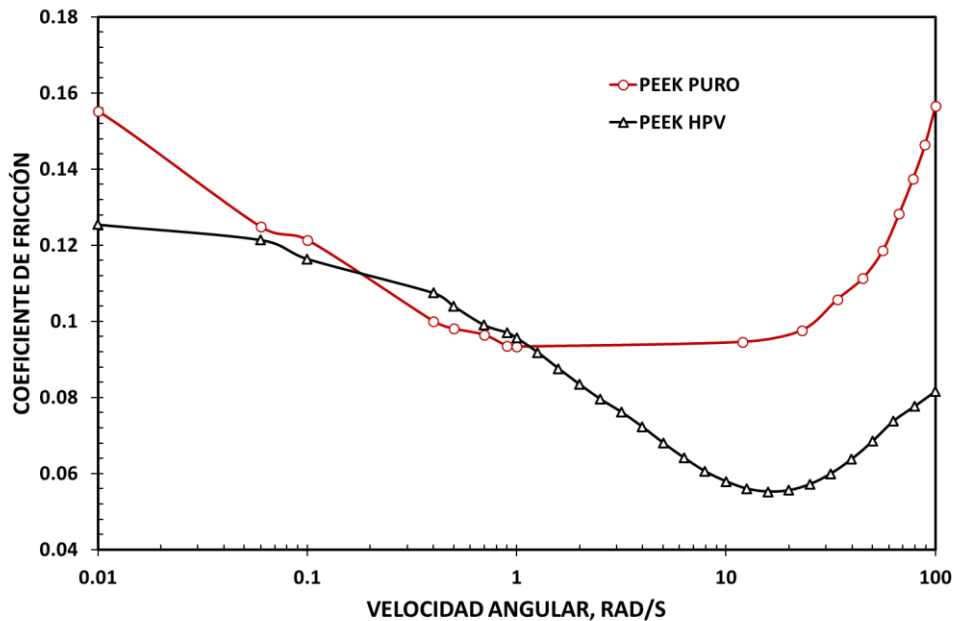


Fig. 5.2. Coeficientes de fricción del sistema PEEK/Ac. Inox. utilizando PEEK HPV vs PEEK puro, lubricante vegetal de aceite de girasol (condiciones: 10 N y 0.001-100 RAD/S).

Una vez que se alcanza la zona de lubricación mixta se puede observar que el PEEK puro presenta una estabilización o zona donde no existen cambios aparentes en el coeficiente de fricción hasta que se alcanza la zona de lubricación hidrodinámica. Mientras que para el PEEK HPV el coeficiente de fricción disminuye notablemente tanto en la zona de lubricación mixta como hidrodinámica, tal y como puede observarse en la figura 5.2. La diferencia entre los coeficientes de fricción de ambos sistemas está relacionada con el hecho de que el PEEK HPV, además de contar con lubricación externa, posee lubricación interna debida a su formulación.

En la figura 5.3 se muestra la evolución del coeficiente de fricción del sistema PEEK/HPV bajo diferentes modos de lubricación: a) interna o seca, b) externa, usando dos lubricantes: vegetal (aceite de girasol) y mineral (SAE 25W-50), aplicando condiciones de carga y velocidad angular constantes de 5 N y 10 RAD/S, respectivamente, durante 33 minutos para estabilizar el sistema. El coeficiente de fricción promedio para el PEEK HPV en lubricación seca es mayor que el coeficiente de fricción para el PEEK HPV en lubricación húmeda, usando aceite de girasol la relación es de 3:1 y para el aceite comercial es de 2:1. El mejor desempeño tribológico del material PEEK-HPV parece ser bajo lubricación húmeda en el rango de las condiciones de operación.

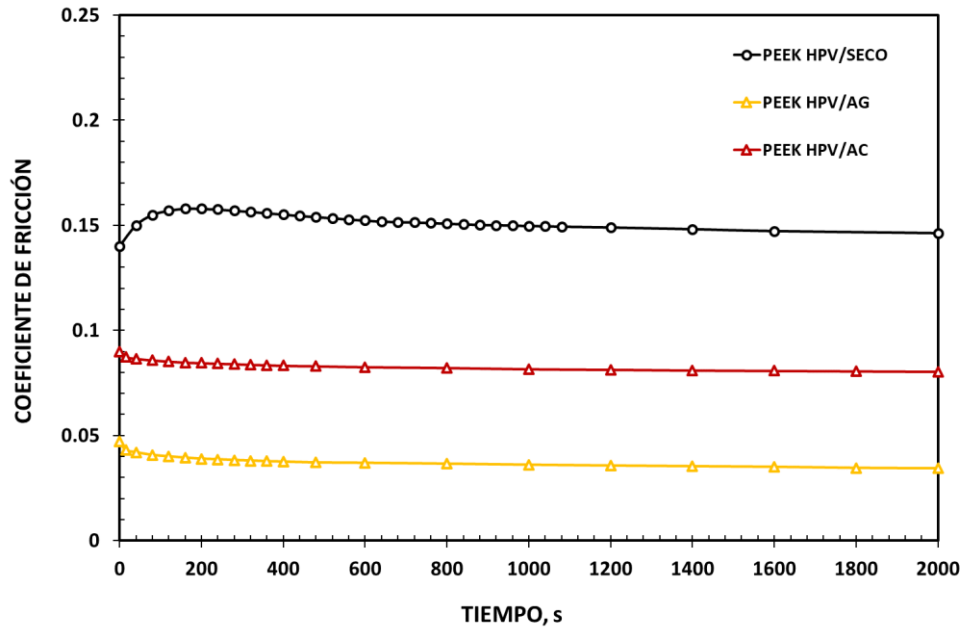


Fig. 5.3. Comportamiento tribológico para el sistema PEEK HPV/Ac. Inoxidable. Modos de lubricación: a) Seca, b) Aceite de girasol c) Aceite comercial SAE 25W-50. Condiciones: 5 N y 1 RAD/S.

Este comportamiento puede deberse al efecto combinado de los ácidos grasos presentes en el aceite vegetal de girasol y el grafito como lubricante sólido, que se extrae en el aceite de forma notable. En este caso los ácidos grasos del aceite vegetal de girasol son adsorbidos por las superficies, formando una capa molecular que se adhiere fuertemente a las mismas, disminuyendo el contacto directo polímero-metal. Por su parte la presencia del grafito forma también capas que evitan el contacto entre las superficies contribuyendo a la formación de una interfase de bajo esfuerzo cortante entre dichas superficies en interacción. Esta interpretación se puede constatar a partir de estudios de mojabilidad (Fig. 5.4) donde se mide el ángulo de contacto que forma el aceite de girasol (puro y al 5%w de grafito en polvo) con el PEEK puro y el PEEK HPV.

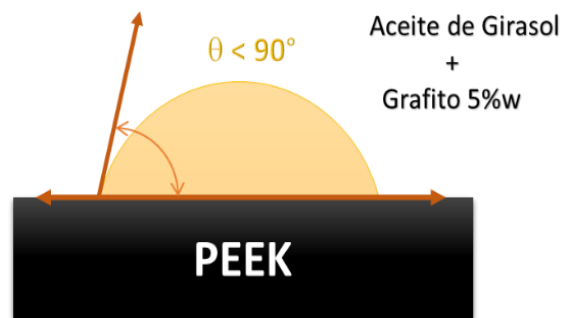





Figura 5.4 Ángulo de contacto

Los resultados del estudio de mojabilidad se presentan en la tabla 5.4 donde se observa que la presencia de grafito en la matriz PEEK HPV influye significativamente en la disminución del ángulo de contacto con respecto al PEEK puro. Por otro lado, la adición de grafito al aceite de girasol provoca una disminución en el ángulo de contacto con el PEEK puro, lo que sugiere que el grafito influye en la adsorción del aceite con la superficie de PEEK. No obstante, es indudable el efecto que tiene la lubricación interna en el valor del ángulo de contacto.

De esta forma, el material PEEK que se usará para llevar a cabo el estudio triboreológico a diferentes cargas será el PEEK HPV que presenta características mejoradas con respecto al PEEK puro, al incluir en su composición lubricantes internos que reducen la fricción de manera significativa.

Tabla 5.4. Ángulo de contacto formado entre lubricante vegetal con superficies PEEK.

| Superficie | Lubricante                                  | Ángulo de contacto | Imagen                                                                                |
|------------|---------------------------------------------|--------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| PEEK puro  | Aceite de Girasol                           | $65 \pm 1.0^\circ$ |  |
|            | Aceite de girasol + polvo de grafito (5 %w) | $51 \pm 1.0^\circ$ |  |
| PEEK HPV   | Aceite de girasol                           | $31 \pm 1.5^\circ$ |  |

### 5.3.3 Comportamiento tribológico de los lubricantes de estudio

El comportamiento tribológico del sistema PEEK HPV-Lubricante-Acero inoxidable se puede observar en las Figuras 5.5 y 5.6, donde se presentan las curvas Stribeck para los lubricantes de estudio propuestos (aceite de girasol, aceite de motor 25W-50,  $[\text{BMIM}^+][\text{BF}_4^-]$ ,  $[\text{MTOA}^+][\text{NTF}_2^-]$ ) y agua, 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.

Los resultados muestran que el aceite de girasol, el  $[\text{BMIM}^+][\text{BF}_4^-]$  y el aceite comercial SAE 25W-50 (lubricante de referencia) presentan coeficientes de fricción más bajos en la mayor parte del intervalo de velocidades angulares de estudio, no así para el líquido iónico  $[\text{MTOA}^+][\text{NTF}_2^-]$  que exhibe coeficientes de fricción significativamente mayores respecto a los otros 3 lubricantes, por lo que el estudio proseguirá con los lubricantes que muestran menores coeficientes de fricción bajo las condiciones de estudio.

El comportamiento tribológico del sistema PEEK HPV-Lubricante-Acero inoxidable con los lubricantes que exhiben mejor respuesta antifricción se observa en las Figuras 5.7-5.12, donde se presentan las curvas Stribeck para los tres lubricantes de interés (aceite de girasol, aceite de motor 25W-50, líquido iónico  $[\text{BMIM}^+][\text{BF}_4^-]$ ) y agua como referencia, bajo condiciones de carga de 1, 5, 10, 15, 20 y 30 N en un intervalo de velocidad angular de 0.001-100 RAD/S, a la temperatura de 25°C.

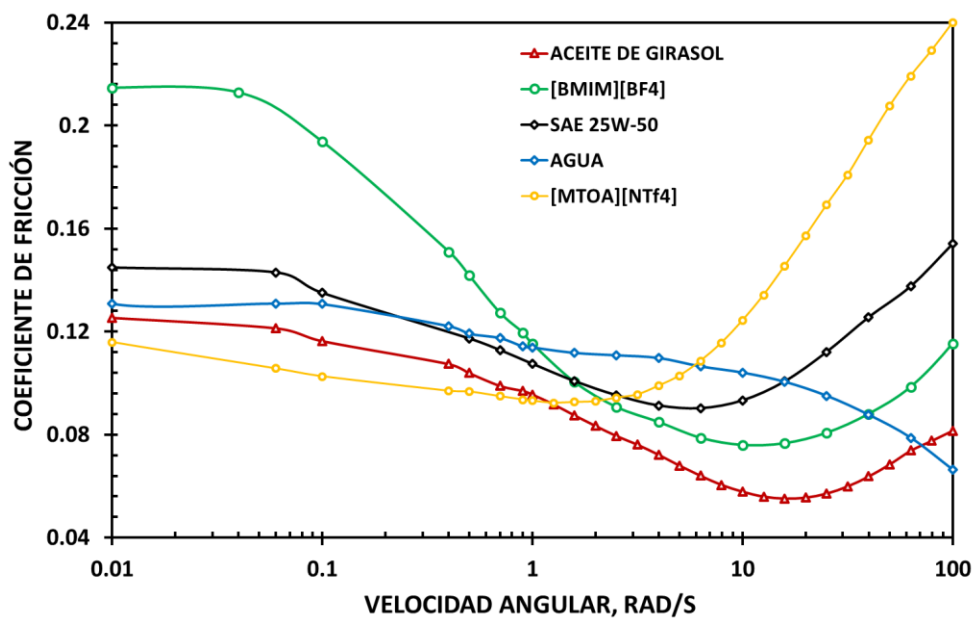


Fig. 5.5. Coeficientes de fricción del sistema PEEK HPV/Ac. Inox. con diferentes lubricantes (condiciones: 10 N y 0.001-100 RAD/S).



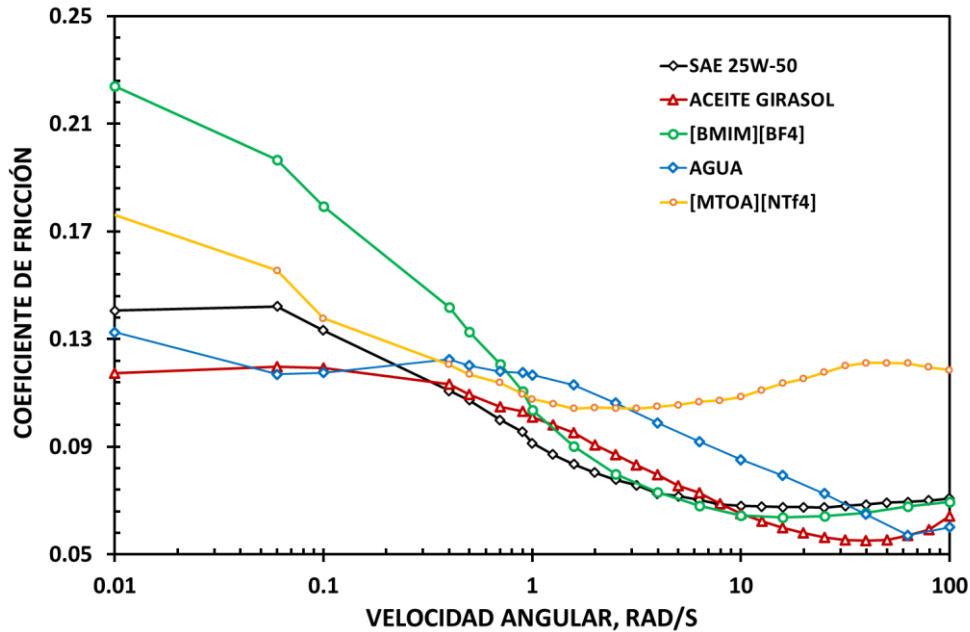


Fig. 5.6. Coeficientes de fricción del sistema PEEK HPV/Ac. Inox. con diferentes lubricantes (condiciones: 30 N y 0.001-100 RAD/S).

En estos gráficos se puede observar en forma general el comportamiento tribológico del sistema PEEK HPV/Ac. Inoxidable, donde los valores más bajos de CoF corresponden al aceite de girasol, tomando en cuenta todo el rango de velocidades y cargas de operación aplicados, es decir, el lubricante vegetal presenta un comportamiento de lubricación mejorado respecto al del aceite comercial SAE 25W-50 y el líquido iónico  $[BMIM^+][BF_4^-]$ . Por ejemplo, para 10 N y 10 RAD/S se alcanza una reducción del CoF del 61% y 31% con respecto a SAE 25W-50 y  $[BMIM^+][BF_4^-]$ , respectivamente.

El líquido iónico  $[BMIM^+][BF_4^-]$  presenta un comportamiento de lubricación que puede dividirse en dos zonas. A velocidades angulares menores de 1 RAD/S, tiene los CoF más altos de todos los lubricantes; a velocidades mayores a 1 RAD/S, los CoF disminuyen en forma notable, alcanzando valores menores a los del SAE 25W-50, aunque mayores que los correspondientes al aceite de girasol. Por su parte, el SAE 25W-50 presenta CoF más grandes que el aceite girasol y con respecto al líquido iónico, suelen ser menores a velocidades angulares inferiores a 1 RAD/S y más grandes a velocidades mayores.

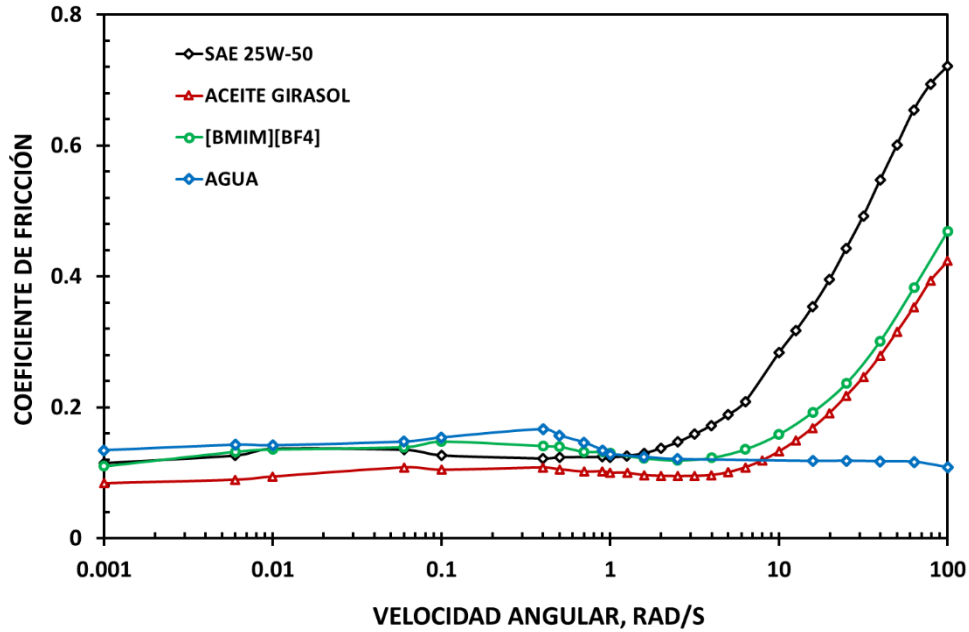


Fig. 5.7. Coeficientes de fricción del sistema PEEK HPV/Ac. Inox. con diferentes lubricantes (condiciones: 1 N y 0.001-100 RAD/S).

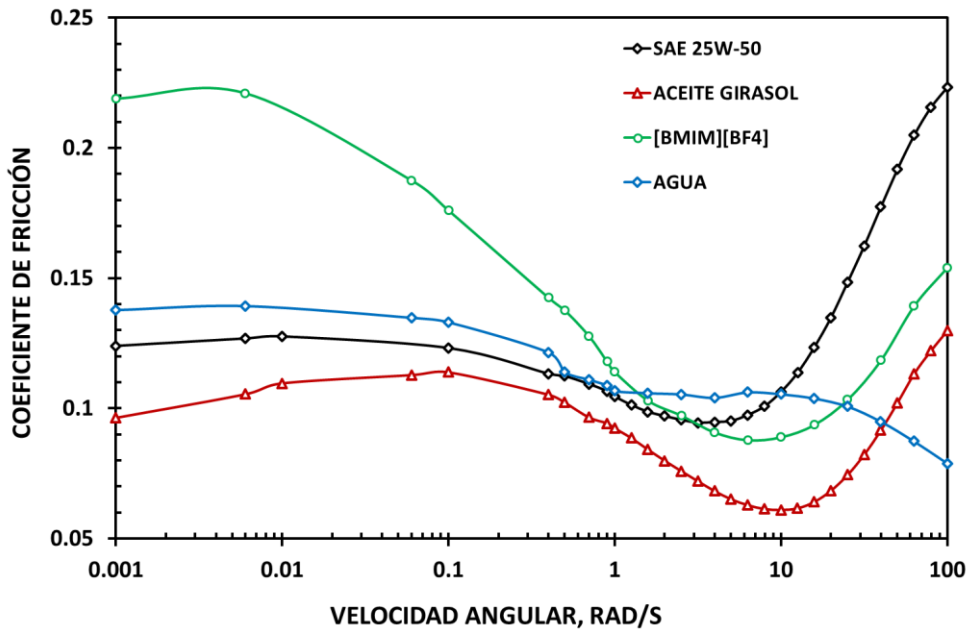


Fig. 5.8. Coeficientes de fricción del sistema PEEK HPV/Ac. Inox. con diferentes lubricantes (condiciones: 5 N y 0.001-100 RAD/S).

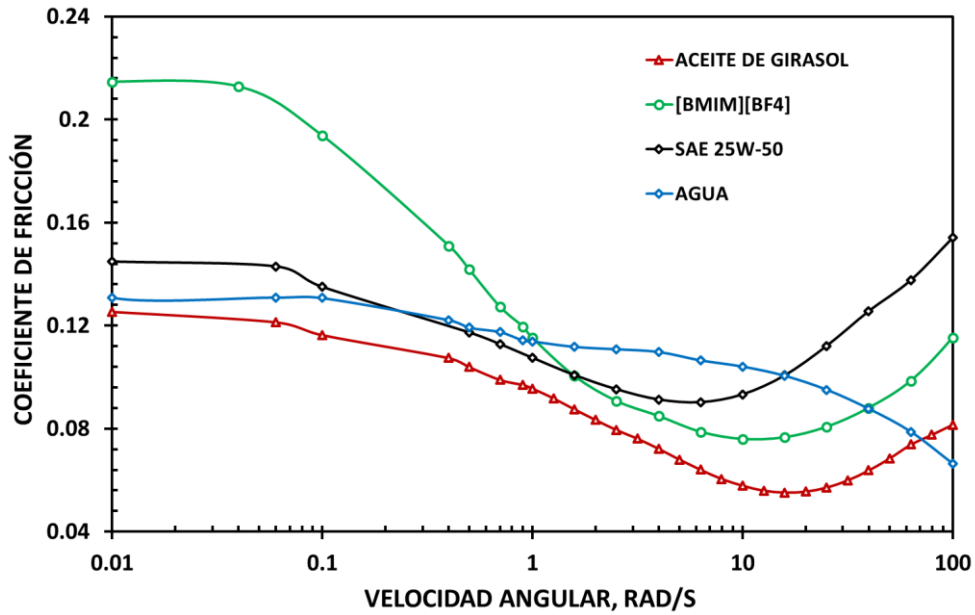


Fig. 5.9. Coeficientes de fricción del sistema PEEK HPV/Ac. Inox. con diferentes lubricantes (condiciones: 10 N y 0.001-100 RAD/S).

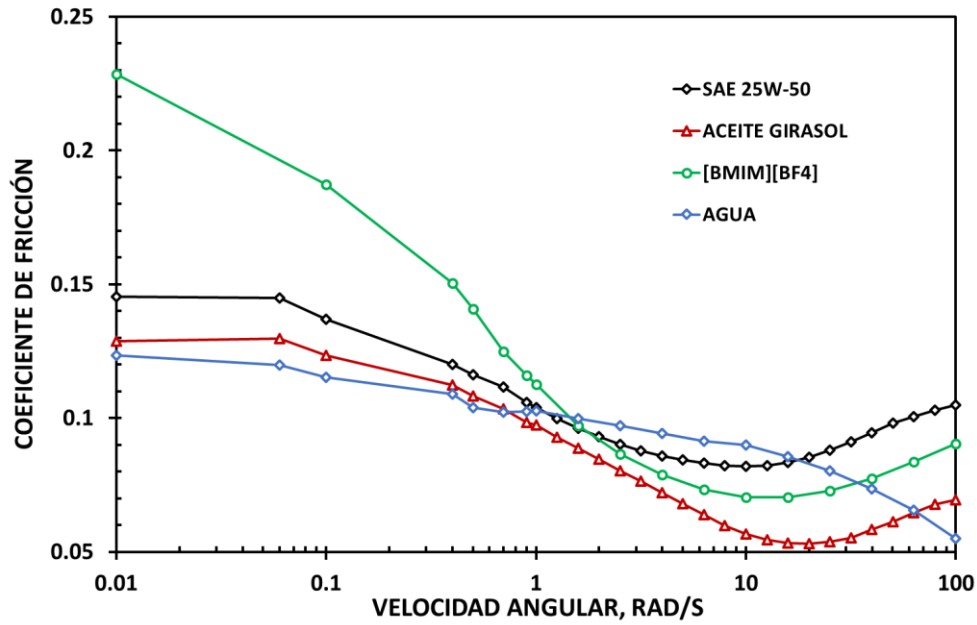


Fig. 5.10. Coeficientes de fricción del sistema PEEK HPV/Ac. Inox. con diferentes lubricantes (condiciones: 15 N y 0.001-100 RAD/S).

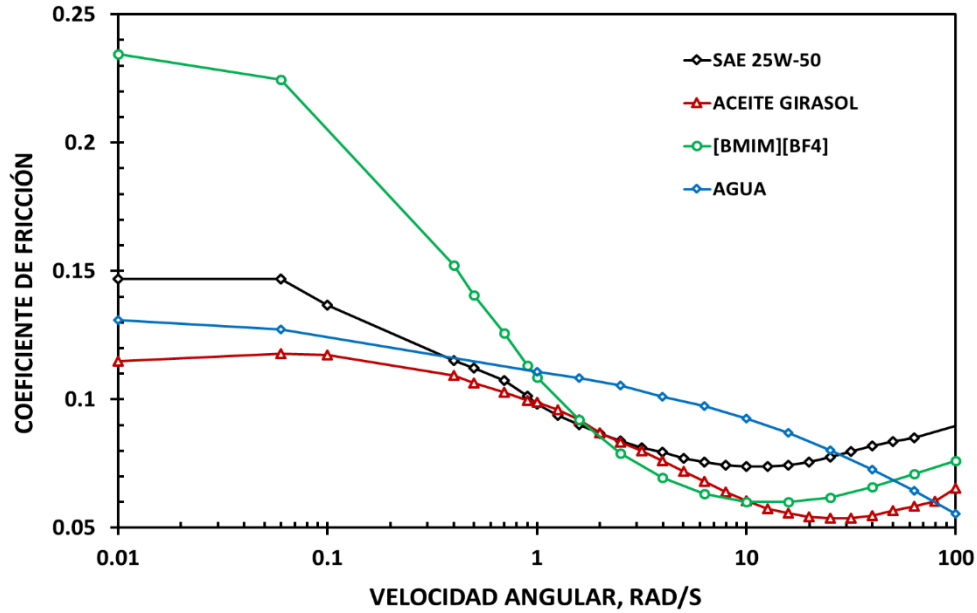


Fig. 5.11. Coeficientes de fricción del sistema PEEK HPV/Ac. Inox. con diferentes lubricantes (condiciones: 20 N y 0.001-100 RAD/S).

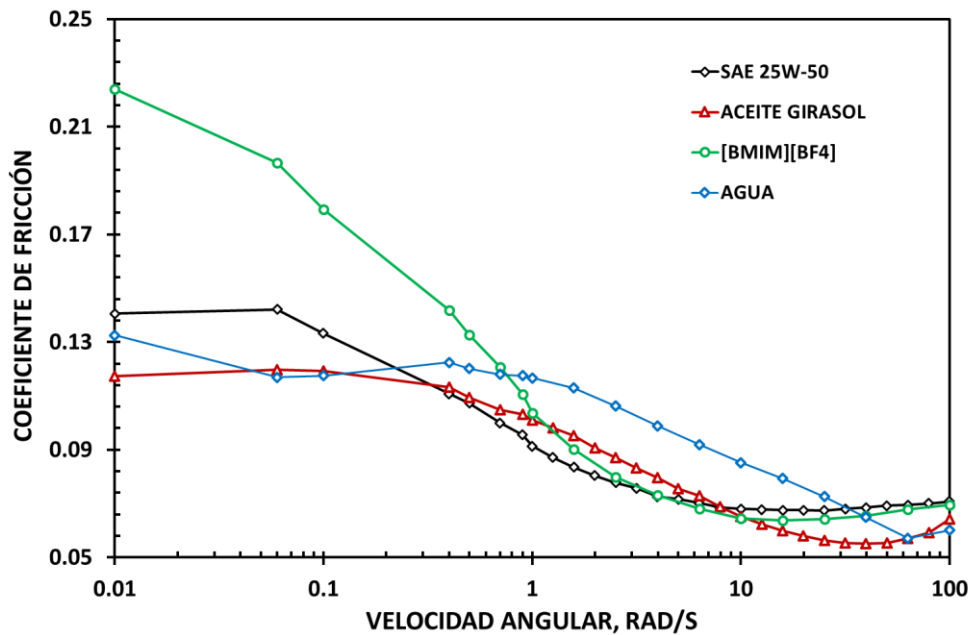


Fig. 5.12. Coeficientes de fricción del sistema PEEK HPV/Ac. Inox. con diferentes lubricantes (condiciones: 30 N y 0.001-100 RAD/S).

Es importante resaltar que el coeficiente de fricción se vuelve independiente con el aumento 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 5.13, 5.14 y 5.15.

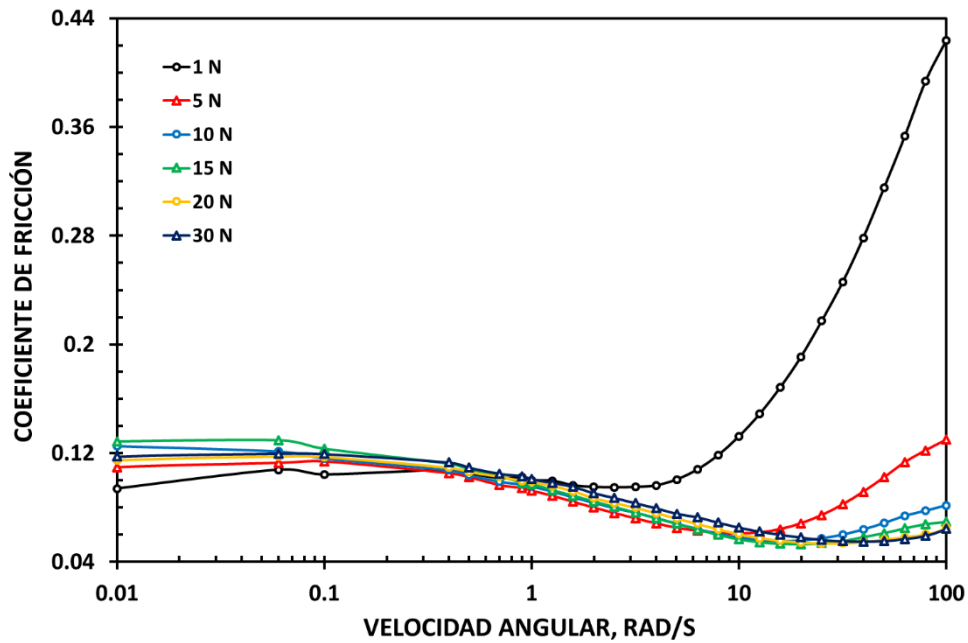


Fig. 5.13. Coeficientes de fricción del sistema PEEK HPV/Ac. Inox. con lubricante vegetal de aceite de girasol. (Condiciones: 1, 5, 10, 15, 20, 30 N y 0.01-100 RAD/S).

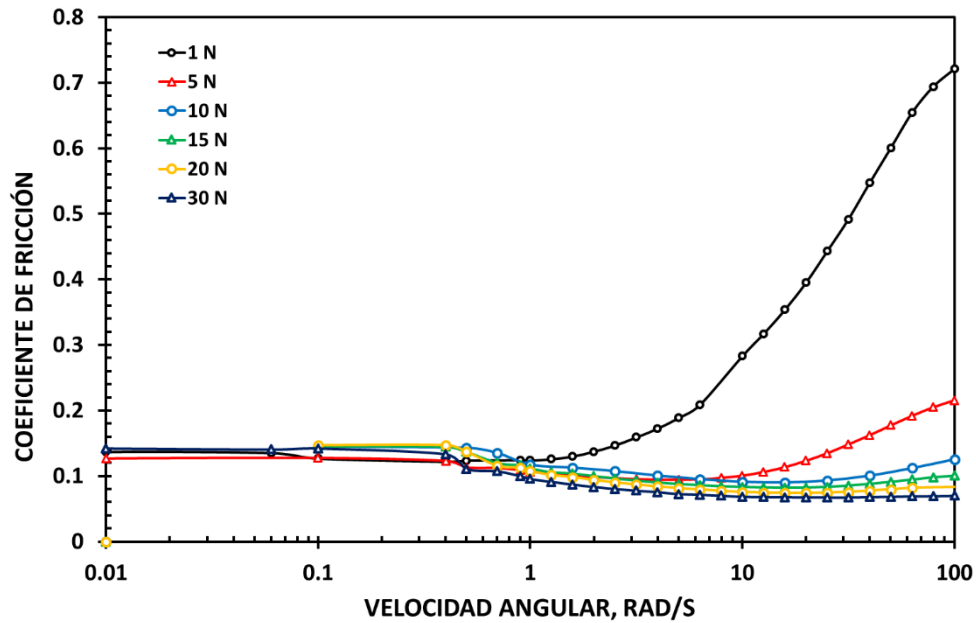


Fig. 5.14 Coeficientes de fricción del sistema PEEK HPV/Ac. Inox. con lubricante SAE 25W-50, condiciones: 1, 5, 10, 15, 20, 30 N y 0.001-100 RAD/S.

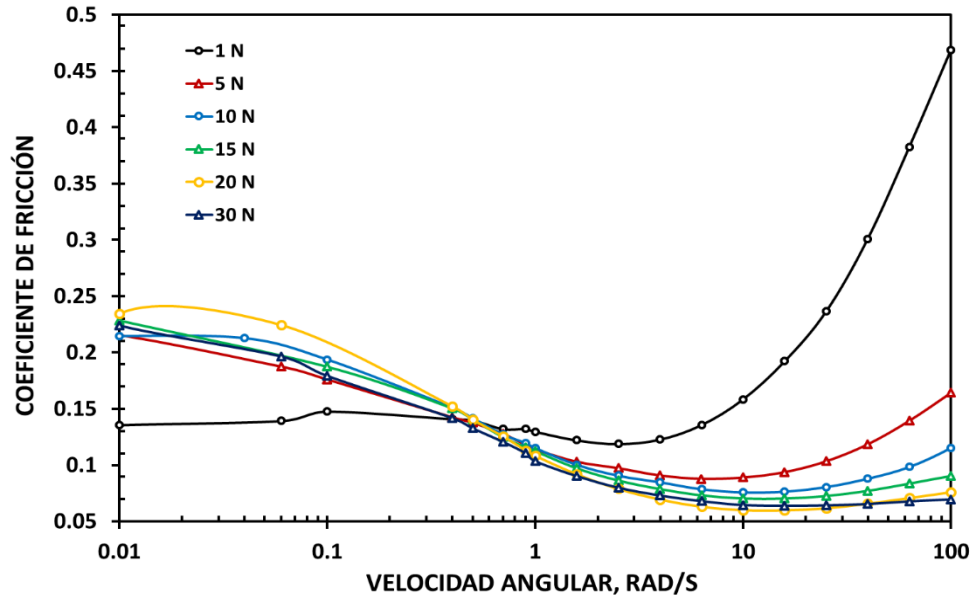


Fig. 5.15 Coeficientes de fricción del sistema PEEK HPV/Ac. Inox. con lubricante  $[BMIM^+][BF_4^-]$ , condiciones: 1, 5, 10, 15, 20, 30 N y 0.001-100 RAD/S.

Este efecto puede asociarse al comportamiento viscoso de los lubricantes que bajo las condiciones de operación aplicadas presentan viscosidades muy similares en todos los regímenes de lubricación, no obstante que la naturaleza de cada lubricante es diferente. Dicho comportamiento puede observarse en la figura 5.16 para la carga de 30 N e intervalo de velocidades angulares de 0-100 RAD/S.

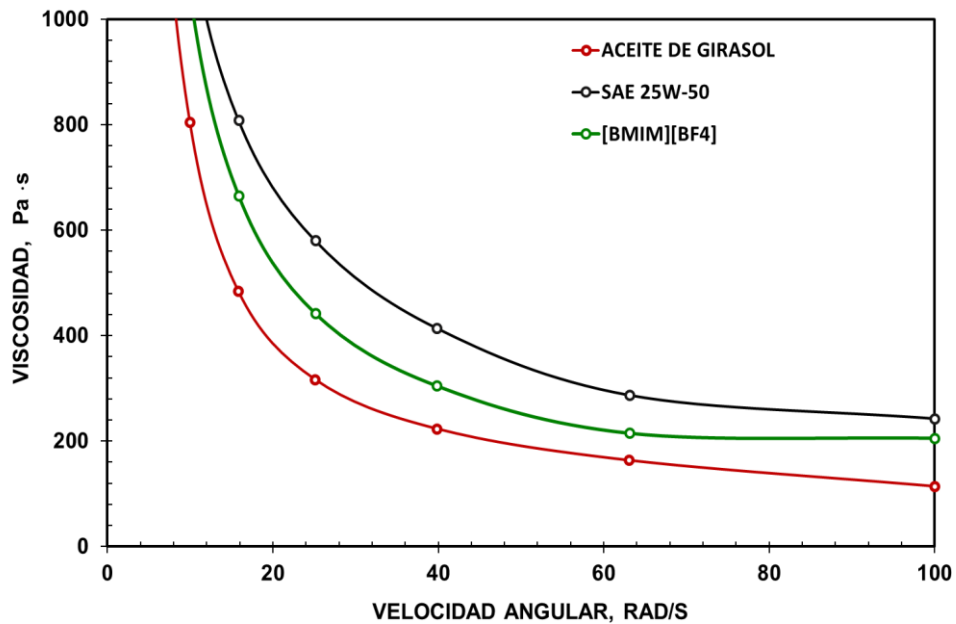


Fig. 5.16. Viscosidades de cada lubricante alcanzadas durante el contacto tribológico del sistema PEEK / Ac. Inox. (Condiciones: 30 N y 0.001-100 RAD/S).

Si se comparan los resultados tribológicos obtenidos para el sistema PEEK/Acero inoxidable con respecto a los reportados en algunos estudios a temperatura ambiente donde se han utilizado aceites vegetales como lubricantes de sistemas metálicos [144, 286-287], observándose que los CoF obtenidos presentan valores numéricos del mismo orden de magnitud que los hallados en el estado del arte (Tabla 5.5).

Tabla 5.5. Comparación de resultados obtenidos con los del estado del arte.

| Sistema                                                  | Lubricante                                                | Coefficientes de fricción | Condiciones operación             |
|----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|---------------------------|-----------------------------------|
| Aleación Al-7050-T7451/<br>Carburo de Tungsteno<br>[150] | - Aceite de jatropha                                      | 0.0946                    | 2 Kg<br>25°C                      |
|                                                          | - Aceite de tung                                          | 0.1086                    | 522 RPM                           |
| AISI 52100 steel [295]                                   | Aceite de girasol como aditivo de copolímero EVA (14-29%) | 0.101-0.106               | 3 N, 100 RPM, 25°C                |
| AISI 52100 steel [296]                                   | - Aceite de girasol (75%) + Aceite de mahua (25%).        | 0.030-0.035               | 78-98 N, 25°C                     |
|                                                          | - Aceite de girasol (75%) + Aceite de castor (25%)        | 0.032-0.042               | 200-400 RPM                       |
| PEEK/Acero Inoxidable<br>(resultados de este trabajo)    | Aceite de girasol                                         | 0.06-0.11                 | 5-30 N<br>25°C<br>0.001-100 RAD/S |

#### 5.3.4 Influencia de la viscosidad medida durante el contacto triboreológico

En estos experimentos 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 el comportamiento viscoso del lubricante y el coeficiente de fricción, bajo las condiciones de operación establecidas.

Las Figuras 5.17 y 5.18 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. En estas figuras, se observa la relación entre la viscosidad de los lubricantes y el coeficiente de fricción medido, donde el lubricante vegetal alcanza los valores de viscosidad menores en todo el rango de velocidades angulares aplicado y al mismo tiempo también presenta valores del coeficiente de fricción más pequeños.

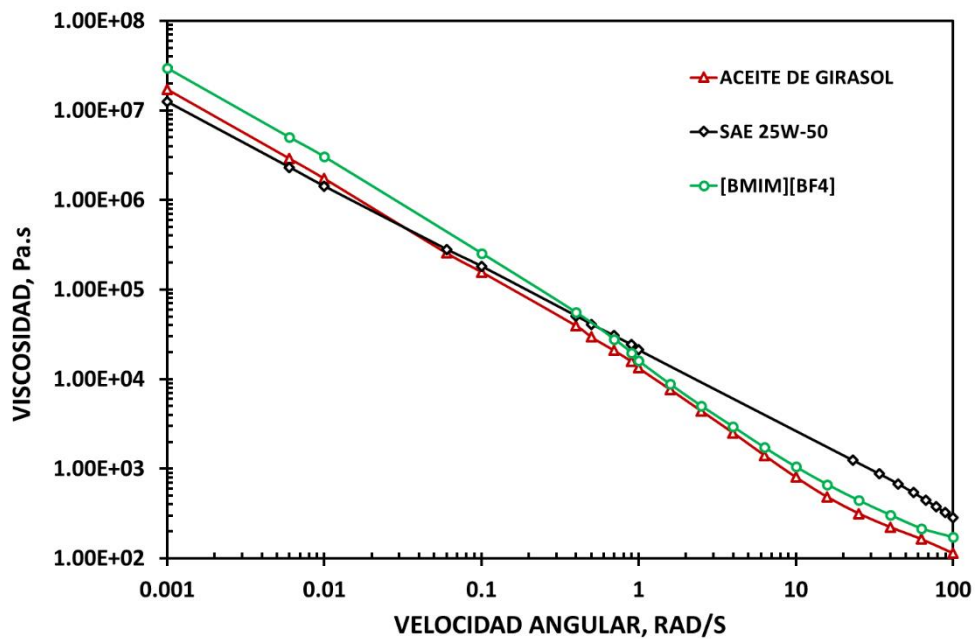


Fig. 5.17. Comportamiento viscoso de los lubricantes (condiciones: 10 N y 0.001-100 RAD/S).

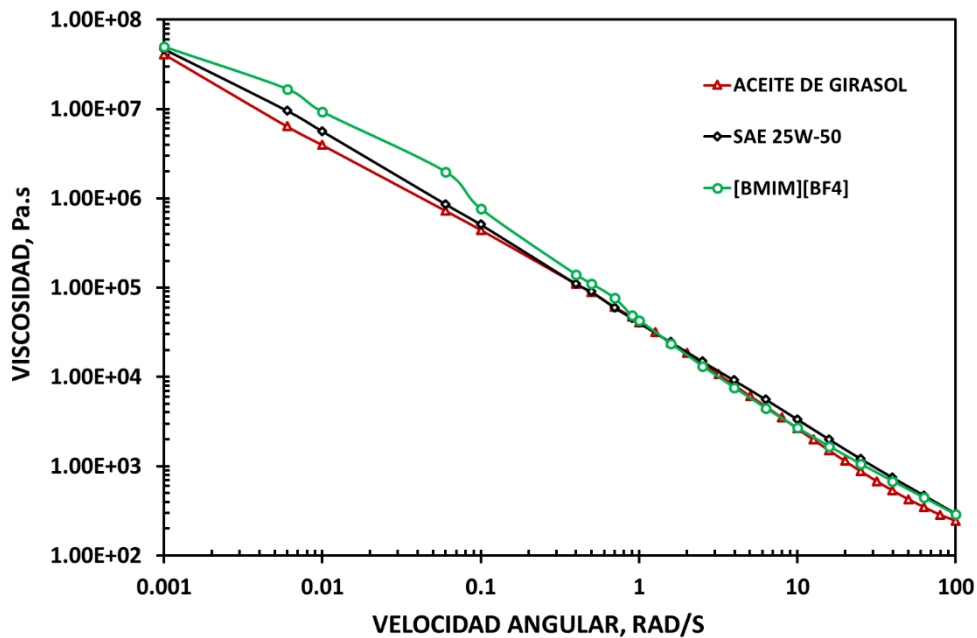


Fig. 5.18. Comportamiento viscoso de los lubricantes (condiciones: 30 N y 0.001-100 RAD/S).

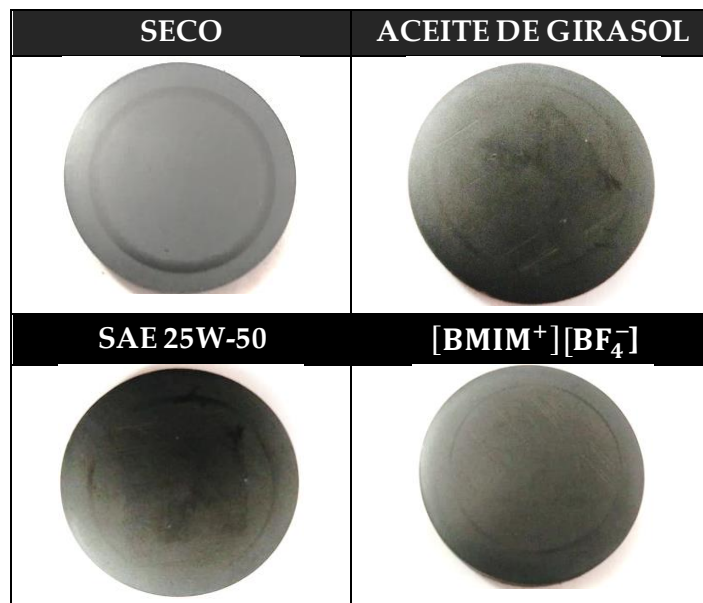


Con respecto a los otros lubricantes de estudio, el aceite comercial SAE 25W-50 muestra valores de viscosidad más bajos que el líquido iónico  $[BMIM^+][BF_4^-]$  a velocidades angulares menores a 1 RAD/S, y a velocidades mayores el comportamiento se invierte ya que el líquido iónico  $[BMIM^+][BF_4^-]$  presenta viscosidades menores que el SAE 25W-50 y mayores a las del aceite de girasol, mostrando una total coincidencia con el comportamiento de fricción observado anteriormente, ya que se a medida que aumenta la carga, las diferencias entre las viscosidades de cada lubricante se reducen de manera significativa y no es posible establecer una relación directa con el coeficiente de fricción para cada lubricante.

#### 5.4. Análisis de superficies

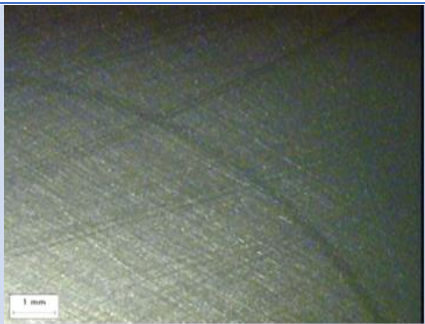
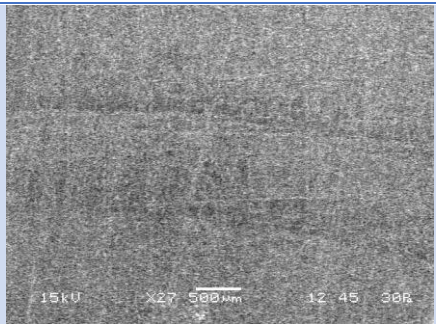
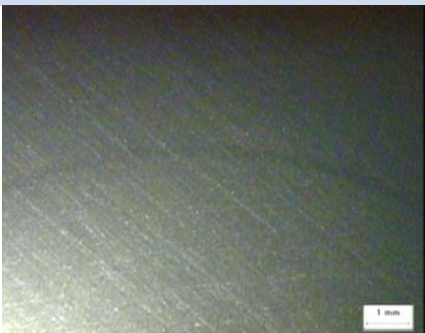
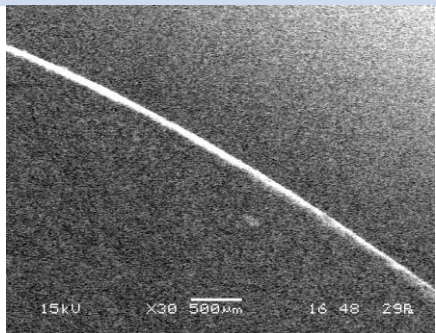

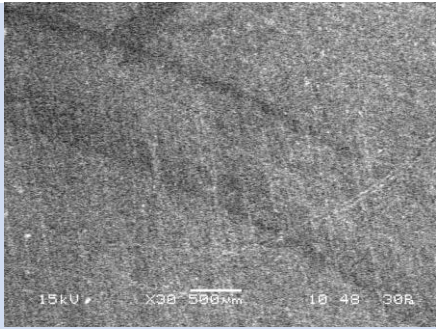
El análisis de superficie de las muestras de PEEK HPV después de los experimentos triboreológicos a través de Microscopía Óptica (MO) y Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) mostró que después de los experimentos triboreológicos los especímenes poliméricos presentaron una marca característica del 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 5.6).

Tabla 5.6. Especímenes de PEEK HPV con las marcas después del contacto Ring on Plate para cada lubricante externo. Microscopía óptica.



En la Tabla 5.7, es posible observar las micrografías de SEM con electrones secundarios correspondientes a las muestras de PEEK HPV después del contacto tribológico. Las imágenes muestran una marca más ancha y oscura en la muestra que se utilizó bajo lubricación seca, lo que representa un mayor desgaste. Las muestras obtenidas con lubricación líquida presentan una marca que es muy similar para los tres tipos de lubricante. Con respecto a las micrografías obtenidas con SEM a 30 aumentos (30X), se observa una marca típica del desgaste por abrasión para cada uno de los lubricantes de estudio.

Tabla 5.7. Marcas PEEK después de la prueba por MO y SEM.

| Lubricante                                          | Microscopía óptica                                                                  | SEM                                                                                  |
|-----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Aceite de Girasol                                   |   |   |
| SAE 25W-50                                          |  |  |
| [BMIM <sup>+</sup> ][BF <sub>4</sub> <sup>-</sup> ] |  |  |

En la figura 5.19, se muestra un análisis SEM con electrones retrodispersados a 100X y 500X de la muestra de PEEK HPV que fue lubricada con aceite de girasol a 30 N. Esta imagen muestra un enfoque más cercano en el área de contacto tribológico, mostrando de una manera más evidente el desgaste por abrasión derivado del contacto ROP. Por otro lado, el análisis de composición por rayos X dispersivos de energía (EDX) (Fig. 5.20) permite identificar los elementos carbono, oxígeno y flúor, correspondientes a los elementos típicos que constituyen los compuestos de materiales poliméricos, es decir, fibra de carbono, grafito, PEEK y PTFE. Este análisis no se encontró evidencia que pudiera indicar la ocurrencia de una reacción química.

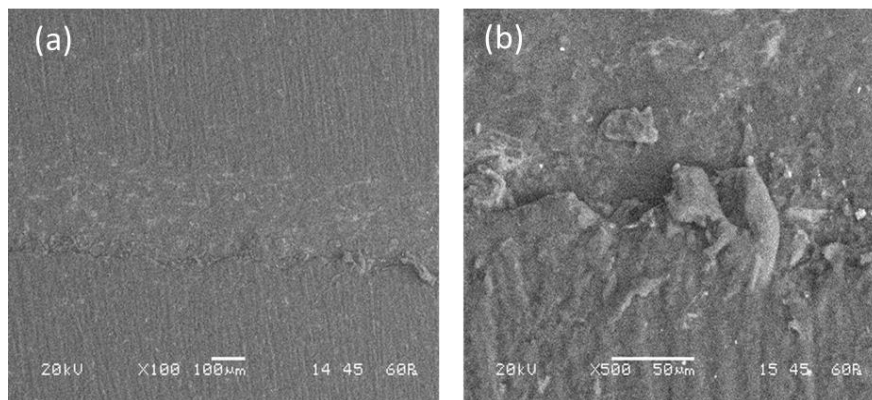


Fig. 5.19. Análisis SEM para la muestra lubricada con aceite de girasol a 30 N. Magnificación: a) 100X y b) 500X.

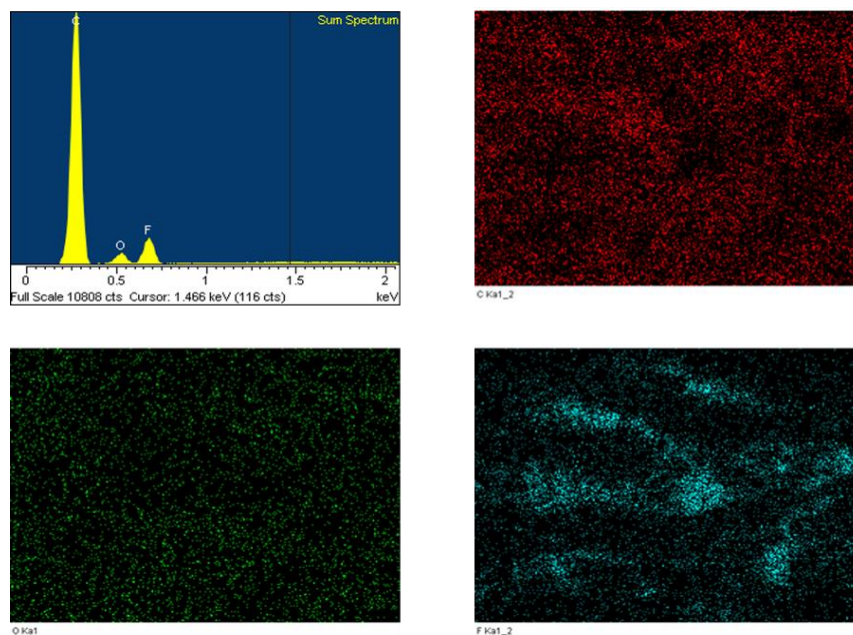


Fig. 5.20. Análisis por Energía de Dispersión de Rayos X (EDX) de la muestra lubricada con aceite de girasol a 30 N. Magnificación: 1000X. 10µm

## CONCLUSIONES

En este trabajo se investigó el comportamiento tribológico del sistema PEEK HPV/Acero Inoxidable, utilizando tres lubricantes de diferente naturaleza. Las pruebas se realizaron utilizando un triboreómetro híbrido DHR-3 y una configuración del sistema anillo en disco (ROP), variando la velocidad angular en el rango de 0.001-10 RAD/S. La carga normal aplicada se estableció entre 1 N y 30 N. Los hallazgos encontrados a partir de los resultados del experimento fueron:

- El aceite de girasol exhibió el mejor comportamiento tribológico debido a que se cuantificaron CoF más bajos con respecto a los otros lubricantes seleccionados, uno de origen mineral y otro con estructura iónica. El líquido iónico  $[\text{BMIM}^+][\text{BF}_4^-]$  exhibió los CoF más altos a velocidades menores a 1 RAD/S, no obstante, a velocidades mayores este comportamiento se invierte, es decir, el  $[\text{BMIM}^+][\text{BF}_4^-]$  tiene CoF cercanos a los del aceite de girasol y ambos menores que los correspondientes al lubricante comercial SAE 25W-50. El líquido iónico  $[\text{MTOA}^+][\text{NTF}_2^-]$  presentó coeficientes de fricción significativamente más altos que los otros lubricantes seleccionados para el estudio por lo que no se consideró para estudios posteriores.
- El comportamiento de fricción del aceite de girasol se debe a la acción de los ácidos grasos insaturados que indican una formación de biopelícula más estable y con menor resistencia al movimiento entre pares tribológicos. La alta concentración de ácido graso oleico (C18:1) y ácido graso linoleico (C18:2) presente en el aceite de girasol proporciona una película lubricante con menor resistencia al movimiento, favoreciendo un bajo CoF en comparación con el aceite 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.
- Comparando los valores obtenidos de CoF para el sistema PEEK HPV/Aceite de girasol/Acero inoxidable con algunos obtenidos en el estado del arte, se encontró que están dentro de los rangos observados para sistemas Metal/Lubricante vegetal/Metal, ya sea como lubricante puro o mezclas, lo cual representa una línea de investigación importante en un futuro inmediato.

## PERSPECTIVAS

El trabajo realizado en esta investigación se realizó a temperatura ambiente, dado que hay numerosos casos donde los procesos se llevan a cabo bajo estas condiciones, no obstante, hay muchas otras situaciones donde las temperaturas de operación son elevadas. A futuro es muy conveniente investigar el comportamiento triboreológico de este sistema en un amplio rango de temperaturas.

De la misma forma, es recomendable examinar el comportamiento triboreológico del sistema propuesto bajo condiciones de carga más elevadas, dadas las características sobresalientes de los polímeros de alto rendimiento como el PEEK HPV que puede soportar cargas muy elevadas.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Sloman, E. (2002). Lubrication. *Plant Engineer's Reference Book*, 40-46.
2. Alcántara, G. (2009). Optimización del tratamiento térmico aplicado a la aleación SAE-788. Tesis de licenciatura. UNAM, México, D.F.
3. Mang, T, and Dresel, W. (2001). Lubricants and lubrication. Germany.
4. Bernard, J. H., Steven, R. S. and Bo, O. J. (2004). *Fundamentals of Fluid Film Lubrication*, second edition, Marcel Dekker Inc.
5. Cosmin. Mixed Lubricated Line Contacts. PhD thesis, University of Twente, Enschede, The Netherlands, Noviembre 2005.
6. Krzan B, Vizintin J. (2003). Tribological properties of environmentally adapted universal tractor transmission oil based on plant oil. *Tribology International*; 36:827–833.
7. Willing, A. (2001). Lubricants based on renewable resources – an environmentally compatible alternative to mineral oil products. *Chemosphere*, 43(1), 89–98. doi:10.1016/s0045-6535(00)00328-3
8. Nagendramma, P., & Kaul, S. (2012). Development of ecofriendly/biodegradable lubricants: An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 764–774. doi: 10.1016/j.rser.2011.09.002
9. Grand View Research (2018). Lubricants market size, share and trends analysis report by application (industrial, automotive, marine, aerospace), by region (North America, Europe, APAC, CSA, MEA), competitive landscape, and segment forecast, 2018–2025. Report ID: 978-1-68038-123-8. Accessed 7 de septiembre 2019.
10. Pusavec, F., Krajnik, P., & Kopac, J. (2010). Transitioning to sustainable production – Part I: application on machining technologies. *Journal of Cleaner Production*, 18(2), 174–184. doi: 10.1016/j.jclepro.2009.08.010
11. Bart, J.C.J., Gucciardi, E., Cavallaro, S., (2013a). 1 - Renewable lubricants, Biolubricants. Woodhead Publishing, pp. 1-9.
12. Mobarak, H. M., Niza Mohamad, E., Masjuki, H. H., Kalam, M. A., Al Mahmud, K. A. H., Habibullah, M., & Ashraful, A. M. (2014). The prospects of biolubricants as alternatives in automotive applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 33, 34–43. doi: 10.1016/j.rser.2014.01.062
13. Gerbig, Y., Ahmed, S. I.-U., Gerbig, F. A., & Haefke, H. (2004). Suitability of vegetable oils as industrial lubricants. *Journal of Synthetic Lubrication*, 21(3), 177–191. doi:10.1002/jsl.3000210302
14. Masjuki, H., Maleque, M., Kubo, A. & Nonaka, T. (1999). Palm oil and mineral oil based lubricants—their tribological and emission performance. *Tribology International*, 32(6), 305–314. doi:10.1016/s0301-679x(99)00052-3
15. Fox, N. J., & Stachowiak, G. W. (2007). Vegetable oil-based lubricants—A review of oxidation. *Tribology International*, 40(7), 1035–1046. doi: 10.1016/j.triboint.2006.10.001



16. Pop, L., Puscas, C., Bandur, G., Vlase, G. and Nutiu, R. (2008). Base stock oils for lubricants from mixtures of corn oil and synthetic diesters. *Journal of the American Oil Chemists' Society*. 85(1):71–76.
17. Golshokouh, I., Syahrullail, S., Golshokouh, M. (2014). Tribology Evaluation of *Jatropha* as a New Environmental Source of Lubricant. *European Online Journal of Natural and Social Sciences* 3, 343.
18. Ssempebwa, J. C., & Carpenter, D. O. (2009). The generation, use and disposal of waste crankcase oil in developing countries: A case for Kampala district, Uganda. *Journal of Hazardous Materials*, 161(2-3), 835–841. doi:10.1016/j.jhazmat.2008.04.028
19. Hansen, J.-P., & McDonald, I. R. (2006). Ionic Liquids. *Theory of Simple Liquids*, 291–340.
20. Amiril, S. A. S., Rahim, E. A., & Syahrullail, S. (2017). A review on ionic liquids as sustainable lubricants in manufacturing and engineering: Recent research, performance, and applications. *Journal of Cleaner Production*, 168, 1571–1589. doi:10.1016/j.jclepro.2017.03.197
21. Anand, M., Hadfield, M., Viesca, J. L., Thomas, B., Hernández Battez, A., & Austen, S. (2015). Ionic liquids as tribological performance improving additive for in-service and used fully-formulated diesel engine lubricants. *Wear*, 334-335, 67–74. doi:10.1016/j.wear.2015.01.055
22. Qu, J., Truhan, J. J., Dai, S., Luo, H., & Blau, P. J. (2006). Ionic liquids with ammonium cations as lubricants or additives. *Tribology Letters*, 22(3), 207–214. doi:10.1007/s11249-006-9081-0
23. Barnhill, W. C., Qu, J., Luo, H., Meyer, H. M., Ma, C., Chi, M., & Papke, B. L. (2014). Phosphonium-Organophosphate Ionic Liquids as Lubricant Additives: Effects of Cation Structure on Physicochemical and Tribological Characteristics. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 6(24), 22585–22593. doi:10.1021/am506702u
24. Chen, Y. M., Zeng, Z. X., Yang, S. R., & Zhang, J. Y. (2009). The tribological performance of BCN films under ionic liquids lubrication. *Diamond and Related Materials*, 18(1), 20–26. doi:10.1016/j.diamond.2008.07.023
25. Dowson D. (1998). *History of Tribology*, 2nd Edition. Professional Engineering Publishing.
26. Mora, J. (2012). *Caracterización tribológica del par bronce-acero en un contacto anillo-bloque*. Tesis de licenciatura. Universidad Veracruzana. Xalapa, Ver.
27. Zygyt, H. (1993). *Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica*, pp. 303-304.
28. Buckley, D. (1970). *Surface Effects in Adhesion, Friction, Wear and Lubrication*. Amsterdam: Elsevier.
29. Martínez, F. (2002). *La Tribología: Ciencia y técnica para el mantenimiento*. México, D.F.: Limusa.
30. Batchelor, A. W., Stachowiak, G. W. (1995). Revealing the hidden world of wear and friction. *Mechanical Engineering Transactions, Journal of the Inst. of Engineers*, 20(1): 5–13

31. Tower, B. (1983). First report on friction experiments. In Proc Inst Mech Eng, 632–669.
32. Gross, W.A., Matsch, L.A., Castelli, V., Eshel, A., Vohr, J.H., and Wildmann, M. Fluid film lubrication. United States: N. p., 1980. Web.
33. Burstein, L. (2011). Lubrication and roughness. Tribology for Engineers, 65–120.
34. Gonzalez, F. (2012). Teoría y práctica del Mantenimiento industrial avanzado. Madrid, España. FC editorial.
35. Cameron A, Gohar R. (1966). Theoretical and experimental studies of the oil film in lubricated point contacts. Proc Roy Soc London Series A 291: 520–536.
36. Stachowiak, G. W., Batchelor, A. W. (2013). Engineering Tribology (Fourth Edition). Elsevier-Butterworth-Heinemann.
37. Stachowiak, G. W. (2005). Tribology research and enterprise in Australia. In World Tribology Congress, New Generation Tribology for Achieving a Sustainable Society. Japanese Society of Tribologists, 4–7.
38. Hutchings I.M. (1992). Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials, London, Edward Arnold, 58-76.
39. Macosko, C. (1994). Rheology: Principles and Measurements. Cap. 1 a 3, VCH Publishers, Inc., New York,
40. Barnes, H.A.; Hutton, J.F.; Walters, K. (1989). An Introduction to Rheology. Elsevier, Amsterdam.
41. Bowden F P, Tabor D. (1950). The Friction and Lubrication of Solids, Part 1. Oxford: Clarendon Press.
42. Bird B., Warren S., y Lightfoot E. (1994). Fenómenos de transporte. Ed. Reverté, España.
43. Meriam, James L.; Kraige, L. Glenn; Palm, William John (2002). Engineering Mechanics: Statics. Wiley and Sons.
44. Koji K., Koshi A., Modern Tribology Handbook Vol. 1 (2001), Chapter 7 “Wear Mechanisms”.
45. Gong, W., Chen, Y., Li, M., & Kang, R. (2019). Adhesion-fatigue dual mode wear model for fractal surfaces in AISI 1045 cylinder-plane contact pairs. Wear. doi:10.1016/j.wear.2019.05.008
46. Rabinowicz, E. (1980). An adhesive wear model based on variations in strength values. Wear, 63(1), 175–181. doi:10.1016/0043-1648(80)90085-x
47. Aghababaei, R., Warner, D. H., & Molinari, J.-F. (2016). Critical length scale controls adhesive wear mechanisms. Nature Communications, 7, 11816. doi:10.1038/ncomms11816
48. Al-Sarraf, A. H. R. M. (2019). Study on adhesion wear damage done on the hybrid composite Novolac under the experimental variables. Energy Procedia, 157, 644–654. doi:10.1016/j.egypro.2018.11.230
49. Sep, J., Tomczewski, L., Galda, L., & Dzierwa, A. (2017). The study on abrasive wear of grooved journal bearings. Wear, 376-377, 54–62. doi:10.1016/j.wear.2017.02.034



50. Williams, J. A., & Hyncica, A. M. (1992). Mechanisms of abrasive wear in lubricated contacts. *Wear*, 152(1), 57–74. doi:10.1016/0043-1648(92)90204-1
51. Sep, J., Pawlus, P., & Dzierwa, A. (2012). The Analysis of Abrasive Wear of the Helical Grooved Journal Bearing. *Key Engineering Materials*, 527, 173–178. doi:10.4028/www.scientific.net/kem.527.173
52. Konyashin, I., Antonov, M., & Ries, B. (2020). Wear behaviour and wear mechanisms of different hardmetal grades in comparison with polycrystalline diamond in a new impact-abrasion test. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 105286. doi:10.1016/j.ijrmhm.2020.105286
53. Okamoto, Y. (2000). A study for wear and fatigue on engine bearings by using EHL analysis. *JSAE Review*, 21(2), 189–196. doi:10.1016/s0389-4304(99)00092-2
54. Oh, K. P., & Goenka, P. K. (1985). The Elastohydrodynamic Solution of Journal Bearings Under Dynamic Loading. *Journal of Tribology*, 107(3), 389. doi:10.1115/1.3261088
55. El Laithy, M., Wang, L., Harvey, T. J., Vierneusel, B., Correns, M., & Blass, T. (2019). Further understanding of rolling contact fatigue in rolling element bearings - A review. *Tribology International*, 105849. doi:10.1016/j.triboint.2019.105849
56. Zhang, S., Sun, Z., & Guo, F. (2021). Investigation on wear and contact fatigue of involute modified gears under minimum quantity lubrication. *Wear*, 484–485, 204043. doi:10.1016/j.wear.2021.204043
57. Zeidi, A., Ben Saada, F., Elleuch, K., & Atapek, H. (2021). AISI D2 punch head damage: Fatigue and wear mechanism. *Engineering Failure Analysis*, 129, 105676. doi:10.1016/j.engfailanal.2021.105676
58. Balducci, E., Ceschini, L., Rojo, N., Cavina, N., Cevolani, R., & Barichello, M. (2018). Knock induced erosion on Al pistons: Examination of damage morphology and its causes. *Engineering Failure Analysis*, 92, 12–31. doi:10.1016/j.engfailanal.2018.05.002
59. Dorkar, N. V., Kim, Y.-W., & Kumar, B. V. M. (2020). Influence of temperature, impact angle and h-BN content on the erosive wear behavior of hot-pressed SiC-BN composites. *Wear*, 203447. doi:10.1016/j.wear.2020.203447
60. Ritapure, P. P., & Kharde, Y. R. (2020). Study of Mechanical properties and erosion wear behaviour of novel Al-25Zn alloy/SiC/Graphite hybrid composites. *Materials Today: Proceedings*, 22, 2215–2224. doi:10.1016/j.matpr.2020.03.302
61. Lu, H., Li, Y., Li, F., Li, J., Wang, L., Ran, X., ... Kong, L. (2021). Erosion wear behavior of NiCr+Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr coating under multi-impact angle and novel coating structure design. *Journal of Materials Research and Technology*, 14, 3123–3133. doi:10.1016/j.jmrt.2021.08.136
62. Wang, J., Li, W., Lan, C., Wei, P., & Luo, W. (2020). Electromechanical impedance instrumented piezoelectric ring for pipe corrosion and bearing wear monitoring: A proof-of-concept study. *Sensors and Actuators A: Physical*, 315, 112276. doi:10.1016/j.sna.2020.112276

63. Sun, J., Wood, R. J. K., Wang, L., Care, I., & Powrie, H. E. G. (2005). Wear monitoring of bearing steel using electrostatic and acoustic emission techniques. *Wear*, 259(7-12), 1482–1489. doi:10.1016/j.wear.2005.02.021
64. Alaneme, K. K., & Odoni, B. U. (2016). Mechanical properties, wear and corrosion behavior of copper matrix composites reinforced with steel machining chips. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 19(3), 1593–1599. doi:10.1016/j.jestch.2016.04.006
65. Maher, M., Iraola-Arregui, I., Ben Youcef, H., Rhouta, B., & Trabadelo, V. (2021). The synergistic effect of wear-corrosion in stainless steels: A review. *Materials Today: Proceedings*. doi:10.1016/j.matpr.2021.05.010
66. Hsu, S. M., Zhang, J., Yin, Z. (2002). The nature and origin of tribochemistry. *Tribology Letters* 13(2): 131–139.
67. Domínguez, E. (2003). Obtención del coeficiente de fricción mediante pruebas mecánicas. [Tesis de Maestría]. UANL.
68. Fuchs, M. The world lubricants market, current situation and outlook. In: 12th international colloquium on tribology. 2000.
69. Zhang, X., Luster, B., Church, A., Muratore, C., Voevodin, A. A., Kohli, P., Talapatra, S. (2009). Carbon Nanotube–MoS<sub>2</sub> Composites as Solid Lubricants. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 1(3), 735–739. doi:10.1021/am800240e
70. Marx, N., Guegan, J., & Spikes, H. A. (2016). Elastohydrodynamic film thickness of soft EHL contacts using optical interferometry. *Tribology International*, 99, 267–277. doi:10.1016/j.triboint.2016.03.020
71. B. Jacobson. (2003). The Stribeck memorial lecture. *Tribology International*.
72. Williams, G. (1982). A practical guide to lubricant selection. *Tribology International*, 15(6), 369. doi:10.1016/0301-679x(82)90148-7.
73. TA Instruments (2016, 6 de enero). An Introduction to Tribo-Rheometry: Quantifying Friction. [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=lobBbcfC8A4>
74. Cai, M., Yu, Q., Zhou, F., & Liu, W. (2017). Physicochemistry aspects on frictional interfaces. *Friction*, 5(4), 361–382. doi:10.1007/s40544-017-0191-5
75. Erdemir, A. (2005). Review of engineered tribological interfaces for improved boundary lubrication. *Tribology International*, 38(3), 249–256. doi:10.1016/j.triboint.2004.08.008
76. W.E. Campbell, “Boundary Lubrication, an Appraisal of World Literature”, ASME, 1969, pp. 87-117.
77. Bair, S., & Qureshi, F. (2003). The Generalized Newtonian Fluid Model and Elastohydrodynamic Film Thickness. *Journal of Tribology*, 125(1), 70. doi:10.1115/1.1504086
78. Höglund, E. (1999). Influence of lubricant properties on elastohydrodynamic lubrication. *Wear*, 232(2), 176–184. doi:10.1016/s0043-1648(99)00143-x

79. Chacón, E., De la Guerra, E., Díaz, A., Muñoz, J., Echávarri, J., Lafont, P. and J. L. Muñoz J. (2015). Analytical model for predicting the friction coefficient in line contacts with thermal elastohydrodynamic lubrication.
80. Rong-Tsong, L., & Chao-Ho, H. (1993). A fast method for the analysis of thermal-elastohydrodynamic lubrication of rolling/sliding line contacts. *Wear*, 166(1), 107–117. doi:10.1016/0043-1648(93)90285-t
81. Ettles, C. M. M., Akkok, M., & Cameron, A. (1980). Inverse Hydrodynamic Methods Applied to Mr. Beauchamp Tower's Experiments of 1885. *Journal of Lubrication Technology*, 102(2), 172. doi:10.1115/1.3251462
82. Grubin A N. (1949). Fundamentals of the hydrodynamic theory of lubrication of heavily loaded cylindrical surfaces. In *Investigation of the Contact Machine Components*. Ketova K F, ed. Translation of Russian Book No. 30, Central Scientific Institute for Technology and Mechanical Engineering, Moscow.
83. Castillo Rodríguez F. (2007). *Tribología: fricción, desgaste y lubricación*. Departamento de Ingeniería, Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, UNAM., México.
84. Linares O. Omar, (2005). *Generalidades de la Tribología: Fundamentos de la Lubricación, Fricción y el Desgaste*. ASME, Santa Cruz, Bolivia
85. Schouwenaars, R. (2004). Tesis Doctoral: "Análisis de la deformación plástica durante el desgaste de cojinetes de deslizamiento", Facultad de Ingeniería, UNAM. México, D.F.
86. Stolarski T. A. "Tribology in Machine Design". Butterworth-Heinemann, London, ©Stolarski 1990.
87. Panchez, M. (2005). Evaluación Triboenergética de los Molinos MT 30000 y MT 34000 de la Empresa Ecuatoriana de Cerámica, Tesis de grado, Riobamba, Ecuador.
88. Bhan, U., Singh, D. and Ranganathan, A. (2020). Effect of different loads on the friction and wear characteristics of material lubricated with neem oil, *Materials Today: Proceedings*, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.378>
89. Singh, Y., Pandey, A. K., Singh, N. K., Sharma, A., & Farooq, A. (2017). Sustainability of polanga oil based blended lubricant at different load and sliding distance. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 39(19), 1970–1977. doi:10.1080/15567036.2017.1393473
90. Singh, Y., Singla, A., & Bhurat, S. (2016). Tribological behavior of pongamia oil-based biodiesel blended lubricant at different loads. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 38(19), 2876–2882. doi:10.1080/15567036.2015.1120821
91. Alexandre R.C. Nascimento, A., Chromik, R., Schulz, R. (2021). Mechanical properties and wear resistance of industrial bearing liners in concentrated boundary-lubricated sliding. *Wear* <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203806>
92. Palanikumar, P., Gnanasekaran, N., Subrahmanya, K., Kaliveeran, V. (2020). Effect of sliding speed and rise in temperature at the contact interface on coefficient of

- friction during full sliding of SS304, *Materials Today: Proceedings*, 27(3): 1996-1999. doi:10.1016/j.matpr.2019.09.046
93. Stembalski, M., Preś, P., & Skoczyński, W. (2013). Determination of the friction coefficient as a function of sliding speed and normal pressure for steel C45 and steel 40HM. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 13(4), 444–448. doi:10.1016/j.acme.2013.04.010
  94. Al Mahmud, K. A. H., Varman, M., Kalam, M. A., Masjuki, H. H., Mobarak, H. M., & Zulkifli, N. W. M. (2014). Tribological characteristics of amorphous hydrogenated (a-C:H) and tetrahedral (ta-C) diamond-like carbon coating at different test temperatures in the presence of commercial lubricating oil. *Surface and Coatings Technology*, 245, 133–147. doi:10.1016/j.surfcoat.2014.02.052
  95. Mobarak, H. M., Masjuki, H. H., Mohamad, E. N., Kalam, M. A., Rashedul, H. K., Rashed, M. M., & Habibullah, M. (2014). Tribological properties of amorphous hydrogenated (a-C:H) and hydrogen-free tetrahedral (ta-C) diamond-like carbon coatings under jatropha biodegradable lubricating oil at different temperatures. *Applied Surface Science*, 317, 581–592. doi:10.1016/j.apsusc.2014.08.168
  96. Qiren Huang, Zhiwei Guo, Zumin Wu, Chengqing Yuan (2021). Insight into the tribological performance of polyurethane composites under high temperature water lubrication. *Tribology International*, 155. doi:10.1016/j.triboint.2020.106784
  97. Bahadur, S., & Gong, D. (1992). The action of fillers in the modification of the tribological behavior of polymers. *Wear*, 158(1-2), 41–59. doi:10.1016/0043-1648(92)90029-8
  98. Friedrich, K., Zhang, Z., & Schlarb, A. (2005). Effects of various fillers on the sliding wear of polymer composites. *Composites Science and Technology*, 65(15-16), 2329–2343. doi:10.1016/j.compscitech.2005.05.028
  99. Bijwe, J., Sen, S., & Ghosh, A. (2005). Influence of PTFE content in PEEK–PTFE blends on mechanical properties and tribo-performance in various wear modes. *Wear*, 258(10), 1536–1542. doi:10.1016/j.wear.2004.10.008
  100. Wong, K. C., Lu, X., Cotter, J., Eadie, D. T., Wong, P. C., & Mitchell, K. A. R. (2008). Surface and friction characterization of MoS<sub>2</sub> and WS<sub>2</sub> third body thin films under simulated wheel/rail rolling–sliding contact. *Wear*, 264(7-8), 526–534. doi:10.1016/j.wear.2007.04.004
  101. Pop, E., Varshney, V., & Roy, A. K. (2012). Thermal properties of graphene: Fundamentals and applications. *MRS Bulletin*, 37(12), 1273–1281. doi:10.1557/mrs.2012.203
  102. S. Sen, (2000) Morphological and tribological studies of PEEK–PTFE blends, M.Tech. Thesis, Indian Institute of Technology, Delhi.
  103. Jafari, A. J., & Hassanpour, M. (2015). Analysis and comparison of used lubricants, regenerative technologies in the world. *Resources, Conservation and Recycling*, 103, 179–191. doi:10.1016/j.resconrec.2015.07.026

104. El-Fadel, M., & Khoury, R. (2002). Strategies for vehicle waste-oil management: a case study. *Fuel and Energy Abstracts*, 43(4), 296. doi:10.1016/s0140-6701(02)86567-5
105. Liu, Q., Yang, Y., Huang, M., Zhou, Y., Liu, Y., & Liang, X. (2015). Durability of a lubricant-infused Electrospray Silicon Rubber surface as an anti-icing coating. *Applied Surface Science*, 346, 68–76. doi:10.1016/j.apsusc.2015.02.051
106. Wang, M., Miyake, S., & Matsunuma, S. (2005). Nanowear studies of PFPE lubricant on magnetic perpendicular recording DLC-film-coated disk by lateral oscillation test. *Wear*, 259(7-12), 1332–1342. doi:10.1016/j.wear.2005.03.026
107. D'Agostino, V., Niola, V., & Caporiccio, G. (1988). Tribological behaviour of sintered iron bearings self-lubricated with PFPE under severe operating conditions. *Tribology International*, 21(2), 105–108. doi:10.1016/0301-679x(88)90082-5
108. Sharma, S. K., Vasudevan, P., & Tewari, U. S. (1983). High temperature lubricants — oils and greases. *Tribology International*, 16(4), 213–219. doi:10.1016/0301-679x(83)90072-5
109. Wypych, G. (2012). PFPE perfluoropolyether. *Handbook of Polymers*, 404–406. doi:10.1016/b978-1-895198-47-8.50121-1
110. Denault J. and Dumouchel, M. (1998). Consolidation Process of PEEK/Carbon Composite for Aerospace Applications. *Advanced Performance Materials*, 5(1), 83–96. <https://doi.org/10.1023/A:1008638105370>
111. 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
112. Chauvin, Y., & Olivier-Bourbigou, H. (1995). Nonaqueous ionic liquids as reaction solvents. *Chem. Tech.*, 25, 26-30.
113. Holbrey, J., Seddon, K. (1999). Ionic Liquids. *Clean Products and Processes* 1, 223–236 (1999). <https://doi.org/10.1007/s100980050036>
114. Dupont, J. (2005). The Solid, Liquid and Solution Structural Organization of Imidazolium Ionic Liquids. *ChemInform*, 36(26). doi:10.1002/chin.200526205
115. Padua, A.A.H.; Canongia Lopes, J.N.A. (2007). Intra- and intermolecular structure of ionic liquids: from conformers to nanostructures. In *Ionic Liquids IV. Not Just Solvents Anymore*. Washington, D.C.: American Chemical Society.
116. Consorti, C. S., Suarez, P. A. Z., de Souza, R. F., Burrow, R. A., Farrar, D. H., Lough, A. J., Dupont, J. (2005). Identification of 1,3-Dialkylimidazolium Salt Supramolecular Aggregates in Solution. *The Journal of Physical Chemistry B*, 109(10), 4341–4349. doi:10.1021/jp0452709
117. Fraser, K. J., & MacFarlane, D. R. (2009). Phosphonium-Based Ionic Liquids: An Overview. *Australian Journal of Chemistry*, 62(4), 309. doi:10.1071/ch08558
118. Bermúdez, M.-D., Jiménez, A.-E., Sanes, J., & Carrión, F.-J. (2009). Ionic Liquids as Advanced Lubricant Fluids. *Molecules*, 14(8), 2888–2908. doi:10.3390/molecules14082888

119. Fukaya, Y., & Ohno, H. (2013). Hydrophobic and polar ionic liquids. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 15(11), 4066. doi:10.1039/c3cp44214d
120. Clare, B., Sirwardana, A., & MacFarlane, D. R. (2009). Synthesis, Purification and Characterization of Ionic Liquids. *Ionic Liquids*, 1–40. doi:10.1007/128\_2008\_31
121. 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.
122. Predel, T., Schlücker, E., Wasserscheid, P., Gerhard, D., & Arlt, W. (2007). Ionic Liquids as Operating Fluids in High Pressure Applications. *Chemical Engineering & Technology*, 30(11), 1475–1480. doi:10.1002/ceat.200700276
123. Keskin, S., Kayrak-Talay, D., Akman, U., & Hortaçsu, Ö. (2007). A review of ionic liquids towards supercritical fluid applications. *The Journal of Supercritical Fluids*, 43(1), 150–180. doi:10.1016/j.supflu.2007.05.013
124. Mu, Z., Liu, W., Zhang, S., & Zhou, F. (2004). Functional Room-Temperature Ionic Liquids as Lubricants for an Aluminum-on-Steel System. *ChemInform*, 35(42). doi:10.1002/chin.200442139
125. Palacio, M., & Bhushan, B. (2010). A Review of Ionic Liquids for Green Molecular Lubrication in Nanotechnology. *Tribology Letters*, 40(2), 247–268. doi:10.1007/s11249-010-9671-8
126. Han, D., & Row, K. H. (2010). Recent Applications of Ionic Liquids in Separation Technology. *Molecules*, 15(4), 2405–2426. doi:10.3390/molecules15042405
127. Wasserscheid, P., Welton, T. (2008). *Ionic liquids in synthesis*, Alemania: Wiley.
128. Romero, A. Líquidos iónicos a temperatura ambiente: Un nuevo medio para las reacciones químicas, *Rev. R. Acad. Cienc. Exact. Fis. Nat.*, volumen 102, No. 1, p. 79-90.
129. 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
130. Cai, M., Liang, Y., Zhou, F., & Liu, W. (2011). Tribological Properties of Novel Imidazolium Ionic Liquids Bearing Benzotriazole Group as the Antiwear/Anticorrosion Additive in Poly(ethylene glycol) and Polyurea Grease for Steel/Steel Contacts. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 3(12), 4580–4592. doi:10.1021/am200826b
131. Kamimura, H., Kubo, T., Minami, I., & Mori, S. (2007). Effect and mechanism of additives for ionic liquids as new lubricants. *Tribology International*. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2005.11.009>
132. 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>

133. Khatri, P. K., Thakre, G. D., & Jain, S. L. (2013). Tribological Performance Evaluation of Task-Specific Ionic Liquids Derived from Amino Acids. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 52(45), 15829–15837. doi:10.1021/ie402141v
134. Liu, X., Zhou, F., Liang, Y., & Liu, W. (2006). Tribological performance of phosphonium based ionic liquids for an aluminum-on-steel system and opinions on lubrication mechanism. *Wear*, 261(10), 1174–1179. doi:10.1016/j.wear.2006.03.018
135. Ye, C., Liu, W., Chen, Y., & Yu, L. (2001). Room-temperature ionic liquids: A novel versatile lubricant. *Chemical Communications*. <https://doi.org/10.1039/b106935g>
136. Reeves, C.J., Menezes, P.L., (2016). *Advancements in Eco-friendly Lubricants for Tribological Applications: Past, Present, and Future*, *Ecotribology*. Springer, 41-61.
137. Arumugam, S., Sriram, G., & Ellappan, R. (2014). Bio-lubricant-biodiesel combination of rapeseed oil: An experimental investigation on engine oil tribology, performance, and emissions of variable compression engine. *Energy*, 72, 618–627. doi:10.1016/j.energy.2014.05.087
138. Bart, J., Gucciardi, E., Cavallaro, S., (2013a). 1 - Renewable lubricants, *Biolubricants*. Woodhead Publishing, pp. 1-9.
139. Mobarak, H. M., Niza Mohamad, E., Masjuki, H. H., Kalam, M. A., Al Mahmud, K. A. H., Habibullah, M., & Ashraful, A. M. (2014). The prospects of biolubricants as alternatives in automotive applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 33, 34–43. doi:10.1016/j.rser.2014.01.062
140. Adhvaryu, A., Erhan, S. ., & Perez, J. (2004). Tribological studies of thermally and chemically modified vegetable oils for use as environmentally friendly lubricants. *Wear*, 257(3-4), 359–367. doi:10.1016/j.wear.2004.01.005
141. Raynor, P.C., Kim, S.W., Bhattacharya, M., (2005). Mist generation from metalworking fluids formulated using vegetable oils. *Annals of Occupational Hygiene*, 49, 283-293.
142. Battersby, N. S. (2000). The biodegradability and microbial toxicity testing of lubricants – some recommendations. *Chemosphere*, 41(7), 1011–1027. doi:10.1016/s0045-6535(99)00517-2
143. Altin, R., Çetinkaya, S., & Yücesu, H. S. (2001). Potential of using vegetable oil fuels as fuel for diesel engines. *Energy Conversion and Management*. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(00\)00080-7](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(00)00080-7)
144. Synthetic oil: Is it right for your plane? *General Aviation News*. Retrieved 2019-03-24.
145. Bahari, A., Lewis, R., & Slatter, T. (2017). Friction and wear response of vegetable oils and their blends with mineral engine oil in a reciprocating sliding contact at severe contact conditions. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 232(3), 244–258. doi:10.1177/1350650117712344
146. Bahari, A., Lewis, R., & Slatter, T. (2017). Friction and Wear Phenomena of Vegetable Oil-Based Lubricants with Additives at Severe Sliding Wear Conditions. *Tribology Transactions*, 61(2), 207–219. doi:10.1080/10402004.2017.1290858

147. Baumgart, P., Canzi, G., Hanashiro, T., Doezema, L. A., & Siniawski, M. T. (2010). Influence of fatty acid additives on the tribological performance of sunflower oil. *Lubrication Science*, 22(9), 393–403. doi:10.1002/lis.134
148. Regueira, T., Lugo, L., Fandiño, O., López, E. R., & Fernández, J. (2011). Compressibilities and viscosities of reference and vegetable oils for their use as hydraulic fluids and lubricants. *Green Chemistry*, 13(5), 1293. doi:10.1039/c0gc00597e
149. Rogoś, E. (2006). Lubricating and physicochemical properties of vegetable oil bases for hydraulic fluids. *Problemy Eksploatacji*, 259-266.
150. Sharma, B. K., Rashid, U., Anwar, F., & Erhan, S. Z. (2009). Lubricant properties of Moringa oil using thermal and tribological techniques. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 96(3), 999–1008. doi:10.1007/s10973-009-0066-8
151. Chanes de Souza, M., Fracaro de Souza Gonçalves, J., Cézar Gonçalves, P., Yuji Sudo Lutif, S., & de Oliveira Gomes, J. (2019). Use of Jatropha and Moringa oils for lubricants: Metalworking fluids more environmental-friendly. *Industrial Crops and Products*, 129, 594–603. doi:10.1016/j.indcrop.2018.12.033
152. Salih, N., Salimon, J., & Yousif, E. (2011). The physicochemical and tribological properties of oleic acid based triester biolubricants. *Industrial Crops and Products*, 34(1), 1089–1096. doi:10.1016/j.indcrop.2011.03.025
153. Salimon, J., Noor, D.A.M., Nazrizawati, A., Firdaus, M.M., Noraishah, A., (2010a). Fatty acid composition and physicochemical properties of Malaysian castor bean *Ricinus communis* L. seed oil. *Sains Malaysiana* 39, 761-764.
154. Reeves, C. J., Menezes, P. L., Jen, T.-C., & Lovell, M. R. (2015). The influence of fatty acids on tribological and thermal properties of natural oils as sustainable biolubricants. *Tribology International*, 90, 123–134. doi:10.1016/j.triboint.2015.04.021
155. Scrimgeour, C., (2005). Chemistry of Fatty Acids, in: Shahidi, F. (Ed.), *Bailey's Industrial Oil and Fat Products*, 6th Edition ed. John Wiley & Sons, Inc.
156. Beltrán Rico, M., Marcilla Gomis, A. (2012) *Tecnología de polímeros. Procesado y propiedades*. Universidad de Alicante: España.
157. T. Hatakeyama y F.X. Quinn. (1994). *Thermal Analysis, Fundamentals and Applications to Polymer Science*, John Wiley and Sons, Chichester.
158. Crawford, R. J. Maxwell. (1989). *Plastics Engineering*. Republic of Singapore: Mc Millan Internacional Editions.
159. John., Troughton, Michael (2008). *Handbook of plastics joining: a practical guide* (2nd ed). William Andrew.
160. Lim, L.-T., Auras, R., & Rubino, M. (2008). Processing technologies for poly(lactic acid). *Progress in Polymer Science*, 33(8), 820–852. doi:10.1016/j.progpolymsci.2008.05.004
161. Shogren, R. L., Fanta, G. F., & Doane, W. M. (1993). Development of Starch Based Plastics - A Reexamination of Selected Polymer Systems in Historical Perspective. *Starch - Stärke*, 45(8), 276–280. doi:10.1002/star.19930450806



162. H., Goodman, Sidney; Dodiuk., Hanna, (2014). Handbook of thermoset plastics (3rd ed.). William Andrew.
163. G.R. Strobl, (1996). The Physics of Polymers, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
164. N.G. McCrum, C.P. Buckley y C.B. Bucknall, Principles of Polymer Engineering, 2a ed., Oxford University Press, Avon, 1997.
165. Sperling, L. (2001). Introduction to Physical Polymer Science, 3a ed., Nueva York: John Wiley and Sons.
166. Treloar L. R. G., (1975). The Physics of Rubber Elasticity, Oxford University Press.
167. Meyers y Chawla. (1999). Mechanical Behaviors of Materials, Prentice Hall, Inc. (Pearson Education).
168. Michael K. (2002). Engineering Materials: Properties and Selection, 7th Ed.
169. Ibrahim, A. (1998). Thermoplastic natural rubber blends. Progress in Polymer Science, 23(4), 665–706. doi:10.1016/s0079-6700(97)00052-x
170. Ramos, M. (1988). Ingeniería de los materiales plásticos. Madrid: Díaz de Santos.
171. Hsiung, C. M., Cakmak, M., & White, J. L. (1990). Crystallization phenomena in the injection molding of poly ether ether ketone and its influence on mechanical properties. Polymer Engineering and Science, 30(16), 967–980. doi:10.1002/pen.760301606
172. W. J. Work, K. Horie, M. Hess and R. F. T. Stepto. Definition of terms related to polymer blends, composites, and multiphase polymeric materials (IUPAC Recommendations 2004), p. 1985.
173. Carballo Gutiérrez, Emmanuel T. (2009). Futuro en los plásticos, Ciencias, núm. 96, UNAM, México, pp. 62-69.
174. Garcia-Gonzalez, D., Zaera, R., & Arias, A. (2017). A hyperelastic-thermoviscoplastic constitutive model for semi-crystalline polymers: Application to PEEK under dynamic loading conditions. International Journal of Plasticity, 88, 27–52. doi:10.1016/j.ijplas.2016.09.011
175. Carballo, Emmanuel. 2006. Protocolo de investigación: el plástico como material estructural. Posgrado de Arquitectura, UNAM, México.
176. Polanco-Loria, M., Clausen, A. H., Berstad, T., & Hopperstad, O. S. (2010). Constitutive model for thermoplastics with structural applications. International Journal of Impact Engineering, 37(12), 1207–1219. doi:10.1016/j.ijimpeng.2010.06.006
177. H. Gupta and R. Salovey. (1990). Polym. Eng. Sci., 30(8), 453
178. Zhang, Z., Breidt, C., Chang, L., & Friedrich, K. (2004). Wear of PEEK composites related to their mechanical performances. Tribology International, 37(3), 271–277. doi:10.1016/j.triboint.2003.09.005
179. Sajan, S., & Philip Selvaraj, D. (2021). A review on polymer matrix composite materials and their applications. Materials Today: Proceedings. doi:10.1016/j.matpr.2021.08.034

180. Briscoe, B. J., Stuart, B. H., Sebastian, S., & Tweedale, P. J. (1993). The failure of poly (ether ether ketone) in high speed contacts. *Wear*, 162-164, 407–417. doi:10.1016/0043-1648(93)90524-p
181. Tanaka, K., & Yamada, Y. (1985). Effect of Temperature on the Friction and Wear of Some Heat-Resistant Polymers. *ACS Symposium Series*, 103–128. doi:10.1021/bk-1985-0287.ch008
182. Yuan, M., Galloway, J. A., Hoffman, R. J., & Bhatt, S. (2010). Influence of molecular weight on rheological, thermal, and mechanical properties of PEEK. *Polymer Engineering & Science*, 51(1), 94–102. doi:10.1002/pen.21785
183. Patel, N.R., & Gohil, P.P. (2012). A Review on Biomaterials : Scope , Applications & Human Anatomy Significance. 2(4).
184. Denault, J.; Dumouchel, M. Consolidation process of PEEK/carbon composite for aerospace applications. *Adv. Perform. Mater.* 1998, 5(1-2), 83-96.
185. Jones, D.P.; Leach, D.C.; Moore, D.R. Mechanical properties of polyether ether ketone for Engineering applications. *Polymer* 1985, 26, 1385–1393.
186. Friedrich, K. (2018). Polymer composites for tribological applications. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*. doi:10.1016/j.aiepr.2018.05.001
187. Bradley, J. S. (1981). Cautionary note on the strength of materials for internal fixation devices. *Biomaterials*, 2(2), 124. doi:10.1016/0142-9612(81)90011-9
188. Glassman, A. H., Crowninshield, R. D., Schenck, R., & Herberts, P. (2001). A Low Stiffness Composite Biologically Fixed Prosthesis. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, 393, 128–136. doi:10.1097/00003086-200112000-00015
189. Nitesh R. Patel, Piyush P. Gohil. (2012). A Review on Biomaterials: Scope, Applications & Human Anatomy Significance. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 2(4).
190. Geetha Manivasagam, Durgalakshmi Dhinasekaran, Asokamani Rajamanickam. (2010). Biomedical Implants: Corrosion and its Prevention - A Review, *India Recent Patents on Corrosion Science*, 2:40-54.
191. Sahoo, P. K. (2013). Polyetheretherketone (PEEK) cages for cervical interbody replacement. *Apollo Medicine*, 10(3), 233–236. doi:10.1016/j.apme.2013.08.009
192. Fareed, M. I. (2017). Effect of operating conditions on the tribological performance of polyether ether ketone (PEEK). *Advances in Polymer Technology*. doi:10.1002/adv.21812
193. Garcia-Gonzalez, D., Rusinek, A., Jankowiak, T., & Arias, A. (2015). Mechanical impact behavior of polyether–ether–ketone (PEEK). *Composite Structures*, 124, 88–99. doi:10.1016/j.compstruct.2014.12.061
194. Rae, P. J., Brown, E. N., & Orlor, E. B. (2007). The mechanical properties of poly(ether-ether-ketone) (PEEK) with emphasis on the large compressive strain response. *Polymer*, 48(2), 598–615. doi:10.1016/j.polymer.2006.11.032
195. Straffelini, G. (2015). Materials for tribology. In *Springer Tracts in Mechanical Engineering*. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-05894-8\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-319-05894-8_6)

196. Yuan, M., Galloway, J. A., Hoffman, R. J., & Bhatt, S. (2010). Influence of molecular weight on rheological, thermal, and mechanical properties of PEEK. *Polymer Engineering & Science*, 51(1), 94–102. doi:10.1002/pen.21785
197. Stuart, B. H., & Briscoe, B. J. (1994). A Fourier transform Raman spectroscopy study of poly (ether ether ketone)/polytetrafluoroethylene (PEEK/PTFE) blends. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular Spectroscopy*, 50(11), 2005–2009. doi:10.1016/0584-8539(94)80212-2
198. Friedrich, Klaus, Zhang, Z., & Schlarb, A. K. (2005). Effects of various fillers on the sliding wear of polymer composites. *Composites Science and Technology*, 65(15-16), 2329–2343. doi:10.1016/j.compscitech.2005.05.028
199. Greco, A. C., Erck, R., Ajayi, O., & Fenske, G. (2011). Effect of reinforcement morphology on high-speed sliding friction and wear of PEEK polymers. *Wear*, 271(9-10), 2222–2229. doi:10.1016/j.wear.2011.01.065
200. Briscoe, B. J., Lin Heng Yao, & Stolarski, T. A. (1986). The friction and wear of poly(tetrafluoroethylene)-poly(etheretherketone) composites: An initial appraisal of the optimum composition. *Wear*, 108(4), 357–374. doi:10.1016/0043-1648(86)90013-x
201. Unal, H., & Mimaroglu, A. (2006). Friction and Wear Characteristics of PEEK and its Composite under Water Lubrication. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 25(16), 1659–1667. doi:10.1177/0731684406068406
202. Fernandes, C. M. C. G., Battez, A. H., González, R., Monge, R., Viesca, J. L., García, A., Seabra, J. H. O. (2015). Torque loss and wear of FZG gears lubricated with wind turbine gear oils using an ionic liquid as additive. *Tribology International*, 90, 306–314. doi:10.1016/j.triboint.2015.04.037
203. Stuart, B. H., & Briscoe, B. J. (1994). A Fourier transform Raman spectroscopy study of poly (ether ether ketone)/polytetrafluoroethylene (PEEK/PTFE) blends. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular Spectroscopy*, 50(11), 2005–2009. doi:10.1016/0584-8539(94)80212-2
204. Friedrich, K. (2018). Polymer composites for tribological applications. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*. doi:10.1016/j.aiepr.2018.05.001
205. Rodriguez, V., Sukumaran, J., Schlarb, A. K., & De Baets, P. (2016). Influence of solid lubricants on tribological properties of polyetheretherketone (PEEK). *Tribology International*, 103, 45–57. doi:10.1016/j.triboint.2016.06.037
206. Yamamoto, Y., & Takashima, T. (2002). Friction and wear of water lubricated PEEK and PPS sliding contacts. *Wear*, 253(7-8), 820–826. doi:10.1016/s0043-1648(02)00059-5
207. Vande, V.; Bahadur, S. (1995). The growth and bonding of transfer film and the role of CuS and PTFE in the tribological behavior of PEEK. *Wear*, 181, 212-221.
208. Laux, K. A., & Schwartz, C. J. (2013). Effects of contact pressure, molecular weight, and supplier on the wear behavior and transfer film of polyetheretherketone (PEEK). *Wear*, 297(1-2), 919–925. doi:10.1016/j.wear.2012.11.013

209. Bahadur, S. (2000). The development of transfer layers and their role in polymer tribology. *Wear*, 245(1-2), 92–99. doi:10.1016/s0043-1648(00)00469-5
210. Jintang, G. (2000). Tribochemical effects in formation of polymer transfer film. *Wear*, 245(1-2), 100–106. doi:10.1016/s0043-1648(00)00470-1
211. Bashandeh, K., Tsigkis, V., Lan, P., & Polycarpou, A. A. (2021). Extreme environment tribological study of advanced bearing polymers for space applications. *Tribology International*, 153, 106634. doi:10.1016/j.triboint.2020.1066
212. Bijwe, J., Kumar, K., Panda, J. N., Parida, T., & Trivedi, P. (2016). Design and development of high performance tribo-composites based on synergism in two solid lubricants. *Composites Part B: Engineering*, 94, 399–410. doi:10.1016/j.compositesb.2016.03.034
213. Flock J, Friedrich K, Yuan Q. (1999). On the friction and wear behaviour of PAN- and pitch-carbon fiber reinforced PEEK composites. *Wear*, 225–229: 304–11.
214. Bahadur, S., & Gong, D. (1992). The action of fillers in the modification of the tribological behavior of polymers. *Wear*, 158(1-2), 41–59. doi:10.1016/0043-1648(92)90029-8
215. Wang, S., Li, Q., Zhang, S., & Pan, L. (2013). Tribological behavior of poly (phenyl p-hydroxybenzoate)/polytetrafluoroethylene composites filled with hexagonal boron nitride under dry sliding condition. *Materials & Design*, 43, 507–512. doi:10.1016/j.matdes.2012.07.048
216. Chung DDL. (2002). Graphite. *Journal of Materials Science*; 37:1475–89.
217. Panda, J. N., Bijwe, J., & Pandey, R. K. (2016). Role of treatment to graphite particles to increase the thermal conductivity in controlling tribo-performance of polymer composites. *Wear*, 360-361, 87–96. doi:10.1016/j.wear.2016.04.018
218. Aranganathan, N., & Bijwe, J. (2015). Special grade of graphite in NAO friction materials for possible replacement of copper. *Wear*, 330-331, 515–523. doi:10.1016/j.wear.2014.12.037
219. Zhang Z, Breidt C, Chang L, Hauptert F, Friedrich K. Enhancement of the wear resistance of epoxy: Short carbon fibres, graphite, PTFE and nano-TiO<sub>2</sub>. (2004). *Compos Part A Appl Sci Manuf*; 35:1385–92.
220. Briscoe, B. J.; Yao, L. H.; Stolarski, T. A. (1986). The friction and wear of polytetrafluoroethylene–poly(ether ether ketone) composites: an initial appraisal of the optimum composition. *Wear*, 108, 357–374.
221. Liu, X.-X., Li, T.-S., Liu, X.-J., Lv, R.-G., & Cong, P.-H. (2007). An investigation on the friction of oriented polytetrafluoroethylene (PTFE). *Wear*, 262(11-12), 1414–1418. doi:10.1016/j.wear.2007.01.021
222. Stuart, B. H., & Briscoe, B. J. (1994). A Fourier transform Raman spectroscopy study of poly (ether ether ketone)/polytetrafluoroethylene (PEEK/PTFE) blends. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular Spectroscopy*, 50(11), 2005–2009. doi:10.1016/0584-8539(94)80212-2

223. Burris, D. L., & Sawyer, W. G. (2007). Tribological behavior of PEEK components with compositionally graded PEEK/PTFE surfaces. *Wear*, 262(1-2), 220–224. doi:10.1016/j.wear.2006.03.045
224. Cirino, M.; Pipes, R.B.; Friedrich, K. (1987). The abrasive wear behavior of continuous fiber polymer composites. *J. Mater. Sci.*, 22, 2481–2492.
225. Nak-Ho, S., & Suh, N. P. (1979). Effect of fiber orientation on friction and wear of fiber reinforced polymeric composites. *Wear*, 53(1), 129–141. doi:10.1016/0043-1648(79)90224-2
226. Avci, A., Arıkan, H., & Akdemir, A. (2004). Fracture behavior of glass fiber reinforced polymer composite. *Cement and Concrete Research*, 34(3), 429–434. doi:10.1016/j.cemconres.2003.08.027
227. Hanchi, J., & Eiss, N. S. (1997). Dry sliding friction and wear of short carbon-fiber-reinforced polyetheretherketone (PEEK) at elevated temperatures. *Wear*, 203-204, 380–386. doi:10.1016/s0043-1648(96)07347-4
228. Liu, L., Xiao, L., Zhang, X., Li, M., Chang, Y., Shang, L., & Ao, Y. (2015). Improvement of the thermal conductivity and friction performance of poly(ether ether ketone)/carbon fiber laminates by addition of graphene. *RSC Advances*, 5(71), 57853–57859. doi:10.1039/c5ra10722a
229. Sumer, M., Unal, H., Mimaroglu, A. (2008). Evaluation of tribological behavior of PEEK and glass fiber reinforced PEEK composite under dry sliding and wear lubricated conditions. *Wear*, 265, 1061-1065.
230. Davim, J. P., Cardoso, R. (2009). Effect of the reinforcement (carbon or glass fibers) on friction and wear behavior of the PEEK against steel surface at long dry sliding. *Wear*, 266, 795-799.
231. Guo, L., Zhang, G., Wang, D., Zhao, F., Wang, T., & Wang, Q. (2017). Significance of combined functional nanoparticles for enhancing tribological performance of PEEK reinforced with carbon fibers. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 102, 400–413. doi:10.1016/j.compositesa.2017.09.002
232. Vail, J. R., Krick, B. A., Marchman, K. R., & Sawyer, W. G. (2011). Polytetrafluoroethylene (PTFE) fiber reinforced polyetheretherketone (PEEK) composites. *Wear*, 270(11-12), 737–741. doi:10.1016/j.wear.2010.12.003
233. Bijwe, J.; Nidhi. Potential of fibres and solid lubricants to enhance the tribouility of PEEK in adverse operating conditions. *Ind. Lubr. Tribol.* 2007, 4, 156-165.
234. Jia, B.-B., Li, T.-S., Liu, X.-J., & Cong, P.-H. (2007). Tribological behaviors of several polymer–polymer sliding combinations under dry friction and oil-lubricated conditions. *Wear*, 262(11-12), 1353–1359. doi:10.1016/j.wear.2007.01.011
235. Zhang, D., Gao, F., Wei, X., Liu, G., Hua, M., & Li, P. (2018). Fabrication of textured composite surface and its tribological properties under starved lubrication and dry sliding conditions. *Surface and Coatings Technology*, 350, 313–322. doi:10.1016/j.surfcoat.2018.07.026

236. J.K. Lancaster. (1973). Dry bearings: a survey of materials and factors affecting their performance, *Tribology* 12 219–252.
237. Wang, A., Yan, S., Lin, B., Zhang, X., & Zhou, X. (2017). Aqueous lubrication and surface microstructures of engineering polymer materials (PEEK and PI) when sliding against Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>. *Friction*, 5(4), 414–428. doi:10.1007/s40544-017-0155-9
238. Zhang, G., Wetzel, B., & Wang, Q. (2015). Tribological behavior of PEEK-based materials under mixed and boundary lubrication conditions. *Tribology International*, 88, 153–161. doi:10.1016/j.triboint.2015.03.021
239. Hsu, S. M., & Gates, R. S. (2005). Boundary lubricating films: formation and lubrication mechanism. *Tribology International*, 38(3), 305–312. doi:10.1016/j.triboint.2004.08.021
240. Bahari, A., Lewis, R., & Slatter, T. (2018b). Friction and wear response of vegetable oils and their blends with mineral engine oil in a reciprocating sliding contact at severe contact conditions. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. <https://doi.org/10.1177/1350650117712344>
241. 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
242. Itoga, M., Aoki, S., Suzuki, A., Yoshida, Y., Fujinami, Y., & Masuko, M. (2016). Toward resolving anxiety about the accelerated corrosive wear of steel lubricated with the fluorine-containing ionic liquids at elevated temperature. *Tribology International*, 93, 640–650. doi:10.1016/j.triboint.2015.01.008
243. 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
244. 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
245. Schroeder, R., Torres, F. W., Binder, C., Klein, A. N., & de Mello, J. D. B. (2013). Failure mode in sliding wear of PEEK based composites. *Wear*, 301(1-2), 717–726. doi:10.1016/j.wear.2012.11.055
246. Rodriguez, V., Sukumaran, J., Schlarb, A. K., & De Baets, P. (2016). Influence of solid lubricants on tribological properties of polyetheretherketone (PEEK). *Tribology International*, 103, 45–57. doi:10.1016/j.triboint.2016.06.037
247. Furey, M., J. (1973). The formation of polymeric films directly on rubbing surfaces to reduce wear. *Wear*, 26:369–92.
248. Zhang, G., Wetzel, B., & Wang, Q. (2015). Tribological behavior of PEEK-based materials under mixed and boundary lubrication conditions. *Tribology International*, 88, 153–161. doi:10.1016/j.triboint.2015.03.021
249. Yamamoto Y, Hashimoto M. (2004). Friction and wear of water lubricated PEEK and PPS sliding contacts: part 2. Composites with carbon or glass fibre. *Wear*, 257:181–9

250. Zhang ZZ, Liu WM, Xue QJ. (2001). Effects of various kinds of fillers on the tribological behavior of polytetrafluoroethylene composites under dry and oil-lubricated conditions. *J. Appl. Polym Sci*, 80(11):1891–7
251. Laux, K. A., & Schwartz, C. J. (2013). Influence of linear reciprocating and multi-directional sliding on PEEK wear performance and transfer film formation. *Wear*, 301(1-2), 727–734. doi:10.1016/j.wear.2012.12.004
252. Lin, L., Pei, X.-Q., Bennewitz, R., & Schlarb, A. K. (2018). Friction and wear of PEEK in continuous sliding and unidirectional scratch tests. *Tribology International*, 122, 108–113. doi:10.1016/j.triboint.2018.02.035
253. Bahadur, S. (2000). The development of transfer layers and their role in polymer tribology. *Wear*, 245(1-2), 92–99. doi:10.1016/s0043-1648(00)00469-5
254. Kumar, D., Rajmohan, T., & Venkatachalapathi, S. (2018). Wear Behavior of PEEK Matrix Composites: A Review. *Materials Today: Proceedings*, 5(6), 14583–14589. doi:10.1016/j.matpr.2018.03.049
255. Rodriguez, V., Sukumaran, J., Schlarb, A. K., & De Baets, P. (2016). Influence of solid lubricants on tribological properties of polyetheretherketone (PEEK). *Tribology International*, 103, 45–57. doi:10.1016/j.triboint.2016.06.037
256. Lin, L., & Schlarb, A. K. (2019). Tribological response of the PEEK/SCF/graphite composite by releasing rigid particles into the tribosystem. *Tribology International*. doi:10.1016/j.triboint.2019.05.00
257. Lin, L., Pei, X.-Q., Bennewitz, R., & Schlarb, A. K. (2018). Friction and wear of PEEK in continuous sliding and unidirectional scratch tests. *Tribology International*, 122, 108–113. doi:10.1016/j.triboint.2018.02.0
258. Kurdi, A., Kan, W. H., & Chang, L. (2018). Tribological behaviour of high-performance polymers and polymer composites at elevated temperature. *Tribology International*. doi:10.1016/j.triboint.2018.09.010
259. Harrass, M., Friedrich, K., & Almajid, A. A. (2010). Tribological behavior of selected engineering polymers under rolling contact. *Tribology International*, 43(3), 635–646. doi:10.1016/j.triboint.2009.10.003
260. Singh, A. K., Siddhartha, & Singh, P. K. (2017). Polymer spur gears behaviors under different loading conditions: A review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 232(2), 210–228. doi:10.1177/1350650117711595
261. Song, K., Wang, Y., Huang, B., & Wang, M. (2005). Study on EHL of plastic pinion engaging with steel gear. *Lubrication Engineering*, 50–54.
262. Ajayi, O. O., Lorenzo-Martin, C., Erck, R. A., & Fenske, G. R. (2011). Scuffing mechanism of near-surface material during lubricated severe sliding contact. *Wear*, 271(9-10), 1750–1753. doi:10.1016/j.wear.2010.12.086
263. Shiao, S. J., Fu, W. S., Tuo, C. L., & Cheng, U. I. (2001). Polymer-based self-lubricating material. *Journal of Applied Polymer Science*, 80(9), 1514–1519. doi:10.1002/app.1242

264. Stolarski, T. A. (1993). External lubrication of high-temperature thermoplastic polymers. *Journal of Applied Polymer Science*, 48(5), 897–904. doi:10.1002/app.1993.070480514
265. Dearn, K. D., Hoskins, T. J., Andrei, L., & Walton, D. (2013). Lubrication Regimes in High-Performance Polymer Spur Gears. *Advances in Tribology*, 2013, 1–9. doi:10.1155/2013/987251
266. Hsu, S. M., & Gates, R. S. (2005). Boundary lubricating films: formation and lubrication mechanism. *Tribology International*, 38(3), 305–312. doi:10.1016/j.triboint.2004.08.021 }
267. Abdul Samad, M., & Sinha, S. K. (2010). Nanocomposite UHMWPE–CNT Polymer Coatings for Boundary Lubrication on Aluminium Substrates. *Tribology Letters*, 38(3), 301–311. doi:10.1007/s11249-010-9610-8
268. Tatsumi, G., Ratoi, M., Shitara, Y., Hasegawa, S., Sakamoto, K., & Mellor, B. G. (2021). Mechanism of oil-lubrication of PEEK and its composites with steel counterparts. *Wear*, 486–487, 204085. doi:10.1016/j.wear.2021.204085
269. Padhan, M., Marathe, U., & Bijwe, J. (2020). Tribology of Poly(etherketone) composites based on nano-particles of solid lubricants. *Composites Part B: Engineering*, 108323. doi:10.1016/j.compositesb.2020.10
270. Pindit, K., Thanapimmetha, A., Saisriyoot, M., & Srinopakun, P. (2021). Biolubricant basestocks synthesis using 5-step reaction from jatropha oil, soybean oil, and palm fatty acid distillate. *Industrial Crops and Products*, 166, 113484. doi:10.1016/j.indcrop.2021.11348
271. Popov, V. L., Voll, L., Li, Q., Chai, Y. S., & Popov, M. (2014). Generalized law of friction between elastomers and differently shaped rough bodies. *Scientific Reports*, 4(1). doi:10.1038/srep03750
272. Popov, V. L. (2010). *Contact Mechanics and Friction. Physical Principles and Applications*. Berlin: Springer.
273. Hufenbach, W., Kunze, K., & Bijwe, J. (2003). Sliding wear behaviour of PEEK-PTFE blends. *Journal of Synthetic Lubrication*, 20(3), 227–240. doi:10.1002/jsl.3000200305
274. 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
275. Hoshi, M. (1984). Reducing friction losses in automobile engines. *Tribology International*, 17(4), 185–189. doi:10.1016/0301-679x(84)90017-3
276. Nagendramma, P., & Kaul, S. (2012). Development of ecofriendly/biodegradable lubricants: An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 764–774. doi:10.1016/j.rser.2011.09.002
277. Mobarak, H. M., Niza Mohamad, E., Masjuki, H. H., Kalam, M. A., Al Mahmud, K. A. H., Habibullah, M., & Ashraful, A. M. (2014). The prospects of biolubricants as alternatives in automotive applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 33, 34–43. doi:10.1016/j.rser.2014.01.062



278. El Kinawy, O. S. (2004). Comparison Between Jojoba Oil and Other Vegetable Oils as a Substitute to Petroleum. *Energy Sources*, 26(7), 639–645. doi:10.1080/00908310490438623
279. Gupta, M. K. (2014a). Sunflower oil: History, applications and trends. *Lipid Technology*. <https://doi.org/10.1002/lite.201400068>.
280. De Gee, A. W. J., Lossie, C. M., & Stoop, W. (1995). Characterization of the Lubricating Action of Oils Under Boundary Lubrication Conditions. *Tribology Transactions*, 38(3), 565–570. doi:10.1080/10402009508983443
281. Bahari, A., Lewis, R., & Slatter, T. (2017). Friction and wear response of vegetable oils and their blends with mineral engine oil in a reciprocating sliding contact at severe contact conditions. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 232(3), 244–258. doi:10.1177/1350650117712344
282. Adhvaryu, A., Erhan, S., & Perez, J. (2004). Tribological studies of thermally and chemically modified vegetable oils for use as environmentally friendly lubricants. *Wear*, 257(3-4), 359–367. doi:10.1016/j.wear.2004.01.005
283. Arbain, N. H., & Salimon, J. (2010). Synthesis and Characterization Of Ester Trimethylolpropane Based Jatropha Curcas Oil As Biolubrificant Base Stocks. *Journal of Science and Technology*. 2(2).
284. 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
285. Bermúdez, M.-D., Jiménez, A.-E., Sanes, J., & Carrión, F.-J. (2009). Ionic Liquids as Advanced Lubricant Fluids. *Molecules*, 14(8), 2888–2908. doi:10.3390/molecules14082888.
286. Medina D.I., Elmoumni A., Braithwaite G., McKinley G.H., 2013. The development of an innovative triborheometry fixture/design to study the frictional dynamics of solid-liquid systems. *The Society of Rheology*.
287. 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
288. Syahir, A. Z., Zulkifli, N. W. M., Masjuki, H. H., Kalam, M. A., Alabdulkarem, A., Gulzar, M., Harith, M. H. (2017). A review on bio-based lubricants and their applications. *Journal of Cleaner Production*, 168, 997–1016.
289. Kim, K.-S., Shin, B.-K., & Lee, H. (2004). Physical and electrochemical properties of 1-butyl-3-methylimidazolium bromide, 1-butyl-3-methylimidazolium iodide, and 1-butyl-3-methylimidazolium tetrafluoroborate. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 21(5), 1010–1014. doi:10.1007/bf02705586
290. Fernández-González, A., Mallada, M. T., Viesca, J. L., González, R., Badía, R., & Hernández-Battez, A. (2017). Corrosion activity and solubility in polar oils of three bis(trifluoromethylsulfonyl) imide/bis(trifluoromethylsulfonyl) amide ([NTF<sub>2</sub>])

- anion-based ionic liquids. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 56, 292–298. doi:10.1016/j.jiec.2017.07.022
291. Asadauskas, S., Perez, J. M., & Duda, J. L. (1996). Oxidative stability and antiwear properties of high oleic vegetable oils. *Lubrication Engineering*, 52(12), 877-882.
292. Becker, R., & Knorr, A. (1996). An evaluation of antioxidants for vegetable oils at elevated temperatures. *Lubrication Science*, 8(2), 95–117. doi:10.1002/lis.3010080202
293. Reddy, K. S. V. K., Kabra, N., Kunchum, U., & Vijayakumar, T. (2014). Experimental Investigation on Usage of Palm Oil as a Lubricant to Substitute Mineral Oil in CI Engines. *Chinese Journal of Engineering*, 2014, 1–5. doi:10.1155/2014/643521
294. Altın, R., Çetinkaya, S., & Yücesu, H. S. (2001). The potential of using vegetable oil fuels as fuel for diesel engines. *Energy Conversion and Management*, 42(5), 529–538. doi:10.1016/s0196-8904(00)00080-7
295. Martín-Alfonso, J. E., & Valencia, C. (2015). Tribological, rheological, and microstructural characterization of oleogels based on EVA copolymer and vegetables oils for lubricant applications. *Tribology International*, 90, 426–434. doi:10.1016/j.triboint.2015.05.004
296. Gemsprim, S., Babu, M., Udhayakumar, S. (2020). Tribological evaluation of vegetable oil-based lubricant blends. *Materials Today: Proceedings*. doi:10.1016/j.matpr.2020.08.521

## APÉNDICE A. ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

| Abreviatura                           | Significado                                                 |                  |
|---------------------------------------|-------------------------------------------------------------|------------------|
| PEEK                                  | Poli-éter-éter-cetona                                       |                  |
| PFPE                                  | Per-fluoro-poli-eter                                        |                  |
| MoS <sub>2</sub>                      | Bisulfuro de molibdeno                                      |                  |
| PTFE                                  | Poli-tetra-fluoro-etileno                                   |                  |
| PAO                                   | Poli-alfa-oleofinas                                         |                  |
| [BMIM][BF <sub>4</sub> <sup>-</sup> ] | 1-butil-3-metilimidiazolio tetrafluoro borato               |                  |
| [MTOA][NTf <sub>2</sub> ]             | bis[trifluoro-metil-sulfonil]imida de metil-trioctil-amonio |                  |
| SAE (25W-50)                          | Society of Automotive Engineers                             |                  |
| h-LI                                  | Líquido iónico con halógenos                                |                  |
| lh-LI                                 | Líquido iónico libre de halógenos                           |                  |
| GF                                    | Fibra de vidrio                                             |                  |
| CF                                    | Fibra de carbono                                            |                  |
| LI                                    | Líquido iónico                                              |                  |
| Ac. Inox.                             | Acero inoxidable                                            |                  |
| ROP                                   | Ring on plate                                               |                  |
| HPV                                   | High pressure and velocity                                  |                  |
| Subindices                            | Significado                                                 |                  |
| F                                     | Fricción                                                    |                  |
| N                                     | Normal                                                      |                  |
| Nomenclatura                          | Significado                                                 | Unidades         |
| $\nu$                                 | Velocidad Angular                                           | RAD/S            |
| $\eta$                                | Viscosidad dinámica                                         | Pa s             |
| CoF                                   | Coefficiente de fricción                                    | Adimensional     |
| F <sub>N</sub>                        | Fuerza normal                                               | N                |
| F <sub>F</sub>                        | Fuerza de fricción                                          | N                |
| P                                     | Presión                                                     | N/m <sup>2</sup> |
| T                                     | Temperatura de operación                                    | °C               |
| T <sub>g</sub>                        | Temperatura de transición vítrea                            | °C               |
| T <sub>m</sub>                        | Temperatura de fusión                                       | °C               |
| %Y <sub>R</sub>                       | Humedad relativa                                            | Adimensional     |
| $\theta$                              | Diámetro exterior                                           | cm, in           |