



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA
CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

**REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE DE LA APLICACIÓN DE
NANOPARTÍCULAS EN LOS LUBRICANTES PARA MEJORAR SUS
PROPIEDADES TRIBOLÓGICAS**

Trabajo de titulación previo a la obtención
del título de Ingeniero Automotriz

AUTORES: BRYAN JOEL JIMÉNEZ CORDERO

JULIO EFRAÍN GUILLÉN MATUTE

TUTOR: ING. MILTON OSWALDO GARCÍA TOBAR, MSc.

Cuenca - Ecuador

2022

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Bryan Joel Jiménez Cordero con documento de identificación N° 1105747735 y Julio Efraín Guillén Matute con documento de identificación N° 0923517387; manifestamos que:

Somos autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 08 de julio del 2022

Atentamente,



Bryan Joel Jiménez Cordero

1105747735



Julio Efraín Guillén Matute

0923517387

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO
DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, Bryan Joel Jiménez Cordero con documento de identificación N° 1105747735 y Julio Efraín Guillén Matute con documento de identificación N° 0923517387, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Artículo académico: “Revisión del estado del arte de la aplicación de nanopartículas en los lubricantes para mejorar sus propiedades tribológicas”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Automotriz en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 08 de julio del 2022

Atentamente,



Bryan Joel Jiménez Cordero

1105747735



Julio Efraín Guillén Matute

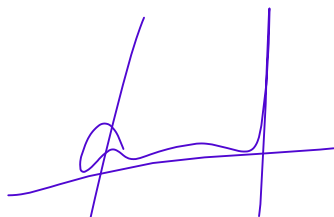
0923517387

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Milton Oswaldo García Tobar con documento de identificación N° 0104282181, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE DE LA APLICACIÓN DE NANOPARTÍCULAS EN LOS LUBRICANTES PARA MEJORAR SUS PROPIEDADES TRIBOLÓGICAS, realizado por Bryan Joel Jiménez Cordero con documento de identificación N° 1105747735 y Julio Efraín Guillén Matute con documento de identificación N° 0923517387, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Artículo académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 08 de julio del 2022

Atentamente,



Ing. Milton Oswaldo García, MSc.

0104282181

REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE DE LA APLICACIÓN DE NANOPARTÍCULAS EN LOS LUBRICANTES PARA MEJORAR SUS PROPIEDADES TRIBOLÓGICAS

1. Introducción

El aceite lubricante es un componente fundamental para el correcto funcionamiento de los motores de los vehículos en la actualidad, por lo tanto, es una de las áreas con mayor investigación e innovación dentro de la industria automotriz [1]–[4]. Esto debido principalmente a las funciones que cumple, entre las cuales se destacan: reducir la fricción[5], mejorar el sellado[6], proteger contra el desgaste[7], disminuir la corrosión [7], eliminar contaminantes [8] y disipar el calor [9]. Se estima que el 80% de las fallas mecánicas son ocasionadas por un defecto de desgaste a causa de la fricción y lubricación [10].

Así mismo, Holmberg et al. en [11] establece que un 33% de la pérdida de energía en un motor de combustión interna se debe a la fricción, atribuyéndole un 11,5% a las piezas móviles del motor, un 5% a los engranajes de la transmisión, un 11,5% a la resistencia a rodadura y un 5% a la fricción en los frenos. De este modo, debido a la importancia de la lubricación nace la necesidad de mejorar las propiedades tribológicas de los lubricantes, lo cual da lugar a un enfoque de investigación centrado en la inclusión de nanomateriales como aditivos en los aceites base [12]–[16].

En este sentido, en las últimas dos décadas se ha estudiado el comportamiento tribológico de lubricantes con la adición de diversas nanopartículas como Disulfuro de Molibdeno (MoS_2) [17], Sulfuro de Wolframio (WS_2) [18], Óxido de Aluminio (Al_2O_3) [19], Óxido de Titanio (TiO_2) [20], Estearato de Magnesio [21], Grafito [22],

Grafeno [23], Nanotubos de Carbón MWCNT/ZnO [24], Óxido de Silicio SiO_2 /MWCNT [25] y Nanoestructuras de Carbono [26].

Estos estudios han revelado resultados favorables, como, por ejemplo, en [27] se muestra un aumento de la relación de conductividad térmica del lubricante, de 1 a 1,15 utilizando nanopartículas de Óxido de Cobre (CuO) en concentraciones del 0% al 4% de concentración de volumen con un tamaño de 10 nm a temperaturas de 20 a 50 grados centígrados. Este hallazgo hace que los nanofluidos sean atractivos como refrigerantes para dispositivos con alta densidad de energía.

Así también en [28] se analiza el comportamiento del coeficiente de fricción de nanolubricantes compuestos por Óxido de Aluminio y Óxido de silicio (Al_2O_3 - SiO_2), donde se concluyó que, para una reducción del coeficiente de fricción de hasta un 4,78% y un mejoramiento de la tasa de desgaste de un 12,96%, la concentración de volumen optima de nanolubricantes debe ser del 0,02%.

Considerando la importancia de los resultados expuestos en párrafos anteriores, en este artículo se desarrolla una revisión bibliográfica de los experimentos realizados para el mejoramiento de las propiedades tribológicas de los nanolubricantes, con el fin de identificar las nanopartículas utilizadas para estos experimentos, los procesos empleados para la experimentación y analizar los resultados obtenidos.

2. Preparación de nanolubricantes

2.1. Conceptos básicos

Se conoce como nanolubricante a un fluido base al que se le adicionan nanopartículas en un estado de suspensión estable. La estabilidad de dispersión es un reto importante en el empleo de nanopartículas en los lubricantes, esto debido a que las nanopartículas se aglomeran fácilmente por su alta tensión superficial, formando cúmulos de agregados no dispersables [29].

Para entender la estabilidad de la dispersión de los nanolubricantes se puede acudir a las teorías coloidales, las cuales atribuyen la estabilidad de suspensión a la interacción entre las nanopartículas y la energía de agitación térmica recibida por el fluido base [30].

2.2. Métodos para la preparación de nanolubricantes

En la experimentación, la preparación de los nanolubricantes es un paso importante para conseguir estabilidad y duración en las mezclas, por lo tanto, para la producción de nanofluidos se han utilizado dos métodos, conocidos como, método de un paso y método de dos pasos [31]–[33].

Método de un paso

En el método de un solo paso, se produce y dispersa simultáneamente las nanopartículas directamente en el fluido base [34]–[39].

Para este proceso se pueden usar algunas técnicas como:

En la Figura 1 [40] se esquematiza la *técnica de ablación laser*, que consiste en enfocar la superficie del material (gas o líquido) utilizando un rayo láser, lo que provoca la vaporización de este, en el punto irradiado. El impacto entre la parte

evaporada y las moléculas circundantes dan como resultado la formación de una pluma de plasma inducida por láser, que posteriormente será confinada en una región específica para dispersar las nanopartículas para que el fenómeno de coagulación sea correctamente controlado en las etapas finales del proceso, como se muestra en [41]–[43].

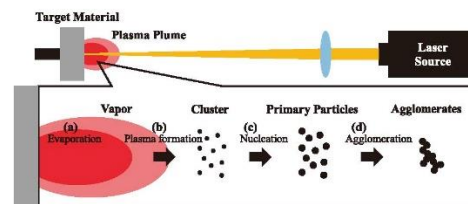


Figura 1: Esquema del procedimiento de generación de partículas con el proceso de ablación laser [40]

Por otra parte, la *técnica de arco sumergido* utilizado en [44]–[46], basa su principio en sumergir una varilla de cobre puro en un líquido dieléctrico situado en una cámara de vacío. En este punto, la temperatura se incrementa a un rango comprendido entre 6000 y 12000 °C aproximadamente produciendo un arco en la varilla, que posteriormente se funde y vaporiza junto con el líquido dieléctrico [38], como se detalla en la Figura 2.

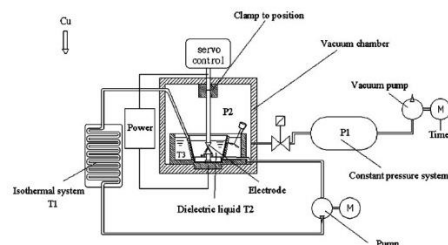


Figura 2: Diagrama esquemático del SANSS [38]

El vapor de alta presión elimina el metal vaporizado, produciendo que en la cámara de vacío dicho metal sufra un proceso de

condensación, nucleación y crecimiento transformándose así en nanopartículas.

Finalmente, la *técnica de deposición de vapor* empleada en [47], [48], se caracteriza por formar una capa delgada de fluido base en la pared del recipiente, todo esto bajo la acción de una fuerza centrífuga producida por el disco giratorio (Figura 3). Posteriormente, en un depósito lleno de gas inerte a baja presión, el material se calienta y evapora. Tras este proceso, el nanofluido está listo cuando los vapores de la materia prima se condensan debido a la interacción con una fina película de agua en remolino y se asientan en el fluido base [49].

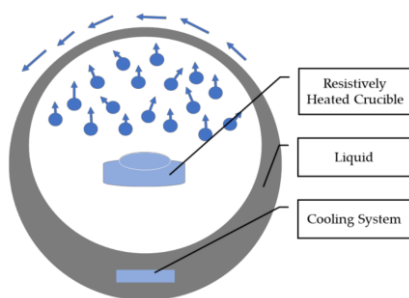


Figura 3: Diagrama esquemático del método de deposición de vapor [50]

Método de dos pasos

El método de dos pasos consiste en preparar primero las nanopartículas como polvos secos mediante procesos químicos o físicos, para luego, por medio de una agitación intensa, para luego dispersarlo en un fluido base. Este método es el más utilizado por su bajo costo y capacidad de producir nanofluidos a gran escala [50]–[52].

Preparación de nanopartículas

En el método de dos pasos la preparación de nanopartículas se realiza previo a la mezcla con el fluido base mediante las siguientes técnicas:

La *técnica Sol- Gel* es aplicada en [53]–[55] y específicamente explicada por Behnajady, et al. [56] en los siguientes pasos: primero, mediante la técnica de baño ultrasónico se produce la sonicación de la mezcla entre el titanio y el solvente. Seguido se añade agua desionizada gota por gota a la mezcla mediante agitación magnética para conseguir el proceso de hidrólisis. Al final el producto de los pasos anteriores se seca y se calcina produciendo un polvo cristalino (Figura 4).

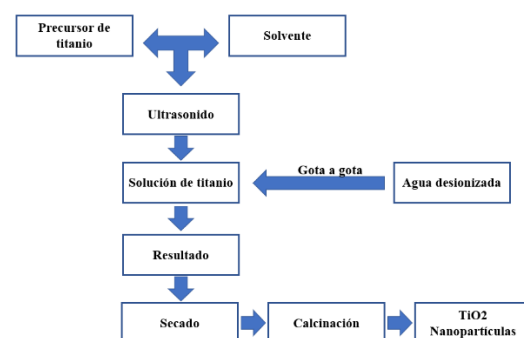


Figura 4: Esquema de preparación de nanopartículas de TiO_2

Una técnica diferente es la de la *síntesis Hidrotermal* [57]–[59], la cual se aplica en un alto rango de temperatura. Además, se establecen condiciones de baja o alta presión dependiendo de la composición principal de la reacción para así controlar la morfología de los materiales. La síntesis hidrotermal tiene como principal ventaja una insignificante pérdida de materiales [60].

Preparación de nanofluido

En el método de dos pasos la preparación del nanofluido implica la suspensión y dispersión de las nanopartículas mediante las técnicas descritas a continuación. Para empezar, se considera *técnica de ultrasonido* que consiste en agitar las nanopartículas en el fluido base (Figura 5) con ondas sonoras ultrasónicas de

frecuencia mayor a 20 kHz. De esta manera se reduce la formación de aglomeraciones de tamaño nanométrico al romper las interacciones intermoleculares [49], [61]–[65].

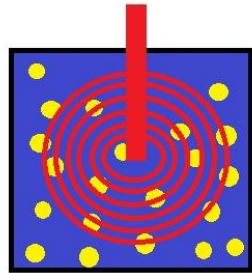


Figura 5: Técnica de ultrasonido

Por otro lado, se tiene la *técnica de agitación magnética* [66]–[69] que consiste en la acción de un campo magnético giratorio creado por electroimanes estacionarios o un conjunto de electroimanes giratorios que funcionan con mecanismos de agitación (Figura 6)

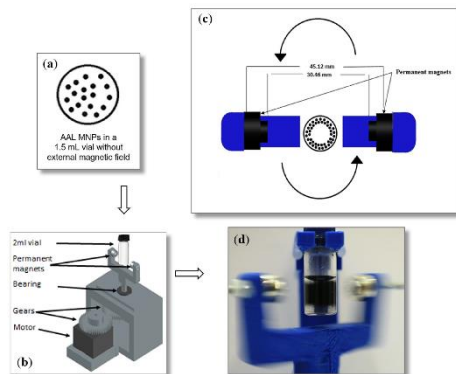


Figura 6: Dispositivo de agitación magnética [67]

Una consideración diferente establece al *ajuste de PH* como un suplemento a las técnicas anteriores, pues ajusta el pH del fluido base para mejorar la suspensión y dispersión de las nanopartículas, sin embargo, no se preside de aplicar una agitación por ultrasonido o magnética para

la preparación del nanofluido. Esta técnica eleva el valor del potencial zeta, mismo que se puede relacionar con la estabilidad de las dispersiones coloidales. En la Figura 7 se muestra la variación del potencial zeta respecto a los cambios de pH en el fluido base [70]–[73].

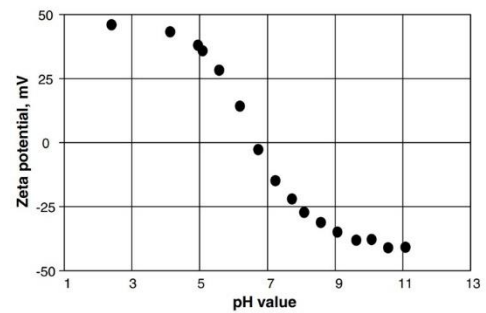


Figura 7: Variación del potencial zeta de TiO₂ con respecto al pH [71]

Wei et al [74] y Zhao et al [75] aplican una técnica en la que *combinan todos los procesos* descritos anteriormente en la preparación de un nanofluido para lograr una mejor eficiencia y estabilidad. La Figura 8 resume mediante un esquema los métodos y técnicas de preparación de los nanolubricantes.

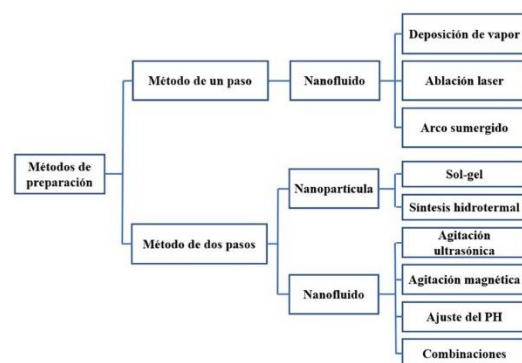


Figura 8: Resumen de los métodos de preparación de un nanolubricante.

2.3. Estabilidad del nanofluido

Luego de preparar el nanofluido, es necesario verificar su estabilidad, como paso previo a las experimentaciones.

Como primera técnica se encuentra el *espectrofotómetro UV-Vis* el cual es aplicable para todos los fluidos base [76] y con excelentes resultados en varios estudios [77]–[79]. Esta técnica cimienta su funcionamiento en la acción de aprovechar el cambio de intensidad de luz al atravesar un fluido. Utilizando una longitud de onda de 200 a 900 nm el instrumento analiza dispersiones del fluido y mide la absorción por líquido [80]. Jiang et al, en [81] aplica el método de la siguiente manera: primero, mediante escaneo se busca encontrar la absorbancia máxima de las nanopartículas, para, por medio de al menos tres concentraciones diluidas (0,01-0,03%) preparar un estándar que se ajuste una relación lineal. Finalmente, se mide la estabilidad relativa y se deja reposar durante algunos días el nanofluido tratado.

Otra forma de medir la estabilidad del nanofluido es la de *prueba de potencial zeta* que emplea el estudio del comportamiento electroforético para comprobar la calidad de la estabilidad en los nanofluidos [82]. En la experimentación realizada por Wang [83], se necesita una fracción en peso de 0,05% de nanosuspensión para calcular la magnitud de las partículas y el potencial zeta. El potencial zeta y la estabilidad de suspensión poseen partículas con carga similar, por ello, existe una repulsión mutua generando que dichas partículas no se aglomeren. En [84] se menciona que una suspensión con un potencial zeta mayor a 30mV enR valor absoluto dispone de una correcta estabilidad.

La técnica *capturas de fotos* es la más importante para conocer la sedimentación de los nanofluidos. Las fotos se capturan posterior a la preparación con la reserva de cantidades de la suspensión. Al visualizar las fotos la sedimentación será evidente, como se observa en [85]–[87].

Así mismo, las herramientas *Transmission Electron Microscopy (TEM)* y *Scanning Electron Microscope (SEM)* son muy útiles para distinguir la forma, el tamaño y distribución de las nanopartículas. Sin embargo, con estas herramientas no se puede visualizar la situación real de las nanopartículas en el fluido base. Esta prueba solo se realiza con muestras secas [83], [85], [88].

Las micrografías estándar SEM/TEM se las puede llevar a cabo con el siguiente procedimiento [89]:

- Tomar una parte de la solución del nanofluido.
- Ubicar una gota de la solución en el portamuestras.
- Secar la muestra, en el horno de vacío o de forma natural.
- Llevar a la cámara de vacío de SEM/TEM para tomar la imagen.

Por otro lado, también se usa el *método de la dispersión de luz* para visualizar la estructura de las partículas coloidales en suspensión. La intensidad de luz dispersa en una partícula está relacionada con el volumen de esta. Dado que la interacción de la radiación electromagnética con una partícula pequeña es débil, la dispersión de luz en la mayor parte incidente se transmite y solo en una pequeña cantidad se dispersa [90], [91].

Otro método utilizado para estimar la estabilidad de las nanopartículas es *balance de sedimentación*, que consiste en sumergir la bandeja de una balanza de sedimentación en el nanofluido fresco. El peso de la sedimentación o el volumen de esta indican la estabilidad de los nanofluidos. En general, se considera que los nanofluidos son estables si la concentración de las partículas

sobrenadantes permanece constante con el tiempo [92]–[94].

Por último, la estabilidad coloidal del nanofluido también puede determinarse por el *método de los tres omega*. Se puede evaluar detectando el crecimiento de la conductividad térmica causado por la sedimentación de las nanopartículas en un amplio rango de fracciones de volumen de estas [95], [96].

3. Influencia de las nanopartículas en los lubricantes

Las nanopartículas desempeñan una función vital en las zonas de fricción, concretamente en el régimen de lubricación límite, donde los márgenes de desgaste y fricción alcanzan su máximo valor [97]. Su tamaño diminuto les permite penetrar en las asperezas de la superficie en la zona de contacto como se muestra en la Figura 9 [98]. Así también, cuando se agregan a un fluido, su tamaño es lo suficientemente pequeño como para permanecer dispersas por el movimiento Browniano, sin embargo, las partículas en suspensión pueden adherirse entre sí y formar aglomeraciones que dan como resultado la pérdida de protección contra el desgaste y la capacidad de reducción de la fricción. De ahí, la importancia de una correcta preparación del nanolubricante [80].

Rebaso et al. [99] concluye que la fricción se reduce significativamente a medida que aumentaba el tiempo de agitación en la preparación de su aceite enriquecido con MoS_2 , por lo tanto, el tiempo de agitación en la preparación del nanolubricante juega un papel importante en la estabilidad de la dispersión y en consecuencia afecta al rendimiento de lubricación [100]–[104].

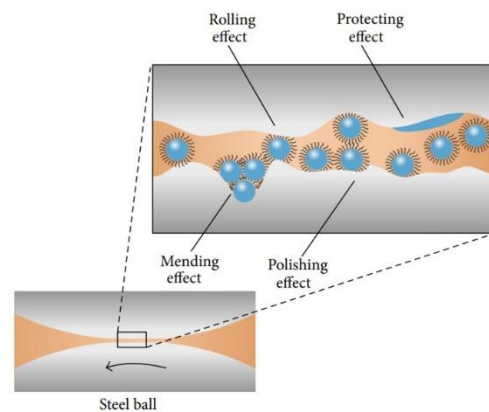


Figura 9: Esquema del mecanismo de lubricación con nanopartículas [111]

La concentración adecuada es otro factor importante que afecta a las características de lubricación de los nanolubricantes [105]–[108]. La adición de nanopartículas en una concentración inadecuada ya sea en exceso o escasez, pueden causar efectos negativos en algunos casos, ya sea por el aumento de fricción o el desgaste [109].

La propiedad mecánica intrínseca de las nanopartículas, como la dureza, está determinadas por su tamaño, lo que a su vez afecta el comportamiento tribológico del mismo. Para materiales en el rango de tamaño de 100 nm o más, la dureza aumenta con la concentración del tamaño de partícula [110]. Si la dureza de las nanopartículas es mayor que la del material de la superficie, el resultado es la muesca y el rayado, como lo indica Peña et al [111] en su estudio. La alta dureza (8-9 Mohs) de nano Al_2O_3 resultó en desgaste abrasivo y aglomeración de nanopartículas.

También la forma de las nanopartículas juega un papel importante, debido a que el comportamiento depende del espacio entre la nanopartícula y la superficie lubricada al momento de cargarse [106].

Las nanopartículas de forma esférica muestran una alta capacidad de carga debido a su efecto cojinete de bolas. En la Figura 10, se muestra el contacto lineal que se

asocia con las nanolaminas y el contacto plano que se asocia con las nanoplaquetas. En la mayoría de los estudios relacionados con nanolubricantes se han utilizado nanopartículas de forma esférica[18][22][112]–[115].

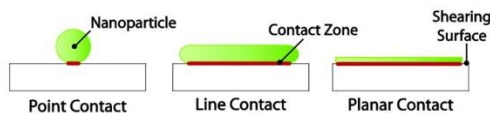


Figura 10: Ilustración del efecto de la forma de las nanopartículas en las presiones de contacto experimentadas al cargarlas [122]

Las investigaciones del desempeño tribológico de las nanopartículas como aditivos en aceites lubricantes se llevan a cabo con experimentos utilizando diferentes herramientas como tribómetro de cuatro bolas, pistón ring, ball on disc y pin on disc, utilizando condiciones estándar de la norma ASTM D2783, ASTM G1811, ASTM 4172, ASTM D5707, DIN 51350 y AISI 52100 [116]–[118].

4. Análisis de resultados

4.1. Métodos de preparación

En temas anteriores se define la importancia de la preparación de un nanolubricante, por lo cual, bajo este concepto se presentan los métodos con mayor aplicación en los artículos revisados. Se considera un grupo de 39 trabajos para el análisis de métodos de preparación utilizados, considerando que la fecha de publicación de estos trabajos investigativos es superior al 2010 y con un impacto importante (Q1 o Q2).

Del grupo de análisis el 23,07% utiliza el método de preparación de un paso y el 76,92% utiliza el método de dos pasos así se

muestra en la Figura 11 y se describe en la tabla 1.

Por consiguiente, en la tabla 1 también se expresa el tipo de dispersión usada por los autores y el tiempo de duración de esta. La et al. [119] aplica 12 horas de agitación por ultrasonido a su nanolubricante, este es el mayor tiempo de agitación aplicado a comparación del resto de autores.

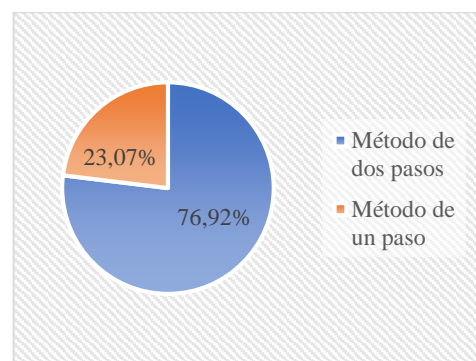


Figura 11: Contabilidad de métodos usados

Por otro lado, Zheng et al. [120] aplica 10 min de agitación magnética y 15 min de agitación por ultrasonido a su mezcla, estos son los valores de menor tiempo de agitación. Así, estos dos autores representan los extremos del tiempo de aplicación de agitación en los nanofluidos. El 56,41 % de los experimentos utilizan el método de dispersión por ultrasonido, el 28,20% opta por la agitación magnética y el restante 15,38% mezclan ambos métodos (Figura 12).

En la Figura 13 se muestran los autores que han conseguido un nanolubricante estable (17,94%), un nanolubricante no estable (2,56%), así como los autores que no reportan la estabilidad (5,12%) y los autores que consiguieron una estabilidad para un determinado tiempo (74,35%). En la Figura 14 se detalla los tiempos de estabilidad

conseguidos por el grupo de investigadores pertenecientes al 74,35% de este análisis

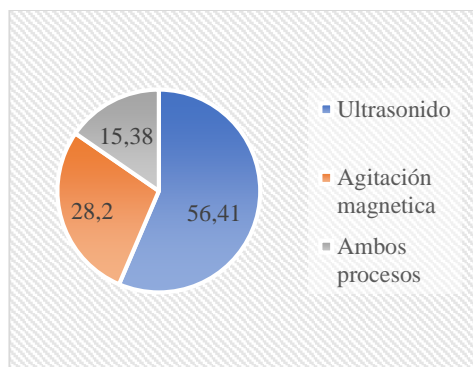


Figura 12: Contabilidad de técnicas de dispersión usadas

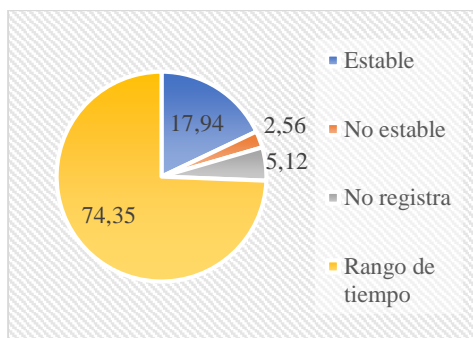


Figura 13: Contabilidad de estabilidad de los nanolubricantes

4.2.Reducción del coeficiente de fricción

Para analizar los resultados de la reducción del coeficiente de fricción se consideran 39 artículos, estos se analizan bajo el criterio del porcentaje máximo de reducción de coeficiente de fricción conseguido, las concentraciones de nanopartículas aplicadas, las concentraciones que han dado mejores resultados y las temperaturas a las que se realizaron los experimentos.

En la Figura 16 se detalla los resultados obtenidos por los investigadores en materia

de reducción de coeficiente de fricción, Singh et al [121] consigue el mayor porcentaje de disminución del coeficiente de fricción con un valor de 91,6% de reducción de coeficiente de fricción para su experimento. Este autor experimentó con nanopartículas de grafito a una temperatura ambiente, con un aceite base SAE-30 y haciendo uso de la herramienta Pin on Disc, con la aplicación de fuerzas variables entre 20 – 50 N a 300rpm. Para comprender la Figura 16 se debe considerar que algunos autores experimentaron con más de un tipo de nanopartículas.

Así mismo, tras la revisión bibliográfica, un 64,10% utiliza un rango de concentración en sus experimentos, el restante 35,89% utiliza únicamente un valor de concentración como se detalla en la tabla 3.

La Figura 15 muestra los rangos de valores de concentración aplicados, de los cuales la mayoría de los autores [124-127, 129, 130, 132, 134, 155-159] considera un valor de concentración inferior al 1% y un número de pruebas de cuatro, en la tabla 2 se detalla las concentraciones que resultaron eficientes para estos investigadores. La mayoría de los valores de concentración eficientes son menor a 1, sin embargo, dos autores [111, 164] encontraron la concentración eficiente en el 2% y 3%.

Por último, del total de la bibliografía revisada, el 51,28% realiza sus experimentaciones en una temperatura ambiente, mientras que el 48,71% restante realizan las pruebas en temperaturas dentro del rango de 20 C a 100 C.

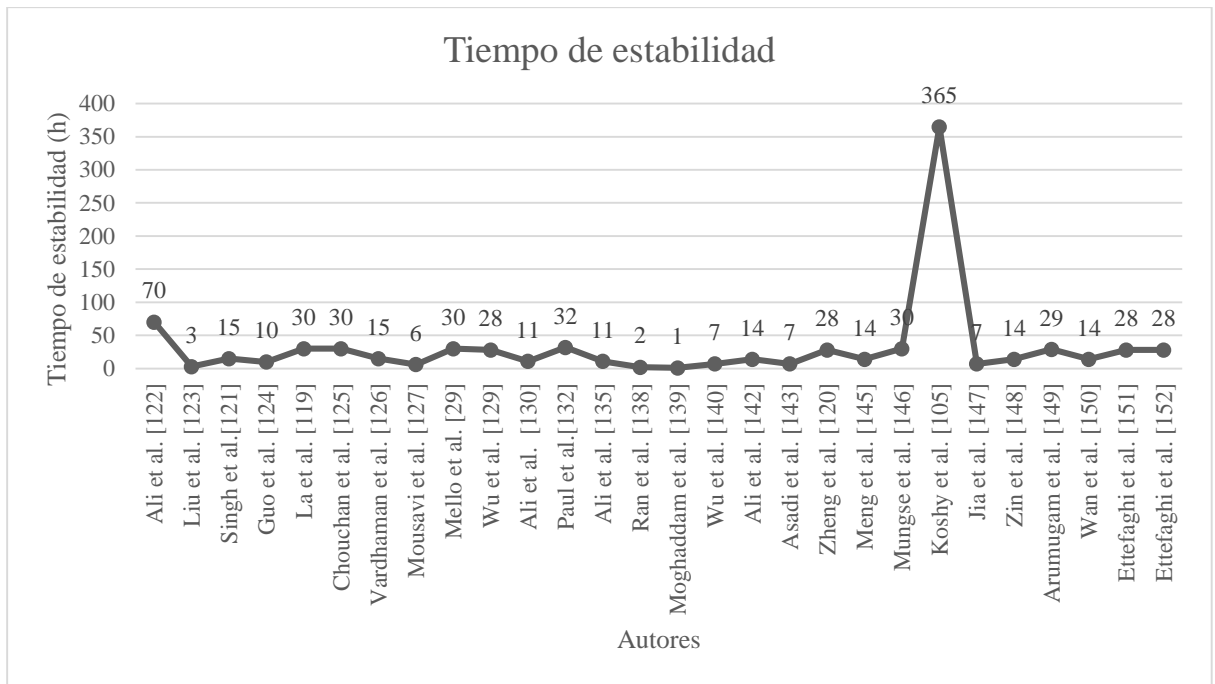


Figura 14: Tiempos de estabilidad conseguidos por el 74,35% de los autores

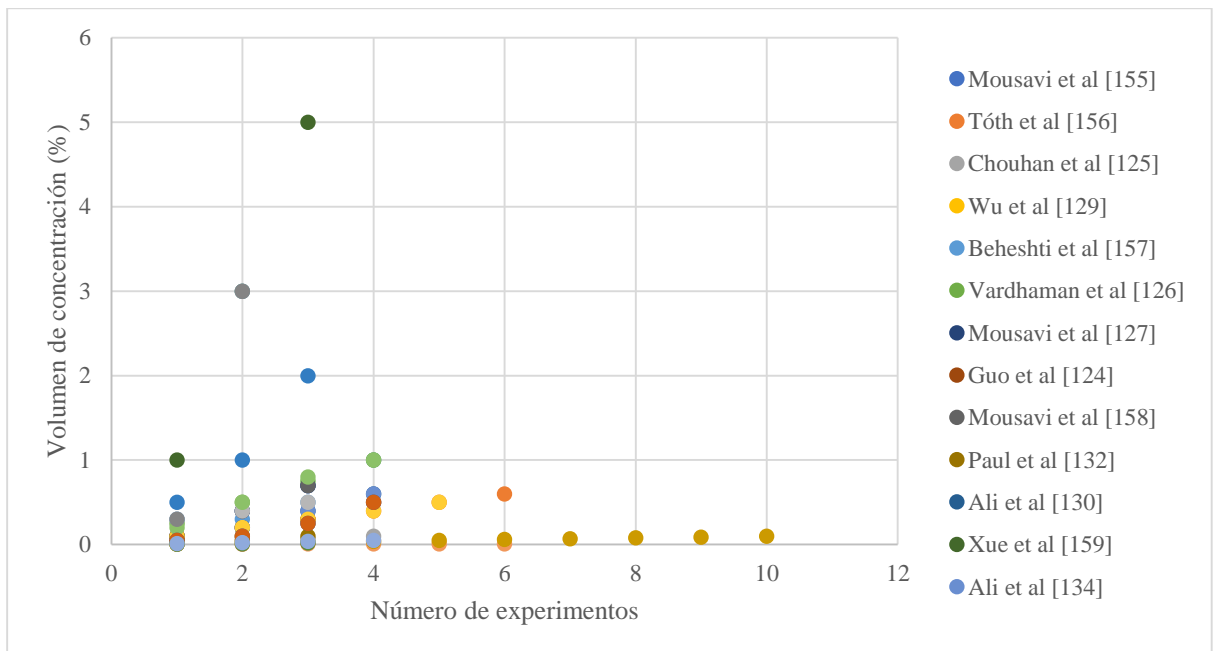


Figura 15: Rangos de concentración aplicados en las investigaciones

Tabla 1: Métodos, proceso de agitación y tiempo de agitación aplicados en las investigaciones

| Autor | Método Utilizado | | Proceso de agitación | Tiempo de agitación |
|------------------------|------------------|---------|----------------------------------|---------------------|
| | Dos pasos | Un paso | | |
| Ali et al. [122] | * | | Ultrasonido/agitación magnética | 6 h |
| Liu et al. [123] | * | | Ultrasonido | 3 h |
| Singh et al.[121] | * | | Ultrasonido | 1.5 h |
| Guo et al. [124] | | * | Ultrasonido | 30 min |
| La et al. [119] | * | | Agitación magnética/ultrasonido | 3 h/12 h |
| Chouchan et al. [125] | | * | Agitación magnética | 8 h |
| Vardhaman et al. [126] | * | | Ultrasonido | 2 h |
| Mousavi et al. [127] | * | | Ultrasonido | 45 min |
| Kaluzny et al. [128] | * | | Ultrasonido | 1 h |
| Mello et al. [29] | | * | Agitación magnética | 7 h |
| Wu et al. [129] | | * | Ultrasonido | 1 h |
| Ali et al. [130] | * | | Agitación magnética | 4 h |
| Wang et al. [131] | * | | Ultrasonido | 1 h |
| Paul et al.[132] | * | | Ultrasonido | 6 h |
| Ghasemi et al. [133] | * | | Agitación magnética/ultrasonido | 15 min/20 min |
| Ali et al. [134] | * | | Agitación magnética | 4 h |
| Ali et al. [135] | * | | Agitación magnética | 4 h |
| Hemmat et al. [136] | * | | Ultrasonido | 3 h |
| Sgroi et al. [17] | * | | Ultrasonido | 5 h |
| Sepyani et al. [137] | * | | Ultrasonido | 5 h |
| Ran et al. [138] | * | | Agitación magnética/Ultrasonido | 20 min/30 min |
| Moghaddam et al. [139] | * | | Ultrasonido | 1 h |
| Wu et al. [140] | * | | Ultrasonido | 40 min |
| Hemmat et al. [141] | * | | Agitación magnética | 2 h |
| Ali et al. [142] | * | | Agitación magnética | 4 h |
| Asadi et al. [143] | * | | Agitación magnética/ Ultrasonido | 2 h/1 h |
| Wu et al. [144] | | * | Agitación magnética | 1 h |
| Zheng et al. [120] | * | | Agitación magnética/ Ultrasonido | 10 min/ 15 min |
| Meng et al. [145] | * | | Ultrasonido | 5 h |
| Mungse et al. [146] | | * | Ultrasonido | 4 h |
| Koshy et al. [105] | | * | Ultrasonido | 1 h |
| Jia et al. [147] | | * | Ultrasonido | 2 h |
| Zin et al. [148] | * | | Ultrasonido | 1 h |
| Arumugam et al. [149] | * | | Ultrasonido | 2 h |
| Wan et al. [150] | * | | Agitador magnético | 30 min |
| Ettefaghi et al. [151] | | * | Ultrasonido | 1 h |
| Ettefaghi et al. [152] | * | | Agitador magnético | 3 h |
| Demas et al. [153] | * | | Ultrasonido | 2 h |
| Eswaraiah et al. [154] | * | | Ultrasonido | 1 h |

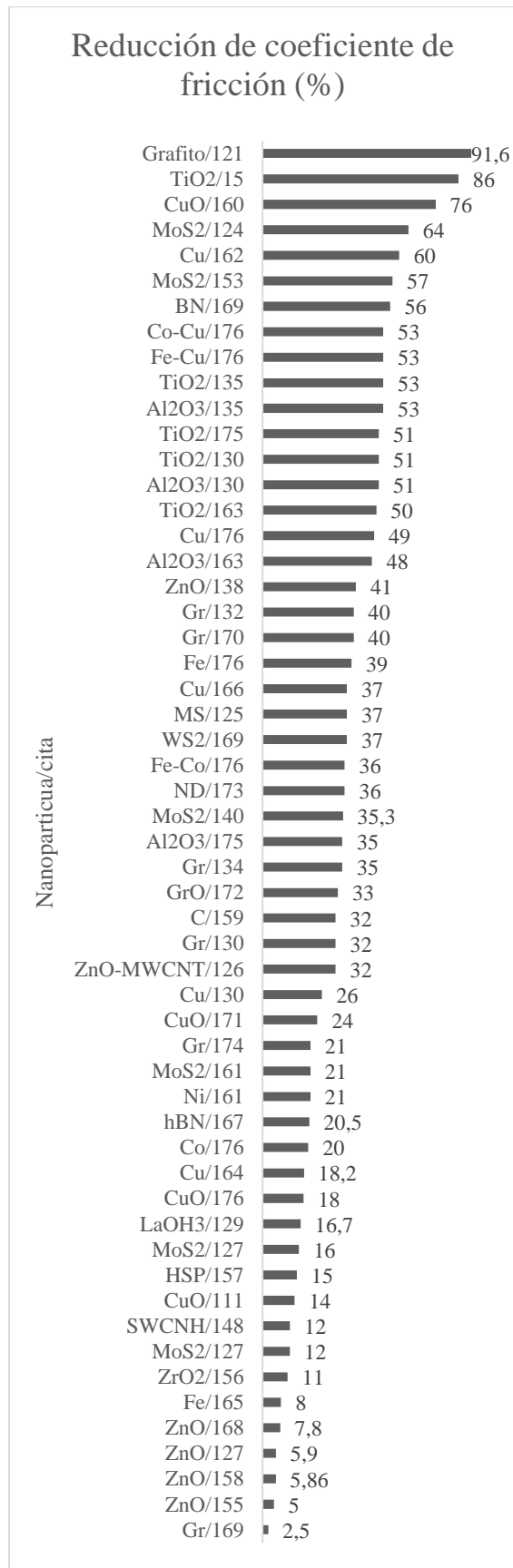


Figura 16: Resultado de las investigaciones

Tabla 2: Concentración efectiva en los autores que usaron más un porcentaje de concentración

| Autor | Concentración efectiva (%) |
|------------------------|----------------------------|
| Mousavi et al [155] | 0,7 |
| Tóth et al [156] | 0,4 |
| Chouhan et al [125] | 0,05 |
| Wu et al [129] | 0,1 |
| Beheshti et al [157] | 0,3 |
| Vardhaman et al [126] | 0,25 |
| Mousavi et al [127] | 0,4 |
| Guo et al [124] | 0,3 |
| Mousavi et al [158] | 0,4 |
| Paul et al [132] | 0,1 |
| Ali et al [130] | 0,4 |
| Xue et al [159] | 3 |
| Ali et al [134] | 0,4 |
| Asnida et al [160] | 0,008 |
| Laad et al [15] | 0,5 |
| Rajendhran et al [161] | 0,5 |
| Borda et al [162] | 0,3 |
| Ran et al [138] | 0,5 |
| Ali et al [163] | 0,25 |
| Ali et al [142] | 0,1 |
| Scherge et al [164] | 3 |
| Jeng et al [165] | 0,07 |
| Peña et al [111] | 2 |
| Zin et al [148] | 0,01 |
| Zhang et al [166] | 0,0375 |

4.3.Lubricantes base

De un total de 63 artículos de alto impacto los lubricantes base más utilizados para las pruebas fueron: SAE 5W-30 con 10 investigaciones lo que representa un 16% del total de artículos, SAE 10W-40 con 7 investigaciones lo que representa un 11% del total de artículos y SAE 20W-50 con 6 investigaciones lo que representa un 10% del total de artículos. Esto debido a que son aceites lubricantes comerciales y comunes en el mercado local.

Además, sus propiedades estándar facilitan la mezcla con la nanopartícula para el posterior estudio de esta (Tabla 4).

Tabla 3: Concentración única utilizada por algunos autores

| Autor | Concentración (%) |
|---------------------------|--------------------------|
| Singh et al [121] | 0,3 |
| Thachnatharen et al [167] | 0,025 |
| Vyavhare et al [168] | 0,33 |
| Charoo et al [169] | 0,5 |
| Avilés et al [170] | 0,5 |
| Mello et al [171] | 0,5 |
| Kamal et al [135] | 0,1 |
| Cheng et al [172] | 0,04 |
| Wu et al [140] | 1 |
| Ivanov et al [173] | 0,016 |
| Rasheed et al [174] | 0,01 |
| Ali et al [175] | 0,25 |
| Padgurskas et al [176] | 0,5 |
| Demas et al [153] | 3 |

Tabla 4: Lubricantes base utilizados en las investigaciones

| Lubricante Base | |
|-----------------------------|-------------------------------------|
| Lubricante | #Articulos |
| Lubrican/PAO 6 | [122] |
| SAE 20W-40 | [123] |
| SAE 30 | [121] |
| Lubrican/aceite de parolina | [124] |
| Lubrican/HD 50 | [119] |
| SAE 10W-40 | [125][126][133][136][143][145][146] |
| SAE 40 | [127][139][148][155] |

| | |
|----------------------------|---|
| SAE 5W-30 | [128][130][132][134][135][17][142][173][163][175] |
| Lubrica/PAO | [29][144][120][147][152] |
| SAE 20W-50 | [129][151][152][167][169][174] |
| Lubrica/Hexadecano | [131] |
| SAE 50 | [137][141] |
| Lubrican/60S N | [138] |
| Lubrican/para fina | [140] |
| Lubrican/500 N | [105] |
| Aceite de colza/SAE 20W-40 | [149] |
| SAE 15W-40 | [150][166] |
| 500W | [154] |
| Lubrican/Gru po III | [156][168] |
| SAE 10W-30 | [157][160][15] |
| Lubrican/Liquido iónico | [170] |
| Aceite Diesel | [158] |
| Lubrican/PAO 40 | [171] |
| SN/GF-5 lubrican | [159] |
| Lubrican/SN 500 | [161][172] |
| Lubrican/Mineral | [162][165] |
| Chevron Taro 30 DP 40 | [164] |
| SAE 75 W-85 | [111] |
| SAE 10 | [176] |

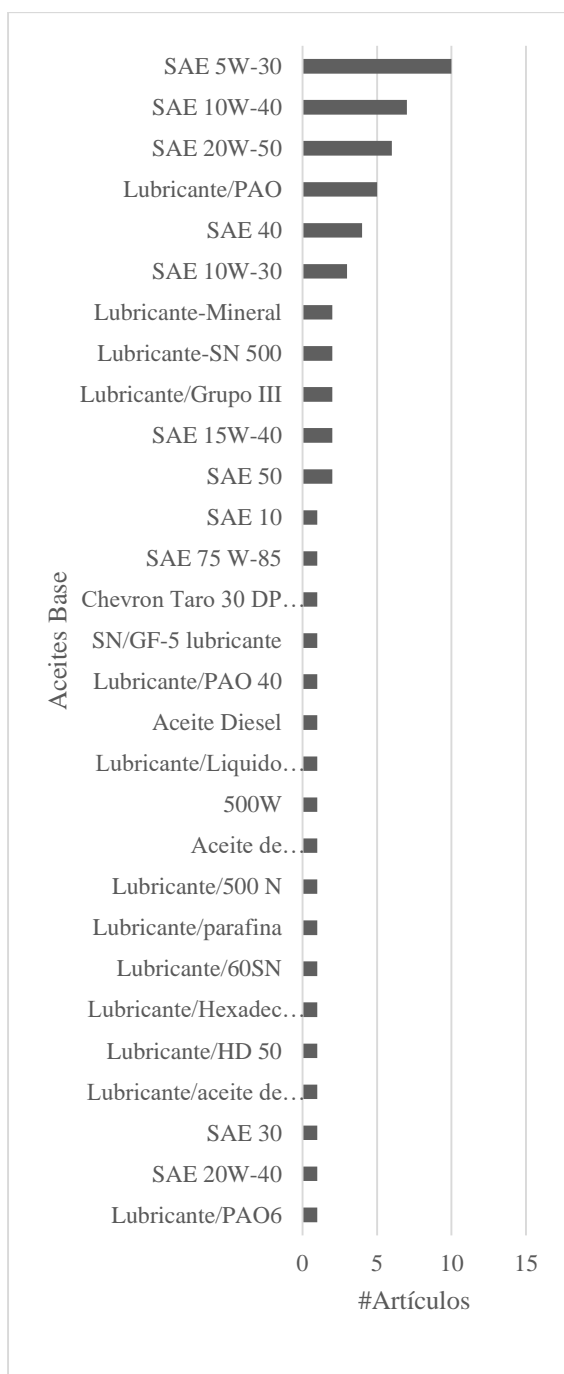


Figura 17: Estadística de aceites base utilizados

4.4. Nano aditivos

De un total de 63 artículos de alto impacto los nano aditivos más utilizados fueron: MoS₂ (Disulfuro de Molibdeno) y ZnO (Óxido de Zinc) con 6 investigaciones cada uno lo que representa un 10% del total de artículos, Gr (Grafeno) y Al₂O₃/TiO₂ (Óxido de Aluminio y Óxido de Titanio)

con 5 investigaciones cada uno lo que representa un 8% del total de artículos (Tabla 5).

Tabla 5: Nano aditivo utilizados en las investigaciones

| Nano aditivo | |
|--|--------------------------------|
| Nano aditivo | #Artículos |
| Al ₂ O ₃ /TiO ₂ | [122][135][142][163][175] |
| MWCNT/TiO ₂ | [123] |
| Grafito | [121] |
| MoS ₂ | [124][17][140][105][150][153] |
| Gr | [119][134][120][170][174] |
| Gr-MS-Zn | [125] |
| ZnO/ MWCNT | [126] |
| ZnO/ MoS ₂ | [127] |
| MWCNT | [128][151][152] |
| CuO | [29][149][171][160] |
| La(OH) ₃ /rGO | [129] |
| Cu/Gr | [130] |
| GO | [131][132][146][154] |
| TiO ₂ | [133][15] |
| ZnO | [136][137][138][144][168][158] |
| MWCNT/CuO | [139] |
| MWCNT/SiO ₂ | [141] |
| MWCNT/ZnO | [143] |
| GO/Ag/ GNP | [145] |
| Cu/rGO | [147] |
| C | [148][159] |
| ZnO/ MoS ₂ | [155] |
| ZrO ₂ | [156] |
| hBN | [167] |
| (BN), (WS ₂), (Gr) | [169] |
| Partículas vellosas de sílice (HSP) | [157] |
| Ni- MoS ₂ | [161] |
| Cu | [162][164][166] |

| | |
|--------------------------------------|-------|
| GrO | [172] |
| ND | [173] |
| Fe (Capsulas carbono) | [165] |
| CuO/ Al2O3 | [111] |
| CuO, Cu, Fe, Co, Fe/Cu, Fe/Co, Co/Cu | [176] |

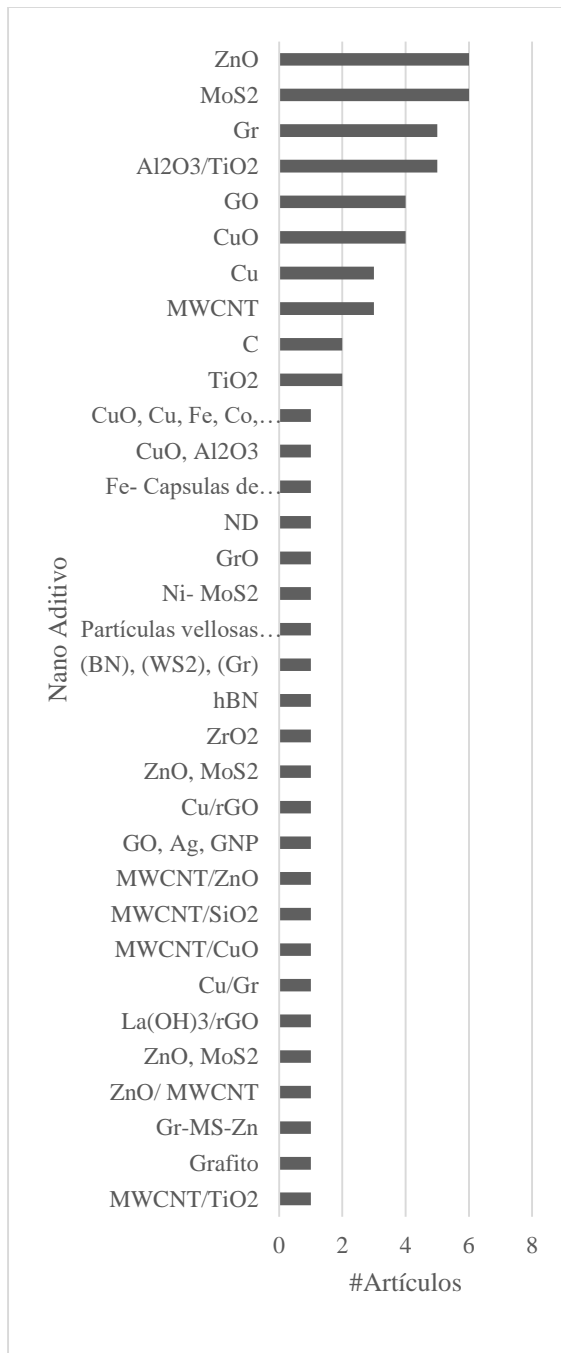


Figura 18: Estadística de nano aditivos utilizados

5. Conclusiones

- Se reviso un total de 176 artículos relacionados con la aplicación de nanopartículas en lubricantes, para la reducción del coeficiente de fricción, estos trabajos se ubican en una en un nivel Q1 y Q2 de impacto, 113 artículos se utilizaron para profundizar el tema de la aplicación de las nanopartículas y 63 investigaciones se consideraron para el análisis de resultados.
- Los procesos para formar un nanolubricante son dos, el método de un paso y el método de dos pasos, posterior a estos métodos, se debe realizar un proceso de dispersión de las nanopartículas en el fluido base, para lo cual, se utilizan las técnicas de vibración ultrasónica y agitación magnética.
- Para la experimentación con nanolubricantes, es necesario controlar su estabilidad. En efecto, para esto se usa las herramientas de espectrofotómetro, potencial Z, SEM/TEM, dispersión de luz, balance de sedimentación y los tres omega. Estas herramientas permiten visualizar la dispersión de las nanopartículas en el fluido base.
- La función vital de la aplicación de nanopartículas en los lubricantes se desempeña en las zonas de fricción con régimen de lubricación limite, pues su tamaño les permite penetrar en las asperezas de la superficie de contacto y reducir el coeficiente de fricción. Por otro lado, si las nanopartículas se adhieren entre sí, al aglomerarse aumentan el desgaste entre las zonas de contacto, por eso es importante controlar la estabilidad del nanolubricante en una experimentación.
- El método de dos pasos es el más utilizado para la preparación de nanolubricantes. El 76,92% de los artículos revisados en el análisis de

- resultados ocupan este proceso, debido a que es más económico que el método de un paso. Así también, la agitación por ultrasonido es la técnica más utilizada en la dispersión de las nanopartículas en el fluido base, representa un 56,41% de aplicación en las investigaciones revisadas en el análisis de resultados.
- Pocos son los investigadores que han conseguido un nanolubricante estable (sin depender del tiempo), pues solo representan el 17,94% de las investigaciones revisadas en el análisis de resultados, frente a un 74,35% de investigadores que han conseguido estabilizar su nanolubricante en un periodo de tiempo. Koshy et al. con su nanolubricante a base de MoS₂, preparado con el método de un paso y agitación ultrasónica, ha conseguido el mayor tiempo de estabilidad con 365 días.
 - El mayor porcentaje de reducción de coeficiente de fricción se le acredita a Singh et al. [127], este autor consigue reducir el coeficiente de fricción en un 91,6%. Así mismo, para su experimentación utilizó nanopartículas de Grafito con un aceite base SAE-30, aplicando el método de preparación de dos pasos y 1,5 h de agitación ultrasónica.
 - Algunos investigadores utilizan un rango de volumen de concentración de nanopartículas en su experimentación. Del total de estos autores, la mayoría trabaja en el rango de 0% a 1% de volumen de concentración, como se muestra en la Figura 15.
 - Los lubricantes base más utilizados en las experimentaciones (Figura 17) son el SAE 5W-30, SAE 10W-40 y SAE 20W-50. Estos lubricantes son de aplicación automotriz, por lo cual, en las investigaciones se mejora las

propiedades tribológicas de estos lubricantes con la intención de disminuir el desgaste en el motor. Sin embargo, las temperaturas a las que se desarrollan las pruebas no son las ideales para el motor de combustión interna y el tiempo de estabilidad de los nanolubricante no garantizan una lubricación óptima para el periodo habitual de mantenimiento del automóvil.

- Los nano aditivos con mayor aplicación en los artículos revisados son ZnO, MoS₂, Gr y Al₂O₃/TiO₂, así se muestra en la Figura 18.

Referencias

- [1] R. A. Pawashe, S. S. Kalkundri, C. B. Chavan, and A. Rammohan, "Fault diagnosis of engine lubrication system," in *2017 International conference on Microelectronic Devices, Circuits and Systems (ICMDCS)*, Aug. 2017, pp. 1–6. doi: 10.1109/ICMDCS.2017.8211690.
- [2] S. M. Daud, M. S. Najib, and N. Zahed, "Classification of lubricant oil odor-profile using case-based reasoning," in *2016 IEEE Conference on Systems, Process and Control (ICSPC)*, Dec. 2016, pp. 207–212. doi: 10.1109/SPC.2016.7920731.
- [3] V. U. Garud *et al.*, "Integrated wireless online oil condition monitoring system for I C engine," in *2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT)*, Mar. 2016, pp. 209–214. doi: 10.1109/ICEEOT.2016.7755038.
- [4] S. Sharma, S. Das, J. Virmani, M. Sharma, S. Singh, and A. Das, "IoT Based Dipstick Type Engine Oil Level and Impurities Monitoring

- System: A Portable Online Spectrophotometer,” in *2019 4th International Conference on Internet of Things: Smart Innovation and Usages (IoT-SIU)*, Apr. 2019, pp. 1–4. doi: 10.1109/IoT-SIU.2019.8777703.
- [5] R. S. Kamal, N. S. Ahmed, and A. M. Nasser, “Study the efficiency of some compounds as lubricating oil additives,” *Applied Petrochemical Research*, vol. 3, no. 1–2, pp. 1–8, Jul. 2013, doi: 10.1007/s13203-012-0020-8.
- [6] M. F. M. Idros, S. Ali, and Md. S. Islam, “Optical behavior of transmission oil lubricant for degradation monitoring,” in *2011 IEEE Student Conference on Research and Development*, Dec. 2011, pp. 225–228. doi: 10.1109/SCOReD.2011.6148740.
- [7] I. Bravo-Imaz, A. Garcia-Arribas, E. Gorritxategi, A. Arnaiz, and J. M. Barandiaran, “Magnetoelastic Viscosity Sensor for On-Line Status Assessment of Lubricant Oils,” *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 49, no. 1, pp. 113–116, Jan. 2013, doi: 10.1109/TMAG.2012.2217117.
- [8] O. S. Kuzema and P. O. Kuzema, “Effect of the duration of car engine operation on the mechanical contaminants in its lubricant,” in *2017 IEEE 7th International Conference Nanomaterials: Application & Properties (NAP)*, Sep. 2017, pp. 01PCSI03-1-01PCSI03-4. doi: 10.1109/NAP.2017.8190142.
- [9] R. Sanga, M. Sivaramakrishna, V. S. Srinivasan, and G. Prabhakara Rao, “Design and Development of Opto-Resistive Type Quasi-digital Sensor and Instrument to In-situ Monitoring of the Quality of Lubricant Oil,” in *2018 15th IEEE India Council International Conference (INDICON)*, Dec. 2018, pp. 1–4. doi: 10.1109/INDICON45594.2018.8986996.
- [10] Y. Li, Y. Zuo, X. Yi, and H. Liu, “Research on Engine Lubricant Detection Technology Based on On-line Visual Technology,” in *2021 IEEE International Conference on Sensing, Diagnostics, Prognostics, and Control (SDPC)*, Aug. 2021, pp. 87–93. doi: 10.1109/SDPC52933.2021.9563580.
- [11] K. Holmberg and A. Erdemir, “The impact of tribology on energy use and CO2 emission globally and in combustion engine and electric cars,” *Tribology International*, vol. 135, pp. 389–396, Jul. 2019, doi: 10.1016/j.triboint.2019.03.024.
- [12] H. YU, Y. XU, P. SHI, B. XU, X. WANG, and Q. LIU, “Tribological properties and lubricating mechanisms of Cu nanoparticles in lubricant,” *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 18, no. 3, pp. 636–641, Jun. 2008, doi: 10.1016/S1003-6326(08)60111-9.
- [13] H. Ghaednia, M. S. Hossain, and R. L. Jackson, “Tribological Performance of Silver Nanoparticle-Enhanced Polyethylene Glycol Lubricants,” *Tribology Transactions*, vol. 59, no. 4, pp. 585–592, Jul. 2016, doi: 10.1080/10402004.2015.1092623.
- [14] L. Das, M. Aggarwal, K. Rajkumar, S. Aravindan, and M. Gupta, “Tribological Properties of Magnesium Nano-Alumina

- Composites under Nano-Graphite Lubrication,” *Tribology Transactions*, vol. 55, no. 3, pp. 334–344, May 2012, doi: 10.1080/10402004.2012.655438.
- [15] M. Laad and V. K. S. Jatti, “Titanium oxide nanoparticles as additives in engine oil,” *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, vol. 30, no. 2, pp. 116–122, Apr. 2018, doi: 10.1016/j.jksues.2016.01.008.
- [16] X. Wu *et al.*, “Investigating the tribological performance of nanosized MoS₂ on graphene dispersion in perfluoropolyether under high vacuum,” *RSC Advances*, vol. 6, no. 101, pp. 98606–98610, 2016, doi: 10.1039/C6RA22863A.
- [17] M. F. Sgroi *et al.*, “Engine bench and road testing of an engine oil containing MoS₂ particles as nano-additive for friction reduction,” *Tribology International*, vol. 105, pp. 317–325, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.triboint.2016.10.013.
- [18] L. Rapoport *et al.*, “Tribological properties of WS₂ nanoparticles under mixed lubrication,” *Wear*, vol. 255, no. 7–12, pp. 785–793, Aug. 2003, doi: 10.1016/S0043-1648(03)00044-9.
- [19] M. A. Kedzierski, “Viscosity and density of aluminum oxide nanolubricant,” *International Journal of Refrigeration*, vol. 36, no. 4, pp. 1333–1340, Jun. 2013, doi: 10.1016/j.ijrefrig.2013.02.017.
- [20] S. Ingole, A. Charanpahari, A. Kakade, S. S. Umare, D. V. Bhatt, and J. Menghani, “Tribological behavior of nano TiO₂ as an additive in base oil,” *Wear*, vol. 301, no. 1–2, pp. 776–785, Apr. 2013, doi: 10.1016/j.wear.2013.01.037.
- [21] T. Koide *et al.*, “Identification of Pseudopolymorphism of Magnesium Stearate by Using Low-Frequency Raman Spectroscopy,” *Organic Process Research & Development*, vol. 20, no. 11, pp. 1906–1910, Nov. 2016, doi: 10.1021/acs.oprd.6b00199.
- [22] C.-G. Lee, Y.-J. Hwang, Y.-M. Choi, J.-K. Lee, C. Choi, and J.-M. Oh, “A study on the tribological characteristics of graphite nano lubricants,” *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, vol. 10, no. 1, pp. 85–90, Jan. 2009, doi: 10.1007/s12541-009-0013-4.
- [23] E. D. Ramón-Raygoza, C. I. Rivera-Solorio, E. Giménez-Torres, D. Maldonado-Cortés, E. Cardenas-Alemán, and R. Cué-Sampedro, “Development of nanolubricant based on impregnated multilayer graphene for automotive applications: Analysis of tribological properties,” *Powder Technology*, vol. 302, pp. 363–371, Nov. 2016, doi: 10.1016/j.powtec.2016.08.072.
- [24] M. Hemmat Esfe, M. Afrand, S. H. Rostamian, and D. Toghraie, “Examination of rheological behavior of MWCNTs/ZnO-SAE40 hybrid nano-lubricants under various temperatures and solid volume fractions,” *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 80, pp. 384–390, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2016.07.011.
- [25] M. Afrand, K. Nazari Najafabadi, and M. Akbari, “Effects of temperature and solid volume

- fraction on viscosity of SiO₂-MWCNTs/SAE40 hybrid nanofluid as a coolant and lubricant in heat engines,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 102, pp. 45–54, Jun. 2016, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.04.002.
- [26] A. Kotia, K. Chowdary, I. Srivastava, S. K. Ghosh, and M. K. A. Ali, “Carbon nanomaterials as friction modifiers in automotive engines: Recent progress and perspectives,” *Journal of Molecular Liquids*, vol. 310, p. 113200, Jul. 2020, doi: 10.1016/j.molliq.2020.113200.
- [27] S. K. Das, N. Putra, P. Thiesen, and W. Roetzel, “Temperature Dependence of Thermal Conductivity Enhancement for Nanofluids,” *Journal of Heat Transfer*, vol. 125, no. 4, pp. 567–574, Aug. 2003, doi: 10.1115/1.1571080.
- [28] N. N. M. Zawawi, W. H. Azmi, and M. F. Ghazali, “Tribological performance of Al₂O₃-SiO₂/PAG composite nanolubricants for application in air-conditioning compressor,” *Wear*, vol. 492–493, p. 204238, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.wear.2022.204238.
- [29] V. S. Mello, E. A. Faria, S. M. Alves, and C. Scandian, “Enhancing Cu nanolubricant performance using dispersing agents,” *Tribology International*, vol. 150, p. 106338, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.triboint.2020.106338.
- [30] J. A. Guaregua M., E. Squitieri, and V. Mujica, “A computational study of the stability ratios of spherical colloidal particles,” *Journal of Molecular Structure: THEOCHEM*, vol. 769, no. 1–3, pp. 165–170, Sep. 2006, doi: 10.1016/j.theochem.2006.04.029.
- [31] L. Yang, W. Ji, M. Mao, and J. Huang, “An updated review on the properties, fabrication and application of hybrid-nanofluids along with their environmental effects,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 257, p. 120408, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120408.
- [32] Y. Chen, P. Renner, and H. Liang, “Dispersion of Nanoparticles in Lubricating Oil: A Critical Review,” *Lubricants*, vol. 7, no. 1, p. 7, Jan. 2019, doi: 10.3390/lubricants7010007.
- [33] N. F. Azman and S. Samion, “Dispersion Stability and Lubrication Mechanism of Nanolubricants: A Review,” *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, vol. 6, no. 2, pp. 393–414, Apr. 2019, doi: 10.1007/s40684-019-00080-x.
- [34] M. T. Jamal-Abad, A. Zamzamian, and M. Dehghan, “Experimental studies on the heat transfer and pressure drop characteristics of Cu-water and Al-water nanofluids in a spiral coil,” *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 47, pp. 206–212, May 2013, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2013.02.001.
- [35] J. Zhang, R. Cao, W. Song, L. Liu, and J. Li, “One-step method to prepare core-shell magnetic nanocomposite encapsulating silver nanoparticles with superior catalytic and antibacterial activity,” *Journal of Colloid and Interface Science*, vol.

- 607, pp. 1730–1740, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.jcis.2021.09.053.
- [36] L. Xu, H. Liu, H. Zhou, and M. Hong, “One-step fabrication of metal nanoparticles on polymer film by femtosecond LIPAA method for SERS detection,” *Talanta*, vol. 228, p. 122204, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.talanta.2021.122204.
- [37] W. Yu, D. M. France, J. L. Routbort, and S. U. S. Choi, “Review and Comparison of Nanofluid Thermal Conductivity and Heat Transfer Enhancements,” *Heat Transfer Engineering*, vol. 29, no. 5, pp. 432–460, May 2008, doi: 10.1080/01457630701850851.
- [38] C.-H. Lo, T.-T. Tsung, L.-C. Chen, C.-H. Su, and H.-M. Lin, “Fabrication of copper oxide nanofluid using submerged arc nanoparticle synthesis system (SANSS),” *Journal of Nanoparticle Research*, vol. 7, no. 2–3, pp. 313–320, Jun. 2005, doi: 10.1007/s11051-004-7770-x.
- [39] C.-H. Lo, T.-T. Tsung, and L.-C. Chen, “Shape-controlled synthesis of Cu-based nanofluid using submerged arc nanoparticle synthesis system (SANSS),” *Journal of Crystal Growth*, vol. 277, no. 1–4, pp. 636–642, Apr. 2005, doi: 10.1016/j.jcrysgro.2005.01.067.
- [40] M. Kim, S. Osone, T. Kim, H. Higashi, and T. Seto, “Synthesis of Nanoparticles by Laser Ablation: A Review,” *KONA Powder and Particle Journal*, vol. 34, no. 0, pp. 80–90, 2017, doi: 10.14356/kona.2017009.
- [41] P. LIU, W. CAI, L. WAN, M. SHI, X. LUO, and W. JING, “Fabrication and characteristics of rutile TiO₂ nanoparticles induced by laser ablation,” *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 19, pp. s743–s747, Dec. 2009, doi: 10.1016/S1003-6326(10)60143-4.
- [42] C. H. Liang, Y. Shimizu, T. Sasaki, and N. Koshizaki, “Preparation of ultrafine TiO₂ nanocrystals via pulsed-laser ablation of titanium metal in surfactant solution,” *Applied Physics A*, vol. 80, no. 4, pp. 819–822, Feb. 2005, doi: 10.1007/s00339-003-2489-6.
- [43] J. Cao *et al.*, “The influence of aluminum nanoparticles on the laser ablation characteristics of hydroxylamine nitrate-based liquid propellants,” *Acta Astronautica*, May 2022, doi: 10.1016/j.actaastro.2022.05.019.
- [44] H. Chang, C. S. Jwo, C. H. Lo, M. J. Kao, and S. H. Pai, “A study of process optimization using the combined submerged arc nanoparticle synthesis system for preparing TiO₂ nanoparticle suspension,” *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 434–435, pp. 668–671, May 2007, doi: 10.1016/j.jallcom.2006.08.221.
- [45] L.-C. Chen, “Preparation of TiO₂ nanoparticles by submerged arc nanoparticle synthesis system,” *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 495, no. 2, pp. 476–480, Apr. 2010, doi: 10.1016/j.jallcom.2009.10.215.
- [46] H. Chang and M.-K. Liu, “Fabrication and process analysis of anatase type TiO₂ nanofluid by an arc spray nanofluid synthesis system,” *Journal of Crystal Growth*, vol. 304, no. 1, pp. 244–252, Jun.

- 2007, doi: 10.1016/j.jcrysgro.2007.02.009.
- [47] M. A. Khan *et al.*, “Interface study of hybrid CuO nanoparticles embedded ZnO nanowires heterojunction synthesized by controlled vapor deposition approach for optoelectronic devices,” *Opt Mater (Amst)*, vol. 117, p. 111132, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.optmat.2021.111132.
- [48] L. M. Hoyos-Palacio *et al.*, “Compounds of carbon nanotubes decorated with silver nanoparticles via in-situ by chemical vapor deposition (CVD),” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 8, no. 6, pp. 5893–5898, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.jmrt.2019.09.062.
- [49] H. Ali, H. Babar, T. Shah, M. Sajid, M. Qasim, and S. Javed, “Preparation Techniques of TiO₂ Nanofluids and Challenges: A Review,” *Applied Sciences*, vol. 8, no. 4, p. 587, Apr. 2018, doi: 10.3390/app8040587.
- [50] J. Chen, C. Y. Zhao, and B. X. Wang, “Effect of nanoparticle aggregation on the thermal radiation properties of nanofluids: an experimental and theoretical study,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 154, p. 119690, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119690.
- [51] A. Tarafdar *et al.*, “Nanofluid research advances: Preparation, characteristics and applications in food processing,” *Food Research International*, vol. 150, p. 110751, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.foodres.2021.110751.
- [52] W. Yu and H. Xie, “A Review on Nanofluids: Preparation, Stability Mechanisms, and Applications,” *Journal of Nanomaterials*, vol. 2012, pp. 1–17, 2012, doi: 10.1155/2012/435873.
- [53] Supiyani, H. Agusnar, P. Sugita, and I. Nainggolan, “Preparation sodium silicate from rice husk to synthesize silica nanoparticles by sol-gel method for adsorption water in analysis of methamphetamine,” *South African Journal of Chemical Engineering*, vol. 40, pp. 80–86, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.sajce.2022.02.001.
- [54] S. A. Khan *et al.*, “Photocatalytic degradation of methyl orange by cadmium oxide nanoparticles synthesized by the sol-gel method,” *Optik (Stuttg)*, vol. 251, p. 168401, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.ijleo.2021.168401.
- [55] B. Shojaei, R. Miri, A. Bazyari, and L. T. Thompson, “Asphaltene adsorption on MgO, CaO, SiO₂, and Al₂O₃ nanoparticles synthesized via the Pechini-type Sol–Gel method,” *Fuel*, vol. 321, p. 124136, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.fuel.2022.124136.
- [56] M. A. Behnajady, H. Eskandarloo, N. Modirshahla, and M. Shokri, “Investigation of the effect of sol–gel synthesis variables on structural and photocatalytic properties of TiO₂ nanoparticles,” *Desalination*, vol. 278, no. 1–3, pp. 10–17, Sep. 2011, doi: 10.1016/j.desal.2011.04.019.
- [57] A. v. Sadetskaya, N. P. Bobrysheva, M. G. Osmolowsky, O. M. Osmolovskaya, and M. A. Voznesenskiy, “Correlative experimental and theoretical characterization of transition metal doped hydroxyapatite nanoparticles fabricated by hydrothermal method,”

- Materials Characterization*, vol. 173, p. 110911, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.matchar.2021.110911.
- [58] Y. X. Zhang, G. H. Li, Y. X. Jin, Y. Zhang, J. Zhang, and L. D. Zhang, "Hydrothermal synthesis and photoluminescence of TiO₂ nanowires," *Chemical Physics Letters*, vol. 365, no. 3–4, pp. 300–304, Oct. 2002, doi: 10.1016/S0009-2614(02)01499-9.
- [59] Y. Suzuki and S. Yoshikawa, "Synthesis and Thermal Analyses of TiO₂-Derived Nanotubes Prepared by the Hydrothermal Method," *Journal of Materials Research*, vol. 19, no. 4, pp. 982–985, Apr. 2004, doi: 10.1557/JMR.2004.0128.
- [60] Y. X. Gan, A. H. Jayatissa, Z. Yu, X. Chen, and M. Li, "Hydrothermal Synthesis of Nanomaterials," *Journal of Nanomaterials*, vol. 2020, pp. 1–3, Jan. 2020, doi: 10.1155/2020/8917013.
- [61] W. Duangthongsuk and S. Wongwises, "Heat transfer enhancement and pressure drop characteristics of TiO₂-water nanofluid in a double-tube counter flow heat exchanger," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 52, no. 7–8, pp. 2059–2067, Mar. 2009, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2008.10.023.
- [62] S. M. S. Murshed, K. C. Leong, and C. Yang, "Enhanced thermal conductivity of TiO₂-water based nanofluids," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 44, no. 4, pp. 367–373, Apr. 2005, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2004.12.005.
- [63] S. Mo, Y. Chen, L. Jia, and X. Luo, "Investigation on crystallization of TiO₂-water nanofluids and deionized water," *Applied Energy*, vol. 93, pp. 65–70, May 2012, doi: 10.1016/j.apenergy.2011.07.014.
- [64] B. Tajik, A. Abbassi, M. Saffar-Avval, and M. A. Najafabadi, "Ultrasonic properties of suspensions of TiO₂ and Al₂O₃ nanoparticles in water," *Powder Technology*, vol. 217, pp. 171–176, Feb. 2012, doi: 10.1016/j.powtec.2011.10.024.
- [65] M. Leena and S. Srinivasan, "Synthesis and ultrasonic investigations of titanium oxide nanofluids," *Journal of Molecular Liquids*, vol. 206, pp. 103–109, Jun. 2015, doi: 10.1016/j.molliq.2015.02.001.
- [66] A. O. Imarah *et al.*, "Magnetically Agitated Nanoparticle-Based Batch Reactors for Biocatalysis with Immobilized Aspartate Ammonia-Lyase," *Catalysts*, vol. 11, no. 4, p. 483, Apr. 2021, doi: 10.3390/catal11040483.
- [67] S. H. Kim, S. R. Choi, and D. Kim, "Thermal Conductivity of Metal-Oxide Nanofluids: Particle Size Dependence and Effect of Laser Irradiation," *Journal of Heat Transfer*, vol. 129, no. 3, pp. 298–307, Mar. 2007, doi: 10.1115/1.2427071.
- [68] R. Saleh, N. Putra, R. E. Wibowo, W. N. Septiadi, and S. P. Prakoso, "Titanium dioxide nanofluids for heat transfer applications," *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 52, pp. 19–29, Jan. 2014, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2013.08.018.
- [69] S. Chakraborty, I. Sarkar, D. K. Behera, S. K. Pal, and S.

- Chakraborty, “Experimental investigation on the effect of dispersant addition on thermal and rheological characteristics of TiO₂ nanofluid,” *Powder Technology*, vol. 307, pp. 10–24, Feb. 2017, doi: 10.1016/j.powtec.2016.11.016.
- [70] D. Wen and Y. Ding, “Formulation of nanofluids for natural convective heat transfer applications,” *International Journal of Heat and Fluid Flow*, vol. 26, no. 6, pp. 855–864, Dec. 2005, doi: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2005.10.005.
- [71] S. Bhambi and V. K. Agarwal, “Sub Atmospheric Pool Boiling and Experimental Heat Transfer of Alumina Nanofluids,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 18, pp. 1495–1509, 2019, doi: 10.1016/j.matpr.2019.06.619.
- [72] X.-Q. Wang and A. S. Mujumdar, “Heat transfer characteristics of nanofluids: a review,” *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 46, no. 1, pp. 1–19, Jan. 2007, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2006.06.010.
- [73] K. Khanafer, K. Vafai, and M. Lightstone, “Buoyancy-driven heat transfer enhancement in a two-dimensional enclosure utilizing nanofluids,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 46, no. 19, pp. 3639–3653, Sep. 2003, doi: 10.1016/S0017-9310(03)00156-X.
- [74] B. Wei, C. Zou, and X. Li, “Experimental investigation on stability and thermal conductivity of diathermic oil based TiO₂ nanofluids,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 104, pp. 537–543, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.08.078.
- [75] X. Shao, Y. Chen, S. Mo, Z. Cheng, and T. Yin, “Dispersion Stability of TiO₂-H₂O Nanofluids Containing Mixed Nanotubes and Nanosheets,” *Energy Procedia*, vol. 75, pp. 2049–2054, Aug. 2015, doi: 10.1016/j.egypro.2015.07.282.
- [76] A. Ghadimi, R. Saidur, and H. S. C. Metselaar, “A review of nanofluid stability properties and characterization in stationary conditions,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 54, no. 17–18, pp. 4051–4068, Aug. 2011, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.04.014.
- [77] Y. Hwang *et al.*, “Stability and thermal conductivity characteristics of nanofluids,” *Thermochimica Acta*, vol. 455, no. 1–2, pp. 70–74, Apr. 2007, doi: 10.1016/j.tca.2006.11.036.
- [78] Z.-Q. Liu, J. Ma, and Y.-H. Cui, “Carbon nanotube supported platinum catalysts for the ozonation of oxalic acid in aqueous solutions,” *Carbon N Y*, vol. 46, no. 6, pp. 890–897, May 2008, doi: 10.1016/j.carbon.2008.02.018.
- [79] K. Deng, S. Chen, and H. Song, “Chiral recognition of tryptophan enantiomers with UV–Vis spectrophotometry approach by using L-cysteine modified ZnFe₂O₄ nanoparticles in the presence of Cu²⁺,” *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, vol. 270, p. 120847, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.saa.2021.120847.

- [80] K. Lee, Y. Hwang, S. Cheong, L. Kwon, S. Kim, and J. Lee, "Performance evaluation of nanolubricants of fullerene nanoparticles in refrigeration mineral oil," *Current Applied Physics*, vol. 9, no. 2, pp. e128–e131, Mar. 2009, doi: 10.1016/j.cap.2008.12.054.
- [81] L. Jiang, L. Gao, and J. Sun, "Production of aqueous colloidal dispersions of carbon nanotubes," *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 260, no. 1, pp. 89–94, Apr. 2003, doi: 10.1016/S0021-9797(02)00176-5.
- [82] D. Lee, J.-W. Kim, and B. G. Kim, "A New Parameter to Control Heat Transport in Nanofluids: Surface Charge State of the Particle in Suspension," *The Journal of Physical Chemistry B*, vol. 110, no. 9, pp. 4323–4328, Mar. 2006, doi: 10.1021/jp057225m.
- [83] X. Wang, D. Zhu, and S. yang, "Investigation of pH and SDBS on enhancement of thermal conductivity in nanofluids," *Chemical Physics Letters*, vol. 470, no. 1–3, pp. 107–111, Feb. 2009, doi: 10.1016/j.cplett.2009.01.035.
- [84] J.-H. Lee *et al.*, "Effective viscosities and thermal conductivities of aqueous nanofluids containing low volume concentrations of Al₂O₃ nanoparticles," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 51, no. 11–12, pp. 2651–2656, Jun. 2008, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.10.026.
- [85] P. Keblinski, J. A. Eastman, and D. G. Cahill, "Nanofluids for thermal transport," *Materials Today*, vol. 8, no. 6, pp. 36–44, Jun. 2005, doi: 10.1016/S1369-7021(05)70936-6.
- [86] X. Wei, H. Zhu, T. Kong, and L. Wang, "Synthesis and thermal conductivity of Cu₂O nanofluids," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 52, no. 19–20, pp. 4371–4374, Sep. 2009, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.03.073.
- [87] W. Xian-Ju and L. Xin-Fang, "Influence of pH on Nanofluids' Viscosity and Thermal Conductivity," *Chinese Physics Letters*, vol. 26, no. 5, p. 056601, May 2009, doi: 10.1088/0256-307X/26/5/056601.
- [88] M.-S. Liu, M. Ching-Cheng Lin, I.-T. Huang, and C.-C. Wang, "Enhancement of thermal conductivity with carbon nanotube for nanofluids," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 32, no. 9, pp. 1202–1210, Oct. 2005, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2005.05.005.
- [89] M.-S. Liu, M. C.-C. Lin, C. Y. Tsai, and C.-C. Wang, "Enhancement of thermal conductivity with Cu for nanofluids using chemical reduction method," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 49, no. 17–18, pp. 3028–3033, Aug. 2006, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.02.012.
- [90] K. S. Hong, T.-K. Hong, and H.-S. Yang, "Thermal conductivity of Fe nanofluids depending on the cluster size of nanoparticles," *Applied Physics Letters*, vol. 88, no. 3, p. 031901, Jan. 2006, doi: 10.1063/1.2166199.

- [91] Y. Chan *et al.*, “Blue semiconductor nanocrystal laser,” *Applied Physics Letters*, vol. 86, no. 7, p. 073102, 2005, doi: 10.1063/1.1863445.
- [92] Z. Hajjar, A. morad Rashidi, and A. Ghozatloo, “Enhanced thermal conductivities of graphene oxide nanofluids,” *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 57, pp. 128–131, Oct. 2014, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2014.07.018.
- [93] X. Wei and L. Wang, “Synthesis and thermal conductivity of microfluidic copper nanofluids,” *Particuology*, vol. 8, no. 3, pp. 262–271, Jun. 2010, doi: 10.1016/j.partic.2010.03.001.
- [94] H. Zhu, C. Zhang, Y. Tang, J. Wang, B. Ren, and Y. Yin, “Preparation and thermal conductivity of suspensions of graphite nanoparticles,” *Carbon N Y*, vol. 45, no. 1, pp. 226–228, Jan. 2007, doi: 10.1016/j.carbon.2006.07.005.
- [95] D.-W. Oh, A. Jain, J. K. Eaton, K. E. Goodson, and J. S. Lee, “Thermal conductivity measurement and sedimentation detection of aluminum oxide nanofluids by using the 3ω method,” *International Journal of Heat and Fluid Flow*, vol. 29, no. 5, pp. 1456–1461, Oct. 2008, doi: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2008.04.007.
- [96] H. Wang and M. Sen, “Analysis of the 3-omega method for thermal conductivity measurement,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 52, no. 7–8, pp. 2102–2109, Mar. 2009, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2008.10.020.
- [97] M. K. Ahmed Ali, H. Xianjun, F. A. Essa, M. A. A. Abdelkareem, A. Elagouz, and S. W. Sharshir, “Friction and Wear Reduction Mechanisms of the Reciprocating Contact Interfaces Using Nanolubricant Under Different Loads and Speeds,” *Journal of Tribology*, vol. 140, no. 5, Sep. 2018, doi: 10.1115/1.4039720.
- [98] Y. Liu, X. Ge, and J. Li, “Graphene lubrication,” *Applied Materials Today*, vol. 20, p. 100662, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.apmt.2020.100662.
- [99] P. Rabaso *et al.*, “Boundary lubrication: Influence of the size and structure of inorganic fullerene-like MoS₂ nanoparticles on friction and wear reduction,” *Wear*, vol. 320, pp. 161–178, Dec. 2014, doi: 10.1016/j.wear.2014.09.001.
- [100] A. Greco, K. Mistry, V. Sista, O. Eryilmaz, and A. Erdemir, “Friction and wear behaviour of boron based surface treatment and nano-particle lubricant additives for wind turbine gearbox applications,” *Wear*, vol. 271, no. 9–10, pp. 1754–1760, Jul. 2011, doi: 10.1016/j.wear.2010.11.060.
- [101] A. Hernandez Battez, J. E. Fernandez Rico, A. Navas Arias, J. L. Viesca Rodriguez, R. Chou Rodriguez, and J. M. Diaz Fernandez, “The tribological behaviour of ZnO nanoparticles as an additive to PAO6,” *Wear*, vol. 261, no. 3–4, pp. 256–263, Aug. 2006, doi: 10.1016/j.wear.2005.10.001.
- [102] A. Hernández Battez *et al.*, “Wear prevention behaviour of nanoparticle suspension under extreme pressure conditions,” *Wear*, vol. 263, no. 7–

- 12, pp. 1568–1574, Sep. 2007, doi: 10.1016/j.wear.2007.01.093.
- [103] A. Hernández Battez *et al.*, “CuO, ZrO₂ and ZnO nanoparticles as antiwear additive in oil lubricants,” *Wear*, vol. 265, no. 3–4, pp. 422–428, Jul. 2008, doi: 10.1016/j.wear.2007.11.013.
- [104] Y. Cho *et al.*, “Synergistic effect of a coating and nano-oil lubricant on the tribological properties of friction surfaces,” *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, vol. 13, no. 1, pp. 97–102, Jan. 2012, doi: 10.1007/s12541-012-0013-7.
- [105] C. P. Koshy, P. K. Rajendrakumar, and M. V. Thottackkad, “Evaluation of the tribological and thermo-physical properties of coconut oil added with MoS₂ nanoparticles at elevated temperatures,” *Wear*, vol. 330–331, pp. 288–308, May 2015, doi: 10.1016/j.wear.2014.12.044.
- [106] T. Luo, X. Wei, X. Huang, L. Huang, and F. Yang, “Tribological properties of Al₂O₃ nanoparticles as lubricating oil additives,” *Ceramics International*, vol. 40, no. 5, pp. 7143–7149, Jun. 2014, doi: 10.1016/j.ceramint.2013.12.050.
- [107] T. Sui, B. Song, F. Zhang, and Q. Yang, “Effect of Particle Size and Ligand on the Tribological Properties of Amino Functionalized Hairy Silica Nanoparticles as an Additive to Polyalphaolefin,” *Journal of Nanomaterials*, vol. 2015, pp. 1–9, 2015, doi: 10.1155/2015/492401.
- [108] M. V. Thottackkad, R. K. Perikinalil, and P. N. Kumarapillai, “Experimental evaluation on the tribological properties of coconut oil by the addition of CuO nanoparticles,” *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, vol. 13, no. 1, pp. 111–116, Jan. 2012, doi: 10.1007/s12541-012-0015-5.
- [109] S. S. N. Azman, N. W. M. Zulkifli, H. Masjuki, M. Gulzar, and R. Zahid, “Study of tribological properties of lubricating oil blend added with graphene nanoplatelets,” *Journal of Materials Research*, vol. 31, no. 13, pp. 1932–1938, Jul. 2016, doi: 10.1557/jmr.2016.24.
- [110] J. Schiøtz and K. W. Jacobsen, “A Maximum in the Strength of Nanocrystalline Copper,” *Science (1979)*, vol. 301, no. 5638, pp. 1357–1359, Sep. 2003, doi: 10.1126/science.1086636.
- [111] L. Peña-Parás, J. Taha-Tijerina, L. Garza, D. Maldonado-Cortés, R. Michalczewski, and C. Lapray, “Effect of CuO and Al₂O₃ nanoparticle additives on the tribological behavior of fully formulated oils,” *Wear*, vol. 332–333, pp. 1256–1261, May 2015, doi: 10.1016/j.wear.2015.02.038.
- [112] L. Joly-Pottuz, B. Vacher, N. Ohmae, J. M. Martin, and T. Epicier, “Antiwear and Friction Reducing Mechanisms of Carbon Nano-onions as Lubricant Additives,” *Tribology Letters*, vol. 30, no. 1, pp. 69–80, Apr. 2008, doi: 10.1007/s11249-008-9316-3.
- [113] L. Kolodziejczyk, D. Martínez-Martínez, T. C. Rojas, A. Fernández, and J. C. Sánchez-López, “Surface-modified Pd nanoparticles as a superior additive for lubrication,” *Journal of Nanoparticle Research*, vol. 9, no. 4, pp. 639–645, Aug.

- 2007, doi: 10.1007/s11051-006-9124-3.
- [114] D. Peng, C. Chen, Y. Kang, Y. Chang, and S. Chang, "Size effects of SiO₂ nanoparticles as oil additives on tribology of lubricant," *Industrial Lubrication and Tribology*, vol. 62, no. 2, pp. 111–120, Mar. 2010, doi: 10.1108/00368791011025656.
- [115] D. Peng, Y. Kang, S. Chen, F. Shu, and Y. Chang, "Dispersion and tribological properties of liquid paraffin with added aluminum nanoparticles," *Industrial Lubrication and Tribology*, vol. 62, no. 6, pp. 341–348, Sep. 2010, doi: 10.1108/00368791011076236.
- [116] M. Akbulut, "Nanoparticle-Based Lubrication Systems," *Journal of Powder Metallurgy and Mining*, vol. 01, no. 01, 2012, doi: 10.4172/2168-9806.1000e101.
- [117] R. Chou, A. H. Battez, J. J. Cabello, J. L. Viesca, A. Osorio, and A. Sagastume, "Tribological behavior of polyalphaolefin with the addition of nickel nanoparticles," *Tribology International*, vol. 43, no. 12, pp. 2327–2332, Dec. 2010, doi: 10.1016/j.triboint.2010.08.006.
- [118] J. L. Viesca, A. Hernández Battez, R. González, R. Chou, and J. J. Cabello, "Antiwear properties of carbon-coated copper nanoparticles used as an additive to a polyalphaolefin," *Tribology International*, vol. 44, no. 7–8, pp. 829–833, Jul. 2011, doi: 10.1016/j.triboint.2011.02.006.
- [119] D. D. La *et al.*, "Scalable Fabrication of Modified Graphene Nanoplatelets as an Effective Additive for Engine Lubricant Oil," *Nanomaterials*, vol. 10, no. 5, p. 877, May 2020, doi: 10.3390/nano10050877.
- [120] D. Zheng, Z. Cai, M. Shen, Z. Li, and M. Zhu, "Investigation of the tribology behaviour of the graphene nanosheets as oil additives on textured alloy cast iron surface," *Applied Surface Science*, vol. 387, pp. 66–75, Nov. 2016, doi: 10.1016/j.apsusc.2016.06.080.
- [121] J. P. Singh, S. Singh, T. Nandi, and S. K. Ghosh, "Development of graphitic lubricant nanoparticles based nanolubricant for automotive applications: Thermophysical and tribological properties followed by IC engine performance," *Powder Technology*, vol. 387, pp. 31–47, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.powtec.2021.04.010.
- [122] M. K. A. Ali and H. Xianjun, "Role of bis(2-ethylhexyl) phosphate and Al₂O₃/TiO₂ hybrid nanomaterials in improving the dispersion stability of nanolubricants," *Tribology International*, vol. 155, p. 106767, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.triboint.2020.106767.
- [123] K. Liu, Y. Zhang, F. Dai, and W. Sun, "Improved heat transfer of the engine oil by changing it to hybrid nanofluid: Adding hybrid nanopowders," *Powder Technology*, vol. 383, pp. 56–64, May 2021, doi: 10.1016/j.powtec.2021.01.005.
- [124] Guo *et al.*, "The Application of Nano-MoS₂ Quantum Dots as Liquid Lubricant Additive for Tribological Behavior Improvement," *Nanomaterials*, vol. 10, no. 2, p. 200, Jan. 2020, doi: 10.3390/nano10020200.
- [125] A. Chouhan, T. K. Sarkar, S. Kumari, S. Vemuluri, and O. P. Khatri, "Synergistic lubrication performance by incommensurately stacked ZnO-

- decorated reduced graphene oxide/MoS₂ heterostructure,” *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 580, pp. 730–739, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.jcis.2020.07.033.
- [126] B. S. A. Vardhaman, M. Amarnath, J. Ramkumar, and K. Mondal, “Enhanced tribological performances of zinc oxide/MWCNTs hybrid nanomaterials as the effective lubricant additive in engine oil,” *Materials Chemistry and Physics*, vol. 253, p. 123447, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.matchemphys.2020.123447.
- [127] S. B. Mousavi, S. Z. Heris, and P. Estellé, “Experimental comparison between ZnO and MoS₂ nanoparticles as additives on performance of diesel oil-based nano lubricant,” *Scientific Reports*, vol. 10, no. 1, p. 5813, Dec. 2020, doi: 10.1038/s41598-020-62830-1.
- [128] J. Kałużny *et al.*, “Reducing friction and engine vibrations with trace amounts of carbon nanotubes in the lubricating oil,” *Tribology International*, vol. 151, p. 106484, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.triboint.2020.106484.
- [129] B. Wu, H. Song, C. Li, R. Song, T. Zhang, and X. Hu, “Enhanced tribological properties of diesel engine oil with Nano-Lanthanum hydroxide/reduced graphene oxide composites,” *Tribology International*, vol. 141, p. 105951, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.triboint.2019.105951.
- [130] M. K. A. Ali, X. Hou, and M. A. A. Abdelkareem, “Anti-wear properties evaluation of frictional sliding interfaces in automobile engines lubricated by copper/graphene nanolubricants,” *Friction*, vol. 8, no. 5, pp. 905–916, Oct. 2020, doi: 10.1007/s40544-019-0308-0.
- [131] W. Wang, G. Zhang, and G. Xie, “Ultralow concentration of graphene oxide nanosheets as oil-based lubricant additives,” *Applied Surface Science*, vol. 498, p. 143683, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.apsusc.2019.143683.
- [132] G. Paul, S. Shit, H. Hirani, T. Kuila, and N. C. Murmu, “Tribological behavior of dodecylamine functionalized graphene nanosheets dispersed engine oil nanolubricants,” *Tribology International*, vol. 131, pp. 605–619, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.triboint.2018.11.012.
- [133] R. Ghasemi, A. Fazlali, and A. H. Mohammadi, “Effects of TiO₂ nanoparticles and oleic acid surfactant on the rheological behavior of engine lubricant oil,” *Journal of Molecular Liquids*, vol. 268, pp. 925–930, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.molliq.2018.07.002.
- [134] M. K. A. Ali, H. Xianjun, M. A. A. Abdelkareem, M. Gulzar, and A. H. Elsheikh, “Novel approach of the graphene nanolubricant for energy saving via anti-friction/wear in automobile engines,” *Tribology International*, vol. 124, pp. 209–229, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.triboint.2018.04.004.
- [135] M. K. A. Ali *et al.*, “Fuel economy in gasoline engines using Al₂O₃/TiO₂ nanomaterials as nanolubricant additives,” *Applied Energy*, vol. 211, pp. 461–478, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.11.013.

- [136] M. Hemmat Esfe, S. Saedodin, M. Rejvani, and J. Shahram, "Experimental investigation, model development and sensitivity analysis of rheological behavior of ZnO/10W40 nano-lubricants for automotive applications," *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, vol. 90, pp. 194–203, Jun. 2017, doi: 10.1016/j.physe.2017.02.015.
- [137] K. Sepyani, M. Afrand, and M. Hemmat Esfe, "An experimental evaluation of the effect of ZnO nanoparticles on the rheological behavior of engine oil," *Journal of Molecular Liquids*, vol. 236, pp. 198–204, Jun. 2017, doi: 10.1016/j.molliq.2017.04.016.
- [138] X. Ran, X. Yu, and Q. Zou, "Effect of Particle Concentration on Tribological Properties of ZnO Nanofluids," *Tribology Transactions*, vol. 60, no. 1, pp. 154–158, Jan. 2017, doi: 10.1080/10402004.2016.1154233.
- [139] M. A. Moghaddam and K. Motahari, "Experimental investigation, sensitivity analysis and modeling of rheological behavior of MWCNT-CuO (30–70)/SAE40 hybrid nano-lubricant," *Applied Thermal Engineering*, vol. 123, pp. 1419–1433, Aug. 2017, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2017.05.200.
- [140] H. Wu, L. Qin, G. Dong, M. Hua, S. Yang, and J. Zhang, "An investigation on the lubrication mechanism of MoS₂ nano sheet in point contact: The manner of particle entering the contact area," *Tribology International*, vol. 107, pp. 48–55, Mar. 2017, doi: 10.1016/j.triboint.2016.11.009.
- [141] M. Hemmat Esfe, M. Afrand, W.-M. Yan, H. Yarmand, D. Toghraie, and M. Dahari, "Effects of temperature and concentration on rheological behavior of MWCNTs/SiO₂ (20–80)-SAE40 hybrid nano-lubricant," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 76, pp. 133–138, Aug. 2016, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2016.05.015.
- [142] M. K. A. Ali, H. Xianjun, L. Mai, C. Bicheng, R. F. Turkson, and C. Qingping, "Reducing frictional power losses and improving the scuffing resistance in automotive engines using hybrid nanomaterials as nano-lubricant additives," *Wear*, vol. 364–365, pp. 270–281, Oct. 2016, doi: 10.1016/j.wear.2016.08.005.
- [143] M. Asadi and A. Asadi, "Dynamic viscosity of MWCNT/ZnO-engine oil hybrid nanofluid: An experimental investigation and new correlation in different temperatures and solid concentrations," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 76, pp. 41–45, Aug. 2016, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2016.05.019.
- [144] L. Wu, Y. Zhang, G. Yang, S. Zhang, L. Yu, and P. Zhang, "Tribological properties of oleic acid-modified zinc oxide nanoparticles as the lubricant additive in poly-alpha olefin and diisooctyl sebacate base oils," *RSC Advances*, vol. 6, no. 74, pp. 69836–69844, 2016, doi: 10.1039/C6RA10042B.

- [145] Y. Meng, F. Su, and Y. Chen, "Supercritical Fluid Synthesis and Tribological Applications of Silver Nanoparticle-decorated Graphene in Engine Oil Nanofluid," *Scientific Reports*, vol. 6, no. 1, p. 31246, Aug. 2016, doi: 10.1038/srep31246.
- [146] H. P. Mungse, N. Kumar, and O. P. Khatri, "Synthesis, dispersion and lubrication potential of basal plane functionalized alkylated graphene nanosheets," *RSC Advances*, vol. 5, no. 32, pp. 25565–25571, 2015, doi: 10.1039/C4RA16975A.
- [147] Z. Jia, T. Chen, J. Wang, J. Ni, H. Li, and X. Shao, "Synthesis, characterization and tribological properties of Cu/reduced graphene oxide composites," *Tribology International*, vol. 88, pp. 17–24, Aug. 2015, doi: 10.1016/j.triboint.2015.02.028.
- [148] V. Zin *et al.*, "Tribological Properties of Engine Oil with Carbon Nanohorns as Nano-additives," *Tribology Letters*, vol. 55, no. 1, pp. 45–53, Jul. 2014, doi: 10.1007/s11249-014-0330-3.
- [149] S. Arumugam, G. Sriram, and R. Ellappan, "Bio-lubricant-biodiesel combination of rapeseed oil: An experimental investigation on engine oil tribology, performance, and emissions of variable compression engine," *Energy*, vol. 72, pp. 618–627, Aug. 2014, doi: 10.1016/j.energy.2014.05.087.
- [150] Q. Wan, Y. Jin, P. Sun, and Y. Ding, "Rheological and tribological behaviour of lubricating oils containing platelet MoS₂ nanoparticles," *Journal of Nanoparticle Research*, vol. 16, no. 5, p. 2386, May 2014, doi: 10.1007/s11051-014-2386-2.
- [151] E. Etefaghi, H. Ahmadi, A. Rashidi, A. Nouralishahi, and S. S. Mohtasebi, "Preparation and thermal properties of oil-based nanofluid from multi-walled carbon nanotubes and engine oil as nano-lubricant," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 46, pp. 142–147, Aug. 2013, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2013.05.003.
- [152] E. Etefaghi, A. Rashidi, H. Ahmadi, S. S. Mohtasebi, and M. Pourkhalil, "Thermal and rheological properties of oil-based nanofluids from different carbon nanostructures," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 48, pp. 178–182, Nov. 2013, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2013.08.004.
- [153] N. G. Demas, E. v. Timofeeva, J. L. Routbort, and G. R. Fenske, "Tribological Effects of BN and MoS₂ Nanoparticles Added to Polyalphaolefin Oil in Piston Skirt/Cylinder Liner Tests," *Tribology Letters*, vol. 47, no. 1, pp. 91–102, Jul. 2012, doi: 10.1007/s11249-012-9965-0.
- [154] V. Eswaraiah, V. Sankaranarayanan, and S. Ramaprabhu, "Graphene-Based Engine Oil Nanofluids for Tribological Applications," *ACS Applied Materials & Interfaces*, vol. 3, no. 11, pp. 4221–4227, Nov. 2011, doi: 10.1021/am200851z.
- [155] S. B. Mousavi, S. Zeinali Heris, and P. Estellé, "Viscosity, tribological and physicochemical features of ZnO and MoS₂ diesel oil-based nanofluids: An experimental study,"

- Fuel*, vol. 293, p. 120481, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.fuel.2021.120481.
- [156] Á. Tóth, Á. I. Szabó, and R. Kuti, “Tribological properties of nano-sized ZrO₂ ceramic particles in automotive lubricants,” *FME Transactions*, vol. 49, no. 1, pp. 36–43, 2021, doi: 10.5937/fme2101036T.
- [157] A. Beheshti, Y. Huang, K. Ohno, I. Blakey, and J. R. Stokes, “Improving tribological properties of oil-based lubricants using hybrid colloidal additives,” *Tribology International*, vol. 144, p. 106130, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.triboint.2019.106130.
- [158] S. B. Mousavi and S. Zeinali Heris, “Experimental investigation of ZnO nanoparticles effects on thermophysical and tribological properties of diesel oil,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 43, pp. 23603–23614, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.05.259.
- [159] C. Y. Xue, S. R. Wang, Y. Wang, G. Q. Wang, and X. Y. Yan, “The Influence of Nanocomposite Carbon additive on Tribological Behavior of Cylinder Liner/Piston Ring,” *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 491, p. 012017, Mar. 2019, doi: 10.1088/1757-899X/491/1/012017.
- [160] M. Asnida *et al.*, “Copper (II) oxide nanoparticles as additive in engine oil to increase the durability of piston-liner contact,” *Fuel*, vol. 212, pp. 656–667, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.fuel.2017.10.002.
- [161] N. Rajendhran, S. Palanisamy, P. Periyasamy, and R. Venkatachalam, “Enhancing of the tribological characteristics of the lubricant oils using Ni-promoted MoS₂ nanosheets as nano-additives,” *Tribology International*, vol. 118, pp. 314–328, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.triboint.2017.10.001.
- [162] F. L. Guzman Borda, S. J. Ribeiro de Oliveira, L. M. Seabra Monteiro Lazaro, and A. J. Kalab Leiróz, “Experimental investigation of the tribological behavior of lubricants with additive containing copper nanoparticles,” *Tribology International*, vol. 117, pp. 52–58, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.triboint.2017.08.012.
- [163] M. K. A. Ali, H. Xianjun, L. Mai, C. Qingping, R. F. Turkson, and C. Bicheng, “Improving the tribological characteristics of piston ring assembly in automotive engines using Al₂O₃ and TiO₂ nanomaterials as nano-lubricant additives,” *Tribology International*, vol. 103, pp. 540–554, Nov. 2016, doi: 10.1016/j.triboint.2016.08.011.
- [164] M. Scherge, R. Böttcher, D. Kürten, and D. Linsler, “Multi-Phase Friction and Wear Reduction by Copper Nanoparticles,” *Lubricants*, vol. 4, no. 4, p. 36, Oct. 2016, doi: 10.3390/lubricants4040036.
- [165] Y.-R. Jeng, Y.-H. Huang, P.-C. Tsai, and G.-L. Hwang, “Tribological Performance of Oil-Based Lubricants with Carbon-Fe Nanocapsules Additive,” *Tribology Transactions*, vol. 58, no. 5, pp. 924–929, Sep. 2015, doi: 10.1080/10402004.2015.1030055.
- [166] B.-S. Zhang, B.-S. Xu, Y. Xu, F. Gao, P.-J. Shi, and Y.-X. Wu, “Cu nanoparticles effect on the tribological properties of hydrosilicate powders as lubricant

- additive for steel–steel contacts,” *Tribology International*, vol. 44, no. 7–8, pp. 878–886, Jul. 2011, doi: 10.1016/j.triboint.2011.03.002.
- [167] N. Thachnatharen, M. Khalid, A. Arulraj, and N. Sridewi, “Tribological performance of hexagonal boron nitride (hBN) as nano-additives in military grade diesel engine oil,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 50, pp. 70–73, 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2021.04.145.
- [168] K. Vyavhare, R. B. Timmons, A. Erdemir, B. L. Edwards, and P. B. Aswath, “Tribochemistry of fluorinated ZnO nanoparticles and ZDDP lubricated interface and implications for enhanced anti-wear performance at boundary lubricated contacts,” *Wear*, vol. 474–475, p. 203717, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.wear.2021.203717.
- [169] M. S. Charoo and M. Hanief, “Improving the tribological characteristics of a lubricating oil by nano sized additives,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 28, pp. 1205–1209, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.01.219.
- [170] M.-D. Avilés, R. Pamies, J. Sanes, and M.-D. Bermúdez, “Graphene-Ionic Liquid Thin Film Nanolubricant,” *Nanomaterials*, vol. 10, no. 3, p. 535, Mar. 2020, doi: 10.3390/nano10030535.
- [171] V. S. Mello, M. F. Trajano, A. E. D. S. Guedes, and S. M. Alves, “Comparison Between the Action of Nano-Oxides and Conventional EP Additives in Boundary Lubrication,” *Lubricants*, vol. 8, no. 5, p. 54, May 2020, doi: 10.3390/lubricants8050054.
- [172] Z.-L. Cheng, W. Li, P.-R. Wu, and Z. Liu, “Study on structure-activity relationship between size and tribological properties of graphene oxide nanosheets in oil,” *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 722, pp. 778–784, Oct. 2017, doi: 10.1016/j.jallcom.2017.06.161.
- [173] M. Ivanov and O. Shenderova, “Nanodiamond-based nanolubricants for motor oils,” *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, vol. 21, no. 1, pp. 17–24, Feb. 2017, doi: 10.1016/j.cossms.2016.07.003.
- [174] A. K. Rasheed, M. Khalid, A. Javeed, W. Rashmi, T. C. S. M. Gupta, and A. Chan, “Heat transfer and tribological performance of graphene nanolubricant in an internal combustion engine,” *Tribology International*, vol. 103, pp. 504–515, Nov. 2016, doi: 10.1016/j.triboint.2016.08.007.
- [175] M. K. A. Ali, H. Xianjun, A. Elagouz, F. A. Essa, and M. A. A. Abdelkareem, “Minimizing of the boundary friction coefficient in automotive engines using Al₂O₃ and TiO₂ nanoparticles,” *Journal of Nanoparticle Research*, vol. 18, no. 12, p. 377, Dec. 2016, doi: 10.1007/s11051-016-3679-4.
- [176] J. Padgurskas, R. Rukuiza, I. Prosyčėvas, and R. Kreivaitis, “Tribological properties of lubricant additives of Fe, Cu and Co nanoparticles,” *Tribology International*, vol. 60, pp. 224–232, Apr. 2013, doi: 10.1016/j.triboint.2012.10.024.