Universidad Europea MADRID

ESCUELA DE ARQUITECTURA, INGENIERÍA Y DISEÑO

Ingeniería en Sistemas Industriales

TRABAJO FIN DE GRADO

Efecto de la presencia de nanopartículas base de carbono en las propiedades reológicas de aceites de motor 5W40 y 10W40

Alumno: Daniel Prada Martín

Director : Dra. Arisbel Cerpa Naranjo

JUNIO 2026

TÍTULO: Efecto de la presencia de nanopartículas base de carbono en las propiedades reológicas de aceites de motor 5W40 y 10W40

AUTOR: Daniel Prada Martín

DIRECTORES DEL PROYECTO: Dra. Arisbel Cerpa Naranjo

FECHA: 26 de Mayo de 2026

RESUMEN

El presente proyecto de investigación se enfoca en el estudio del comportamiento de suspensiones de nanopartículas a base de carbono (TYROL) en aceites de motor de grados 5W40 y 10W40. El objetivo principal es evaluar la influencia de estos nanomateriales en las propiedades físicas, entre ellas, la viscosidad dinámica y cinemática, y su efecto en la estabilidad del fluido bajo diferentes condiciones de temperatura comprendidas entre 20-160 °C, concentraciones de la suspensión entre 1.5 y 3 % en peso y tasas de cizallamiento o gradiente de deformación entre 0-1000 s-1. Además, se realiza una caracterización de las muestras en polvo mediante microscopía electrónica de transmisión (TEM) y barrido (SEM), así como mediante Espectroscopia Infrarroja (FTIR) para los polvos y las suspensiones preparadas.

La metodología propuesta contempla la preparación de dispersiones estables mediante técnicas de sonicación y su posterior caracterización mediante reometría de precisión. Adicionalmente, el estudio integra un análisis de la relación coste-beneficio. Esta investigación busca contribuir al desarrollo de lubricantes de última generación que permitan prolongar la vida útil de los sistemas mecánicos y reducir el impacto ambiental derivado del consumo de combustible.

Palabras clave: Nanopartículas de carbono, reología, aceite de motor, 5W40, 10W40, nanofluidos, viabilidad industrial.

ABSTRACT

This research project focuses on the study of the rheological behavior of suspensions of carbon-based nanoparticles (TYROL) in 5W40 and 10W40 grade engine oils. The main objective is to evaluate the influence of these nanomaterials on physical properties, including dynamic and kinematic viscosity, as well as their effect on fluid stability under different temperature conditions ranging from 20 to 160 °C, suspension concentrations between 1.5 and 3 wt%, and shear rates or deformation gradients between 0 and 1000 s^{-1}.

Additionally, characterization of the powder samples is carried out using transmission electron microscopy (TEM), scanning electron microscopy (SEM), and Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) for both powders and prepared suspensions.

The proposed methodology includes the preparation of stable dispersions using sonication techniques, followed by their characterization through precision rheometry. Furthermore, the study incorporates a cost–benefit analysis. This research aims to contribute to the development of next-generation lubricants that can extend the service life of mechanical systems and reduce the environmental impact associated with fuel consumption.

Keywords: Carbon nanoparticles, rheology, engine oil, 5W40, 10W40, nanofluids, industrial feasibility.

ÍNDICE

Capítulo 1. Introducción.....10
1.1. Nanociencia y Nanotecnología.....10
1.2. Antecedentes Históricos y Precedentes.....10
1.2.1. El origen de los nanofluidos.....10
1.2.2. Precedentes en la línea de investigación.....11
1.2.3. Evolución hacia la nanopartícula TYROL.....11
1.2.4. Estado del arte actual.....11
1.3. Justificación del proyecto.....12
1.4. Definición de objetivos.....13
1.4.1. Objetivos principales.....13
1.4.2. Objetivos específicos.....13
Capítulo 2. Marco Teórico.....14
2.1. Mecanismos de interacción de nanopartículas en la zona de contacto.....14
2.2. Clasificación y Propiedades de los Fluidos Base.....14
2.3. Aceites: Análisis y Rendimiento.....15
2.3.1. Aceite de motor 5W40.....15
2.3.2. Aceite de motor 10W40.....16
2.4. Nanopartículas: Análisis & Rendimiento.....17
2.4.1. Morfología y estructura laminar.....18
2.4.2. Especificaciones técnicas y cotas (TYROL).....19
2.4.3. Estabilidad de las dispersiones en nanofluidos.....19
2.5. Reología.....20
2.5.1. Reómetro Rotacional.....20
2.5.2. Control de condiciones experimentales.....21
2.5.3. Modelos reológicos aplicados a nanolubricantes.....22
2.5.4 Relación entre comportamiento reológico y tribológico.....22
2.6. Caracterización mediante Espectroscopía Infrarroja (FTIR).....23
2.6.1. Fundamento físico.....23
2.6.2. Funcionamiento y medida.....23
2.6.3. Aplicación en el estudio.....24
Capítulo 3: Marco Metodológico.....25
3.1. Materiales.....25
3.1.1. Fluidos base y aditivos carbonosos.....25
3.2. Equipamiento e Instrumentación.....28
3.2.1. Báscula de precisión.....28
3.2.2. Vibrador (Agitador Magnético).....29

3.2.3. Sonicador de Punta..... 30
3.2.4. Reómetro..... 31
3.2.5. FTIR (Espectrómetro Infrarrojo)..... 32
3.2.6. Microscopio Electrónico (SEM/TEM)..... 33
3.3. Preparación de las muestras..... 35
Capítulo 4. Análisis y Discusión de Resultados..... 36
4.1. Microscopía electrónica..... 36
4.1.1. Microscopía Electrónica de Transmisión.(TEM)..... 36
4.1.2. Microscopia Electrónica de Barrido (SEM)..... 41
4.2 Resultados de la caracterización..... 45
4.3. Resultados reología..... 48
4.3.1. Curvas de esfuerzo cortante (Pa) frente a gradiente de velocidad (s^-1)..... 50
4.3.2. Curvas de viscosidad dinámica (mPa s) frente a gradiente de velocidad (s^-1)..... 54
4.3.3. Curvas de viscosidad cinemática(cSt) frente a temperatura (°C)..... 60
Capítulo 5. Análisis de Coste-Beneficio de la Implementación de Nanofluidos..... 64
5.1.Costes de materiales y mano de obra..... 64
5.2. Presupuesto final..... 65
Capítulo 6. Análisis de Impacto Ambiental y Sostenibilidad..... 66
6.1. Introducción al análisis..... 66
6.2. Análisis del impacto medioambiental..... 67
6.3. Discusión del impacto medioambiental - Método IPCC GWP 20a (huella de carbono)..... 68
6.4. Evaluación de impacto — Método ReCiPe 2016 Endpoint..... 70
6.5. Interpretación de los resultados..... 73
Capítulo 7. Conclusiones y Líneas Futuras..... 75
7.1. Conclusiones del estudio..... 75
7.2. Verificación de objetivos..... 76
7.3. Recomendaciones para investigaciones futuras..... 76
Capítulo 8. Bibliografía..... 77
Capítulo 9. Anexos..... 81

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Propiedades 5W40 15
Tabla 2.2. Propiedades 10W40 16
Tabla 2.3. Propiedades TYROL 19
Tabla 3.1. Representación de la elaboración de las muestras 27
Tabla 4.1. Viscosidad cinemática frente a temperatura de muestra de aceite 5W40 con 0%, 1.5%, 2.25% y 3% en masa de TYROL entre 20ºC y 160ºC 63
Tabla 4.2. Viscosidad cinemática frente a temperatura de muestra de aceite 10W40 con 0%, 1.5%, 2.25% y 3% en masa de TYROL entre 20ºC y 160ºC 63
Tabla 5.1. Presupuesto final 65
Tabla 6.1. Inventario de materiales — muestra 5W40 al 2,25% TYROL 67
Tabla 6.2. Inventario de materiales — muestra 10W40 al 2,25% TYROL 67
Tabla 6.3. Huella de carbono (kg CO_2 eq.) — comparación de aceites puros vs. mezclas al 2,25% TYROL 68
Tabla 6.4. Contribución por material a la huella de carbono (kg CO_2 eq.) 68
Tabla 6.5. Carga ambiental (mPt) por categoría — Método ReCiPe 2016 Endpoint (E) 70
Tabla 6.6. Carga ambiental agregada por grupo principal (mPt) 71
Tabla 6.7. Resultados total de carga ambiental 72

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1. Preparación de la muestra usando el agitador magnético..... 28
Figura 3.2. Preparación de la muestra usando el agitador magnético..... 29
Figura 3.3. Preparación de la muestra usando el Sonicador de Punta..... 30
Figura 3.4. Preparación de la muestra usando el reómetro rotacional Rheostress 6000.....31
Figura 3.5. Preparación de la muestra usando Accesorio ATR horizontal HATR (PIKE Technologies, EE. UU.) acoplado a un espectrómetro FTIR..... 32
Figura 3.6. Microscopio Electrónico de Barrido SEM de la UCM..... 33
Figura 3.7. Microscopio de Transmisión (TEM) de la UCM..... 34
Figura 4.1. Micrografía TEM de la nanopartícula TYROL con morfología laminar y superposición de capas (escala 0.2 µm).....37
Figura 4.2. Micrografía TEM de la nanopartícula TYROL con morfología laminar y superposición de capas (escala 0.5 µm).....38
Figura 4.3. Micrografía TEM de la nanopartícula TYROL con morfología laminar y superposición de capas (escala 0.5 µm).....39
Figura 4.4. Micrografía TEM de la nanopartícula TYROL con morfología laminar y superposición de capas (escala 1 µm).....40
Figura 4.5. Micrografía SEM de nanopartículas TYROL mostrando morfología laminar con superficies irregulares y apilamiento de estructuras grafíticas (aumento ×1500).....42
Figura 4.6. Micrografía SEM de nanopartículas TYROL mostrando morfología laminar con superficies irregulares y apilamiento de estructuras grafíticas (aumento ×5000).....43
Figura 4.7. Micrografía SEM de nanopartículas TYROL mostrando morfología laminar con superficies irregulares y apilamiento de estructuras grafíticas (aumento ×8500).....44
Figura 4.8. Espectro infrarrojo (FTIR) del aceite base 5W40 junto con diferentes concentraciones en masa de la nanoparticula TYROL.....46
Figura 4.9. Espectro infrarrojo (FTIR) del aceite base 10W40 junto con diferentes concentraciones en masa de la nanoparticula TYROL.....47
Figura 4.10. Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 2.25% en masa de TYROL entre 20ºC y 80ºC..... 50
Figura 4.11. Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 2.25% en masa de TYROL entre 100ºC y 160ºC..... 51
Figura 4.12. Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 10W40 con 2,25% en masa de TYROL entre 20ºC y 80ºC..... 52
Figura 4.13. Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 10W40 con 2,25% en masa de TYROL entre 100ºC y 160ºC..... 53
Figura 4.14. Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 2.25% en masa de TYROL entre 20ºC y 80ºC..... 55
Figura 4.15. Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 2.25% en masa de TYROL entre 100ºC y 160ºC..... 56
Figura 4.16. Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con

2.25% en masa de TYROl entre 100ºC y 160ºCS.....57
Figura 4.17. Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 10W40 con 2.25% en masa de TYROL entre 100ºC y 160ºC.....58
Figura 4.18. Viscosidad cinemática frente a temperatura de muestra de aceite 5W40 con 0%, 1.5%, 2.25% y 3% en masa de TYROL entre 20ºC y 160ºC.....60
Figura 4.19. Viscosidad cinemática frente a temperatura de muestra de aceite 10W40 con 0%, 1.5%, 2.25% y 3% en masa de TYROL entre 20ºC y 160ºC.....61
Figura 6.1. Gráfico comparativo kg CO2 eq. frente a tipo de muestra.....69
Figura 6.2. Gráfico comparativo % huella de carbono frente a tipo de muestra.....69
Figura 6.3. Gráfico comparativo Categoría de impacto frente a mPt (ReCiPe 2016 Endpoint).....71
Figura 6.3. Gráfico comparativo mPt (ReCiPe 2016 Endpoint) frente a Carga ambiental agregada por grupo principal.....72
Figura A.1. Micrografía TEM de la nanopartícula TYROL con morfología laminar y superposición de capas (escala 0.2 µm).....81
Figura A.2. Micrografía TEM de la nanopartícula TYROL con morfología laminar y superposición de capas (escala 0.5 µm).....82
Figura A.3. Micrografía TEM de la nanopartícula TYROL con morfología laminar y superposición de capas (escala 0.5 µm).....83
Figura A.4. Micrografía TEM de la nanopartícula TYROL con morfología laminar y superposición de capas (escala 0.5 µm).....84
Figura A.5. Micrografía TEM de la nanopartícula TYROL con morfología laminar y superposición de capas (escala 0.5 µm).....85
Figura A.6. Micrografía TEM de la nanopartícula TYROL con morfología laminar y superposición de capas (escala 1 µm).....86
Figura A.7. Micrografía TEM de la nanopartícula TYROL con morfología laminar y superposición de capas (escala 1 µm).....87
Figura A.8. Micrografía SEM de nanopartículas TYROL mostrando morfología laminar con superficies irregulares y apilamiento de estructuras grafíticas (aumento ×7000).....88
Figura A.9. Espectro infrarrojo (FTIR) del aceite base 5W40.....89
Figura A.10. Espectro infrarrojo (FTIR) del aceite base 5W40 con una concentración en masa del TYROL de 1.5%.....90
Figura A.11. Espectro infrarrojo (FTIR) del aceite base 5W40 con una concentración en masa del TYROL de 2.25%.....91
Figura A.12. Espectro infrarrojo (FTIR) del aceite base 5W40 con una concentración en masa del TYROL de 3%.....92
Figura A.13. Espectro infrarrojo (FTIR) del aceite base 10W40.....93
Figura A.14. Espectro infrarrojo (FTIR) del aceite base 10W40 con una concentración en masa del TYROL de 1.5%.....94
Figura A.15. Espectro infrarrojo (FTIR) del aceite base 10W40 con una concentración en masa del TYROL de 2.25%.....95
Figura A.16. Espectro infrarrojo (FTIR) del aceite base 10W40 con una concentración en masa del TYROL de 3.....96

Figura A.17. Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 1.5% en masa de TYROL entre 20ºC y 80ºC..... 97
Figura A.18. Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 1.5% en masa de TYROL entre 100ºC y 160ºC..... 98
Figura A.19. Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 3% en masa de TYROL entre 20ºC y 80ºC..... 99
Figura A.20. Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 2.25% en masa de TYROL entre 100ºC y 160ºC..... 100
Figura A.21. Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 1.5% en masa de TYROL entre 20ºC y 80ºC..... 101
Figura A.22. Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 1.5% en masa de TYROL entre 100ºC y 160ºC..... 102
Figura A.23. Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 3% en masa de TYROL entre 20ºC y 80ºC..... 103
Figura A.24. Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 3% en masa de TYROL entre 100ºC y 160ºC..... 104
Figura A.25. Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 10W40 con 1,5% en masa de TYROL entre 20ºC y 80ºC..... 105
Figura A.26. Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 10W40 con 1,5% en masa de TYROL entre 100ºC y 160ºC..... 106
Figura A.27. Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 10W40 con 3% en masa de TYROL entre 20ºC y 80º..... 107
Figura A.28. Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 10W40 con 1.5% en masa de TYROL entre 20ºC y 80ºC..... 108
Figura A.29. Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 10W40 con 1.5% en masa de TYROL entre 100ºC y 160ºC..... 109
Figura A.30. Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 10W40 con 3% en masa de TYROL entre 20ºC y 80ºC..... 110

Capítulo 1. Introducción

1.1. Nanociencia y Nanotecnología

La Nanotecnología es el estudio, diseño, creación, síntesis, manipulación y aplicación de materiales, aparatos y sistemas funcionales a través del control de la materia a nanoescala, y la explotación de fenómenos y propiedades de la materia a nanoescala. Cuando se manipula la materia a una escala tan minúscula, presenta propiedades totalmente nuevas.

En la escala nanométrica, las propiedades físicas y químicas de los materiales pueden diferir significativamente de las de los materiales en masa. Por ejemplo, los materiales pueden volverse más resistentes, tener una mayor conductividad térmica o eléctrica, o mostrar propiedades ópticas únicas [1]. Estos cambios son debidos fundamentalmente a dos factores: el aumento relativo del área superficial respecto al volumen y la aparición de efectos cuánticos [2].

1.2. Antecedentes Históricos y Precedentes

1.2.1. El origen de los nanofluidos

La evolución de la lubricación industrial ha buscado históricamente superar la dependencia de la viscosidad respecto a la temperatura, limitación crítica en los motores de combustión interna. El hito fundamental en este campo se sitúa en 1995, cuando S.U.S. Choi [3] introdujo formalmente el concepto de "nanofluido" en el Argonne National Laboratory. Choi demostró que la suspensión de partículas sólidas de tamaño nanométrico en fluidos convencionales podría mejorar drásticamente las propiedades térmicas y reológicas de los fluidos base, abriendo la puerta a una nueva generación de lubricantes.

1.2.2. Precedentes en la línea de investigación

Este proyecto se establece como una continuación directa de la línea de investigación desarrollada en esta Escuela de Ingeniería. El precedente inmediato y base metodológica de este trabajo es el estudio realizado por López Fraile [4], quien evaluó el comportamiento reológico de los mismos aceites base (5W40 y 10W40) utilizando diversas morfologías de carbono, específicamente Nanofibras de Carbono (CNF), Nanoplaquetas de grafeno (GNP) y Óxido de Grafeno (GO). Sus conclusiones determinaron que, si bien se mantenía un comportamiento newtoniano, la morfología de la partícula afecta directamente al incremento de la viscosidad.

1.2.3. Evolución hacia la nanopartícula TYROL

Siguiendo la cronología de avances en nanomateriales, la investigación actual se desplaza hacia compuestos laminares avanzados y estructuras híbridas. Estudios recientes como los de Esfe et al. [5] y Abdolahi et al. [6] han explorado el uso de partículas basadas en carbono: Nanotubos de carbono(MWCNT, CN) en aceites de motor de grado 10W40, demostrando que estos aditivos no solo mejoran la estabilidad térmica, sino que pueden inducir comportamientos no newtonianos deseables bajo altas tasas de cizalla, mejorando la protección del motor en condiciones extremas.

Desde un punto de vista tecnológico e industrial, la introducción de nanopartículas en lubricantes responde a la necesidad de mejorar la eficiencia energética de los sistemas mecánicos. La reducción del coeficiente de fricción permite disminuir el consumo de combustible y, en consecuencia, las emisiones de gases contaminantes. Asimismo, la sustitución parcial de aditivos tradicionales basados en compuestos como Zn, P o S por materiales carbonosos contribuye a reducir el impacto ambiental asociado a los lubricantes convencionales, alineándose con las tendencias actuales hacia el desarrollo de lubricantes sostenibles [7], [8].

1.2.4. Estado del arte actual.

En los últimos años, el desarrollo de nanolubricantes ha experimentado un crecimiento significativo debido a la capacidad de las nanopartículas para modificar de forma controlada las propiedades reológicas y tribológicas de los aceites base. Estudios recientes muestran que la adición de nanomateriales, tanto metálicos como carbonosos, permite mejorar la

estabilidad térmica, reducir la fricción y optimizar la formación de película lubricante en condiciones de operación severas.

Duan et al. [9] (Springer, 2023) presentan una revisión exhaustiva del uso de nanomateriales en aplicaciones de lubricación, destacando que la incorporación de nanopartículas influye directamente en la viscosidad dinámica, el índice de viscosidad y el comportamiento frente a la cizalladura. El estudio pone de manifiesto que la morfología y naturaleza química de las partículas condicionan el rendimiento del nanolubricante, siendo las estructuras carbonosas especialmente relevantes por su capacidad de deslizamiento interlaminar.

De forma complementaria, Rahman et al. [7] (ACS Omega, 2024) analizan los principales factores que afectan al comportamiento reológico de los nanofluidos, identificando la concentración de partículas, el tamaño, la forma y la estabilidad de la dispersión como variables críticas. Estos autores demuestran que, a concentraciones elevadas, los nanofluidos pueden experimentar desviaciones del comportamiento newtoniano, lo que resulta clave para aplicaciones en sistemas sometidos a altas tasas de cizalladura.

En la misma línea, García-Tobar et al. [8] (MDPI, 2024) establecen una correlación directa entre las modificaciones reológicas y la mejora en el comportamiento tribológico, evidenciando que un incremento controlado de la viscosidad favorece la formación de tribofilm y reduce el desgaste superficial. Asimismo, trabajos como el de Korkmaz [10] (ScienceDirect, 2024) destacan la aplicabilidad industrial de los nanolubricantes en condiciones extremas, poniendo el foco en problemas prácticos como la sedimentación, la estabilidad a largo plazo y la compatibilidad con sistemas de lubricación.

A pesar de estos avances, persisten desafíos relacionados con la estabilidad de las dispersiones, la optimización de concentraciones y la predicción del comportamiento reológico en aceites comerciales, lo que justifica la necesidad de estudios experimentales específicos como el presente trabajo.

1.3. Justificación del proyecto

El rendimiento de un motor de combustión interna depende estrechamente de la calidad de su lubricación. Los lubricantes comerciales actuales, a pesar de sus paquetes de aditivos químicos, sufren una degradación de su viscosidad al aumentar la temperatura de operación. El uso de la nanopartícula a base de carbono TYROL se justifica por la

necesidad de encontrar aditivos más estables, menos abrasivos y con mayor capacidad de formación de películas protectoras (tribofilm) que los óxidos metálicos tradicionales analizados en estudios previos [11], [12].

1.4. Definición de objetivos

1.4.1. Objetivos principales

Evaluar el efecto de la incorporación de nanopartículas a base de carbono en las propiedades reológicas de aceites de motor 5W40 y 10W40, considerando las variables más influyentes y su viabilidad a escala industrial

1.4.2. Objetivos específicos

1. Caracterizar las propiedades reológicas iniciales de los aceites base.
2. Preparar dispersiones estables de nanopartículas de carbono.
3. Analizar la influencia de la concentración de nanopartículas.
4. Estudiar el efecto de la temperatura y la tasa de cizallamiento.
5. Caracterización estructural
6. Estudio Coste-beneficio
7. Análisis medioambiental mediante el estudio de los ciclos de vida

Capítulo 2. Marco Teórico

2.1. Mecanismos de interacción de nanopartículas en la zona de contacto

La eficacia de los nano lubricantes no reside únicamente en su presencia, sino en cuatro mecanismos físicos fundamentales que ocurren en la interfase de las superficies en movimiento:

1. Efecto Rodamiento (Rolling effect): Las nanopartículas con morfología esférica, como el Al_2O_3 o el ZnO, actúan como micro-rodamientos que transforman la fricción por deslizamiento en fricción por rodadura, reduciendo significativamente la pérdida de energía [5].
2. Efecto de Relleno (Mending effect): Las partículas se depositan en las irregularidades (rugosidad) de las superficies metálicas. Este proceso de "auto-reparación" compensa el desgaste físico y crea una superficie más lisa, lo que mejora la sustentación de la película lubricante [4].
3. Formación de Tribofilm: Bajo condiciones de alta presión y temperatura, las nanopartículas reaccionan o se adhieren firmemente a las superficies, creando una capa protectora de sacrificio (tribofilm) que evita el contacto directo metal-metal [5].
4. Efecto de Pulido (Polishing effect): Debido a su dureza, las nanopartículas pueden actuar como agentes abrasivos suaves que reducen los picos de rugosidad iniciales de las piezas mecánicas.

2.2. Clasificación y Propiedades de los Fluidos Base

Para comprender la alteración reológica, es necesario analizar el comportamiento de los aceites base utilizados en este estudio. Los aceites SAE (Society of Automotive Engineers) se clasifican según su viscosidad cinemática.

- Aceites Multigrado (10W40, 5W40): Estos fluidos están diseñados para operar en un amplio rango de temperaturas. El número seguido de la "W" (Winter) indica la fluidez en frío, mientras que el segundo dígito representa la viscosidad a temperaturas de operación (100°C).
- Aceites Monogrado (SAE50): Presentan una viscosidad más alta y estable en condiciones de calor extremo, pero su rendimiento es limitado en arranques en frío.

La problemática técnica de estos fluidos base es su Índice de Viscosidad (IV). Aunque contienen polímeros mejoradores del IV, la adición de nanopartículas híbridas busca estabilizar esta propiedad sin depender exclusivamente de aditivos químicos que se degradan con el tiempo [3].

2.3. Aceites: Análisis y Rendimiento

Para evaluar el impacto de los nanomateriales, es imprescindible establecer los valores de referencia de los fluidos puros.

2.3.1. Aceite de motor 5W40

El 5W40 es un aceite de Repsol diseñado para la competición. Su avanzada fórmula y el uso de aditivos previenen la formación de lodos y depósitos a altas temperaturas. Los parámetros físicos de este lubricante se presentan en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Propiedades 5W40

PROPIEDADES	**UNIDAD**	**VALOR**
GRADO SAE	-	$5W40$
Viscosidad Cinemática a 40°C	cSt	83
Viscosidad Cinemática a 100°C	cSt	14.1
Índice de Viscosidad	-	170
Punto de Inflamación	°C	215

Punto de Congelación	°C	-39
Densidad a 15°C	kg/m^3	850

2.3.2. Aceite de motor 10W40

El 10W-40 de Total Quartz es un lubricante de tecnología sintética reforzado para mantener la limpieza del motor en todo momento. Su fórmula activa neutraliza la formación de residuos incluso bajo condiciones de estrés térmico. Es fundamental contrastar sus valores nominales con los del aceite 5W40, por lo que en la Tabla 2.2 se desglosan sus parámetros técnicos principales.

Tabla 2.2. Propiedades 10W40

PROPIEDADES	**UNIDAD**	**VALOR**
GRADO SAE	-	$10W40$
Viscosidad Cinemática a 40°C	cSt	96.8
Viscosidad Cinemática a 100°C	cSt	14.8
Índice de Viscosidad	-	160
Punto de Inflamación	°C	232

Punto de Congelación	°C	-24
Densidad a 15°C	kg/m^3	873.6

2.4. Nanopartículas: Análisis & Rendimiento

En esta fase del estudio, se ha seleccionado como agente de refuerzo la nanopartícula comercial TYROL, un relleno carbonoso micronizado de alta pureza. A diferencia de otras estructuras de carbono, el TYROL destaca por su morfología de partículas grafíticas laminares, lo que le confiere propiedades lubricantes sólidas excepcionales cuando se dispersa en bases como el 5W40 y 10W40.

2.4.1. Morfología y estructura laminar

La eficacia del TYROL reside en su estructura cristalina hexagonal. Las láminas de carbono están unidas por fuerzas débiles de Van der Waals, lo que permite que se deslicen entre sí bajo esfuerzos de cizalla. Este comportamiento es fundamental para el objetivo del proyecto, ya que se espera que las láminas se orienten en la dirección del flujo del aceite, facilitando el deslizamiento en la zona de contacto.

La caracterización microestructural de las nanopartículas es un aspecto fundamental para comprender su comportamiento en suspensión. Para ello, se emplean técnicas avanzadas como la microscopía electrónica de barrido (SEM) y la microscopía electrónica de transmisión (TEM), que permiten analizar la morfología, tamaño y distribución de las partículas a escala micro y nanométrica.

En el caso de las nanopartículas carbonosas de tipo laminar, como el material TYROL empleado en este estudio, la estructura cristalina hexagonal presenta capas unidas por fuerzas de Van der Waals, lo que facilita su deslizamiento relativo bajo esfuerzos de cizalladura. Este fenómeno influye directamente en la reducción del coeficiente de fricción y en la mejora del comportamiento tribológico del lubricante.

Estudios recientes han demostrado que la morfología de la partícula tiene un impacto directo en las propiedades reológicas del fluido. Harchaoui et al. [11] (2023) evidencian que partículas de naturaleza laminar generan incrementos moderados de la viscosidad con mejor comportamiento frente al corte, mientras que partículas esféricas o irregulares pueden provocar mayores incrementos de viscosidad y comportamientos no lineales.

2.4.2. Especificaciones técnicas y cotas (TYROL)

Para el análisis de resultados, es vital considerar las dimensiones del relleno, ya que el tamaño de la partícula influye directamente en la estabilidad de la mezcla y en el aumento de la viscosidad cinemática. En la Tabla 2.3 se detallan las propiedades del TYROL, obtenidas a partir de la ficha técnica del fabricante y parámetros de control de calidad.

Tabla 2.3. Propiedades TYROL

PARÁMETRO/COTA	VALOR
Morfología	$Partículas\ grafiticas\ laminares$
Tamaño de partícula	$5 - 7\ \mu m$
Pureza de Carbono	< 99.5
Densidad aparente	0.2
Naturaleza	$Carbono\ cristalino$

2.4.3. Estabilidad de las dispersiones en nanofluidos

Uno de los aspectos más críticos en el desarrollo de nanolubricantes es la estabilidad de la dispersión de nanopartículas en el fluido base. La tendencia natural de las partículas a aglomerarse debido a fuerzas de atracción intermoleculares puede provocar sedimentación, alterando significativamente las propiedades reológicas y reduciendo la eficacia del lubricante.

Según Rahman et al. [7] , la estabilidad de los nanofluidos depende de variables clave como el tamaño de partícula, la energía superficial y el método de dispersión. Técnicas como la sonicación permiten romper los aglomerados y favorecer la formación de dispersiones homogéneas, mejorando la repetibilidad de los ensayos.

Duan et al. [9] destacan que una dispersión inestable puede generar desviaciones significativas en la viscosidad y deteriorar el comportamiento tribológico del sistema, limitando su aplicación industrial. Por ello, el control de la estabilidad es un requisito esencial en el diseño de nanofluidos funcionales.

2.5. Reología

La reología es la parte de la física que estudia la relación entre el esfuerzo aplicado y la deformación resultante en materiales que son capaces de fluir. En el contexto de los lubricantes con nanopartículas, este análisis es crítico para entender cómo la adición de TYROL afecta a la resistencia interna del aceite.

2.5.1. Reómetro Rotacional

Para realizar las mediciones de este estudio se utiliza un reómetro rotacional de estrés controlado. Este instrumento es superior a un viscosímetro convencional porque permite controlar con extrema precisión tanto la temperatura como la velocidad a la que se deforma el fluido.

Principio de medición

El equipo funciona mediante la rotación de un elemento sensor sobre una superficie fija. El aceite (mezcla de base 5W40/10W40 y TYROL) se deposita en el espacio comprendido entre ambos.

1. Geometría de medida: El cono superior gira a una velocidad angular determinada, mientras que la placa inferior permanece estática y está conectada a un sistema de control térmico.
2. Transducción de par: El reómetro mide el par de torsión (torque) que el fluido opone al movimiento. A partir de este par y de las dimensiones geométricas de las placas, el software calcula el esfuerzo de cizalladura (τ).
3. Cálculo de la viscosidad: Al conocer la velocidad de rotación, se determina el gradiente de velocidad o tasa de cizalla (γ). La viscosidad dinámica (η) se obtiene mediante el cociente:

$$\eta = \tau / \gamma \tag{2.1}$$

2.5.2. Control de condiciones experimentales

Para que el estudio sea riguroso, el reómetro debe controlar dos factores críticos:

- Sistema Peltier: Dado que los aceites de motor son fluidos cuya viscosidad varía drásticamente con el calor, el reómetro incorpora una placa Peltier que permite realizar barridos de temperatura (desde 20ºC hasta 160ºC) con una precisión de décimas de grado.
- Rango de cizalla: El equipo permite variar la tasa de cizalla para simular desde el estado de reposo del aceite hasta las condiciones de alta fricción que ocurre dentro de los cilindros de un motor. Esto es lo que permite detectar si el fluido tiene un comportamiento Newtoniano (viscosidad constante) o No Newtoniano (viscosidad variable con la velocidad).

2.5.3. Modelos reológicos aplicados a nanolubricantes

El comportamiento reológico de los lubricantes puede describirse mediante diferentes modelos matemáticos en función de la relación entre el esfuerzo de cizalladura y la tasa de deformación. En condiciones ideales, los aceites base presentan un comportamiento newtoniano, caracterizado por una viscosidad constante independiente de la tasa de cizalladura.

Sin embargo, la incorporación de nanopartículas puede inducir desviaciones hacia comportamientos no newtonianos, especialmente a altas concentraciones o bajo condiciones de cizalladura elevada. Uno de los modelos más utilizados para describir este comportamiento es el modelo de ley de potencia, expresado como:

$$\tau = K \cdot \gamma^{n} \tag{2.2}$$

donde K es el índice de consistencia y n el índice de comportamiento del flujo. Cuando n < 1, el fluido presenta comportamiento pseudoplástico, mientras que valores n > 1 indican comportamiento dilatante.

Estudios experimentales como los de Esfe et al. [13] (2022) y Hemmat Esfe et al. [14] (2023) han demostrado que los nanolubricantes basados en aceites SAE pueden mantener un comportamiento newtoniano a bajas concentraciones, pero evolucionar hacia un comportamiento no newtoniano a medida que aumenta la carga de nanopartículas.

2.5.4 Relación entre comportamiento reológico y tribológico

Las propiedades reológicas de un lubricante están directamente relacionadas con su comportamiento tribológico, ya que condicionan la formación y estabilidad de la película lubricante entre superficies en contacto. Una viscosidad adecuada permite mantener el régimen de lubricación hidrodinámico, evitando el contacto metal-metal y reduciendo el desgaste.

García-Tobar et al. [8] demuestran que un incremento controlado de la viscosidad mediante la incorporación de nanopartículas puede mejorar significativamente la capacidad de carga del lubricante y favorecer la formación de una película protectora estable.

No obstante, incrementos excesivos de viscosidad pueden penalizar la eficiencia energética del sistema, aumentando las pérdidas mecánicas por fricción interna. Por tanto, la optimización del comportamiento reológico es un factor crítico en el diseño de nanolubricantes de alto rendimiento.

2.6. Caracterización mediante Espectroscopía Infrarroja (FTIR)

La técnica FTIR permite identificar la estructura química de los lubricantes mediante la absorción de radiación infrarroja. Se utiliza para verificar la pureza de los aceites 5W40 y 10W40 y la estabilidad de la nanopartícula TYROL.

2.6.1. Fundamento físico

La absorción ocurre cuando la frecuencia infrarroja coincide con la vibración de los enlaces químicos. Según la ley de Hooke, el número de onda se define como:

$$v = (1/2\pi c) \cdot \sqrt{(k/\mu)} \tag{2.3}$$

Donde la masa reducida (μ) es:

$$\mu = (m_1 \cdot m_2) / (m_1 + m_2) \tag{2.4}$$

2.6.2. Funcionamiento y medida

El equipo utiliza un interferómetro de Michelson para obtener un interferograma que, mediante la Transformada de Fourier, genera el espectro de absorbancia:

$$A = log_{10}(I_0 / I)$$

(2.5)

Donde:

- $A \rightarrow (Absorbancia)$
- $I_0 \rightarrow (Intensidad\ inicial\ o\ incidente)$
  Es la intensidad de la radiación que entra en la muestra, es decir, la señal sin absorber (referencia).
- $I \rightarrow (Intensidad\ transmitida)$
  Es la intensidad de la radiación que atraviesa la muestra, después de que parte de ella ha sido absorbida.
- $log_{10} \rightarrow (logaritmo\ en\ base\ 10)$

2.6.3. Aplicación en el estudio

- Control de calidad: Identificación de los enlaces C-H del aceite base.
- Estabilidad: Confirmar que la adición de TYROL no genera nuevas reacciones químicas que degradan el lubricante.

Capítulo 3: Marco Metodológico

Una vez estudiados los fundamentos teóricos sobre la lubricación, las propiedades de los aceites 5W40 y 10W40 y las nanopartículas TYROL, el presente capítulo describe el proceso y procedimiento seguido para el estudio y el análisis de dichos materiales.

El objetivo de este apartado es detallar los materiales, equipos y procedimientos usados para la creación de las mezclas y su posterior caracterización. La metodología se ha diseñado para garantizar la repetibilidad de los ensayos y la estabilidad de las dispersiones.

En las próximas páginas se detallan los recursos técnicos utilizados, desde la selección de los aceites base hasta el empleo de las nanopartículas de TYROL. Se explica paso a paso el procedimiento seguido para lograr una mezcla homogénea mediante técnicas de sonicación y las condiciones bajo las cuales se configuró el reómetro para la captura de datos. Con ello, queda definida la hoja de ruta experimental que permite comprender y discutir los resultados obtenidos en las fases posteriores del estudio.

3.1. Materiales

3.1.1. Fluidos base y aditivos carbonosos

Como fase continua de los nanofluidos, se han seleccionado dos aceites de motor de uso comercial con diferentes naturalezas químicas, permitiendo así observar el efecto del aditivo en distintos entornos moleculares:

- Lubricante sintético SAE 5W40 (Repsol): Elegido por su alta estabilidad térmica y bajo contenido en cenizas, cuyas propiedades base se presentaron en la Tabla 2.1.
- Lubricante semisintético SAE 10W40 (Total Quartz): Utilizado como referencia de un fluido con mayor dependencia térmica, detallado previamente en la Tabla 2.2.

Como fase dispersa, se ha empleado el material carbonoso micronizado TYROL.

Las muestras contienen diferentes concentraciones de la nanopartícula TYROL, para ello se calcula dicha cantidad mediante la Ec. 3.1. Los resultados se reflejan en la siguiente Tabla 3.1.

$$\varphi = m_n/m_t = m_n/(m_n + m_b) \rightarrow m_n = \varphi(m_n + m_b)$$

$$d_n = m_n/V_n \rightarrow m_n = d_n \cdot V_n$$

$$m_n = \varphi \cdot m_n + \varphi \cdot d_n \cdot V_n$$

$$m_n(1 - \varphi) = \varphi \cdot d_n \cdot V_n$$

$$m_n = (\varphi \cdot d_n \cdot V_n)/(1 - \varphi)$$

(3.1)

Donde:

- $\varphi \rightarrow (Fracción\ másica)$
- $m_t \rightarrow (Masa\ del\ componente\ nano)$
- $m_n \rightarrow (Masa\ del\ componente\ nano)$
- $V_n \rightarrow (Volumen\ del\ lubricante)$
- $d_n \rightarrow (Densidad\ del\ lubricante)$

Tabla 3.1. Representación de la elaboración de las muestras

MUESTRA	ADITIVO	CONCENTRACIÓN DEL ADITIVO	MASA DEL ADITIVO (g)	TIPO DE ACEITE	VOLUMEN DE ACEITE (mL)
1	TYROL	1.5%	0.2593	**5W40**	20
2		2.25%	0.3919	**5W40**	
3		3%	0.5266	**5W40**	
4		1.5%	0.2619	**10W40**	
5		2.25%	0.3958	**10W40**	
6		3%	0.5318	**10W40**	

3.2. Equipamiento e Instrumentación

Para la ejecución de la fase experimental y la obtención de datos precisos, se ha hecho uso del siguiente equipamiento especializado y disponible en el laboratorio C006 de la Universidad Europea de Madrid.

3.2.1. Báscula de precisión

Para asegurar que las fracciones másicas (φ) de la Tabla 3.1 sean exactas, se utiliza una balanza analítica con una resolución de 0.0001 g. Dada la baja masa de aditivo requerida para las concentraciones del 1.5%, 2.25% y 3%, esta precisión es fundamental para reducir el error experimental. “Bascula Sartorius, Gottingen (Alemania)”

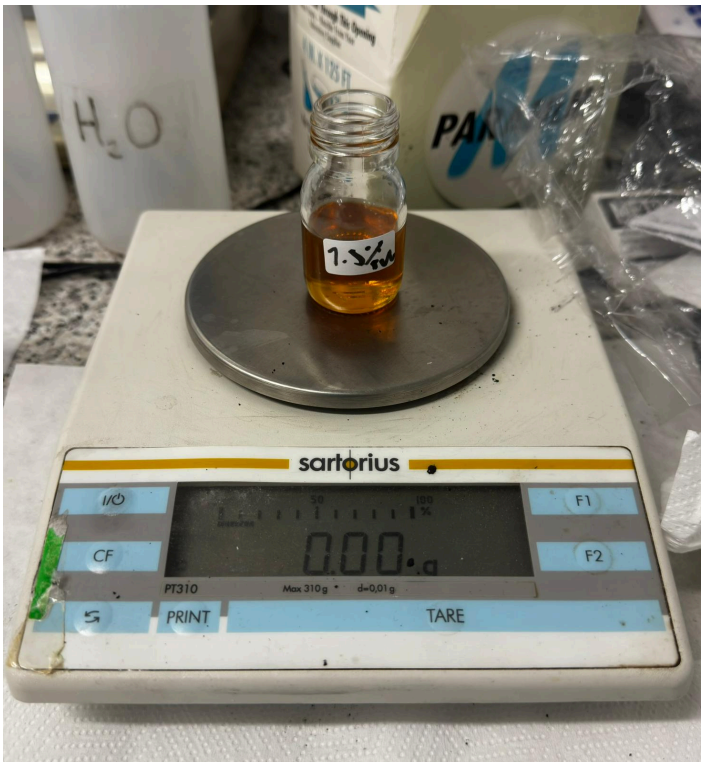


Figura 3.1. Preparación de la muestra usando el agitador magnético

3.2.2. Vibrador (Agitador Magnético)

Se emplea un agitador magnético de velocidad variable , “MULTIMATIC 5N , JP Selecta, Barcelona (España)”. Su función es realizar una mezcla preliminar de las partículas con el aceite antes del proceso de sonicación y mantener la homogeneidad de la dispersión en pasos intermedios, evitando la sedimentación por gravedad. Pulso de 20 segundos encendido, 5 segundos apagado.



Figura 3.2. Preparación de la muestra usando el agitador magnético

3.2.3. Sonicador de Punta.

La dispersión de las nanopartículas TYROL en los aceites base se realiza mediante un baño de ultrasonidos. El equipo genera ondas acústicas de alta frecuencia que inducen el fenómeno de cavitación, cuya energía es capaz de romper los aglomerados de partículas y asegurar una suspensión coloidal homogénea.



Figura 3.3. Preparación de la muestra usando el Sonicador de Punta

3.2.4. Reómetro

Se ha utilizado un reómetro rotacional de estrés controlado , “Haake Rheostress 6000 , Fisher Scientific, Gottingen (Alemania)”. Este equipo es el eje central del estudio reológico, ya que permite someter a las muestras a condiciones variables de temperatura y velocidad de deformación. El control térmico se realiza mediante una placa Peltier integrada, garantizando una precisión de ±0.1 °C.



Figura 3.4. Preparación de la muestra usando el reómetro rotacional Rheostress 6000

3.2.5. FTIR (Espectrómetro Infrarrojo)

El espectrómetro de infrarrojos por transformada de Fourier se utiliza para la caracterización química. Se utilizó un accesorio ATR horizontal modelo HATR (PIKE Technologies, EE. UU.) acoplado a un espectrómetro FTIR para la caracterización espectroscópica de las muestras. El equipo mide la interacción de la radiación infrarroja con los enlaces moleculares de la muestra, calculando la absorbancia (A) / transmitancia (T).

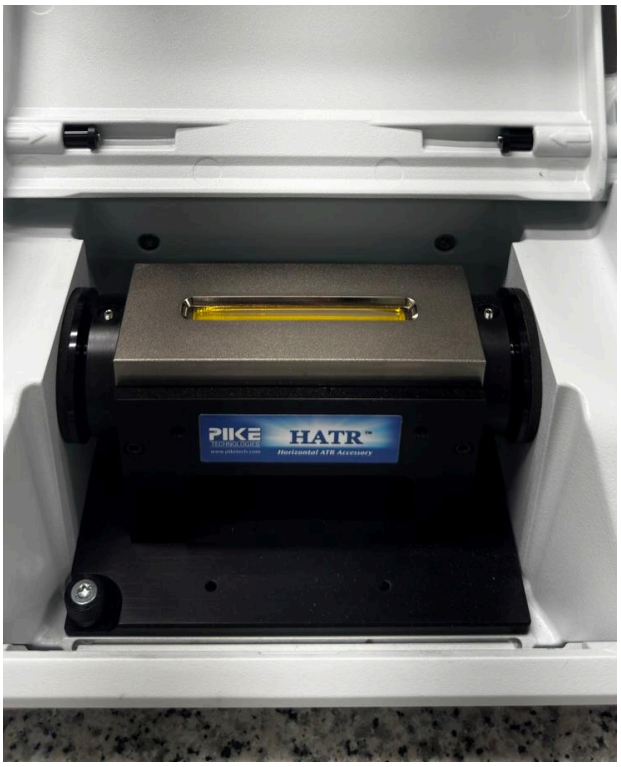


Figura 3.5. Preparación de la muestra usando Accesorio ATR horizontal HATR (PIKE Technologies, EE. UU.) acoplado a un espectrómetro FTIR.

3.2.6. Microscopio Electrónico (SEM/TEM)

Para el análisis de la morfología estructural de la nanopartícula TYROL, se utiliza la microscopía electrónica. Este equipo permite observar a escala nanométrica si la estructura del aditivo es:

- Laminar/Plana: Similar a las hojas de grafito, que favorecen el deslizamiento.
- Tubular: Estructuras cilíndricas que pueden actuar como rodamientos a nanoescala.
- Esférica o Irregular: Que influye de manera distinta en la viscosidad y el desgaste.



Figura 3.6. Microscopio Electrónico de Barrido SEM de la UCM



Figura 3.7. Microscopio de Transmisión (TEM) de la UCM

3.3. Preparación de las muestras

El procedimiento seguido para garantizar una mezcla homogénea fue el siguiente:

1. Mezcla inicial: Se añadieron los 20 mL de aceite y el peso de TYROL correspondiente al porcentaje de concentración deseado (1.5%, 2.25% o 3%).
2. Vibración: La mezcla se sometió a un proceso de vibración durante 45 minutos para asegurar una pre-dispersión uniforme.
3. Sonicación: Se empleó el sonicador de punta configurado al 50% de amplitud durante 6 minutos con pulsos intermitentes para evitar la degradación térmica.
4. Ensayo Térmico: Inmediatamente después, la muestra se introdujo en el reómetro para realizar el estudio de viscosidad en el rango de 20 °C a 160 °C.

Además se realizó la caracterización de la muestra en polvo de TYROL y de las suspensiones preparadas por espectroscopia infrarroja (FTIR), así como, mediante microscopía electrónica de transmisión (TEM) y barrido (SEM) las muestras en polvo de Tyrol.

Capítulo 4. Análisis y Discusión de Resultados

4.1. Microscopía electrónica.

4.1.1. Microscopía Electrónica de Transmisión.(TEM).

Con el objetivo de analizar la estructura y morfología de las nanopartículas empleadas como aditivo, se ha llevado a cabo un estudio mediante microscopía electrónica de transmisión (TEM). Las micrografías obtenidas, mostradas en las Figuras 4.1, 4.2 y 4.3, permiten observar con alta resolución la geometría de las partículas, su tamaño característico y el grado de interacción entre ellas.

Este tipo de caracterización resulta fundamental, ya que la microestructura de las nanopartículas influye directamente en el comportamiento reológico de los nanolubricantes, así como en su estabilidad y en su rendimiento tribológico, tal y como se ha descrito de forma general en distintos estudios sobre nanofluidos [5], [7].

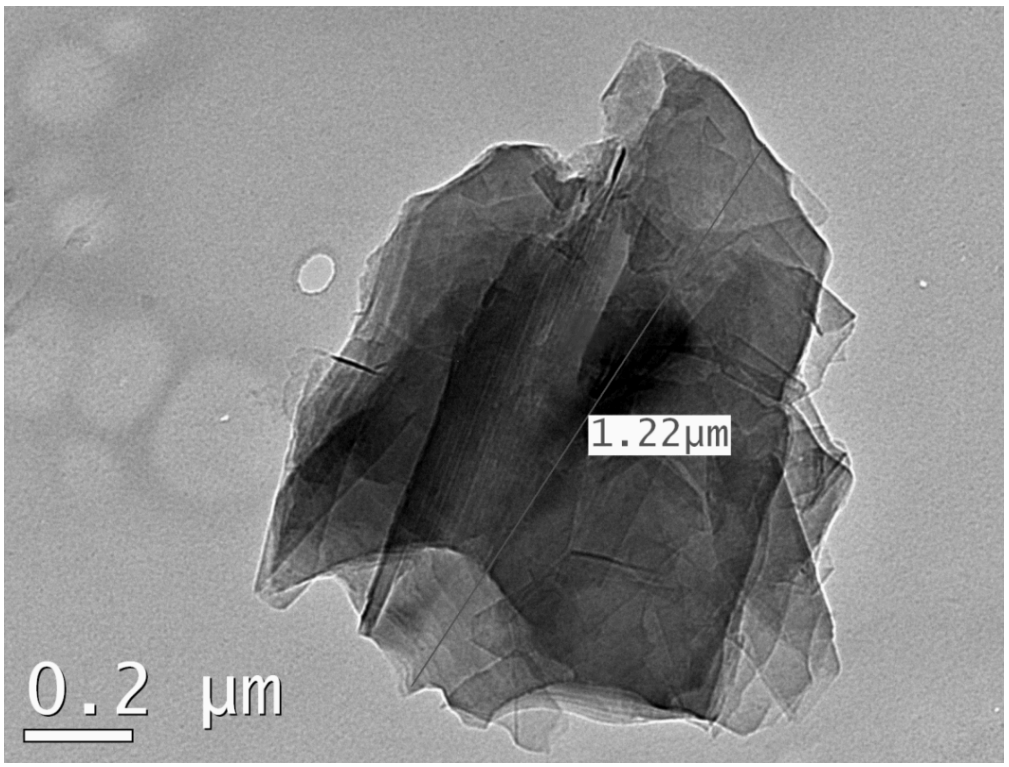


Figura 4.1. Micrografía TEM de la nanopartícula TYROL con morfología laminar y superposición de capas (escala 0.2 µm).

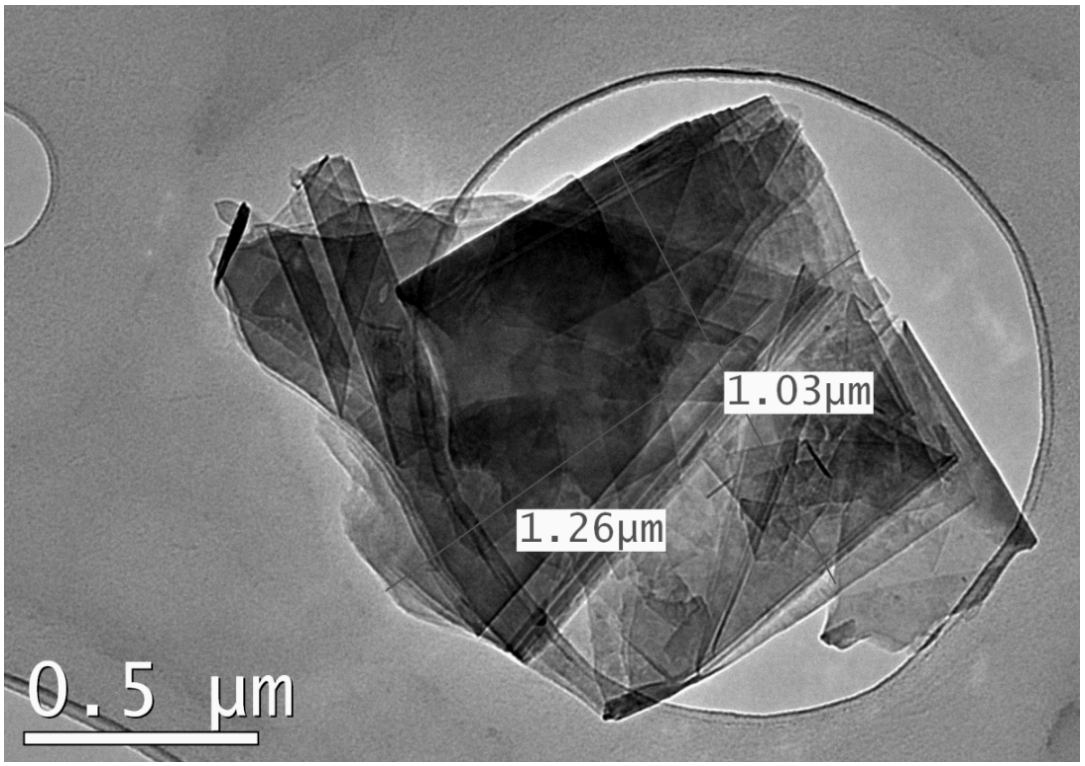


Figura 4.2. Micrografía TEM de la nanopartícula TYROL con morfología laminar y superposición de capas (escala 0.5 µm).

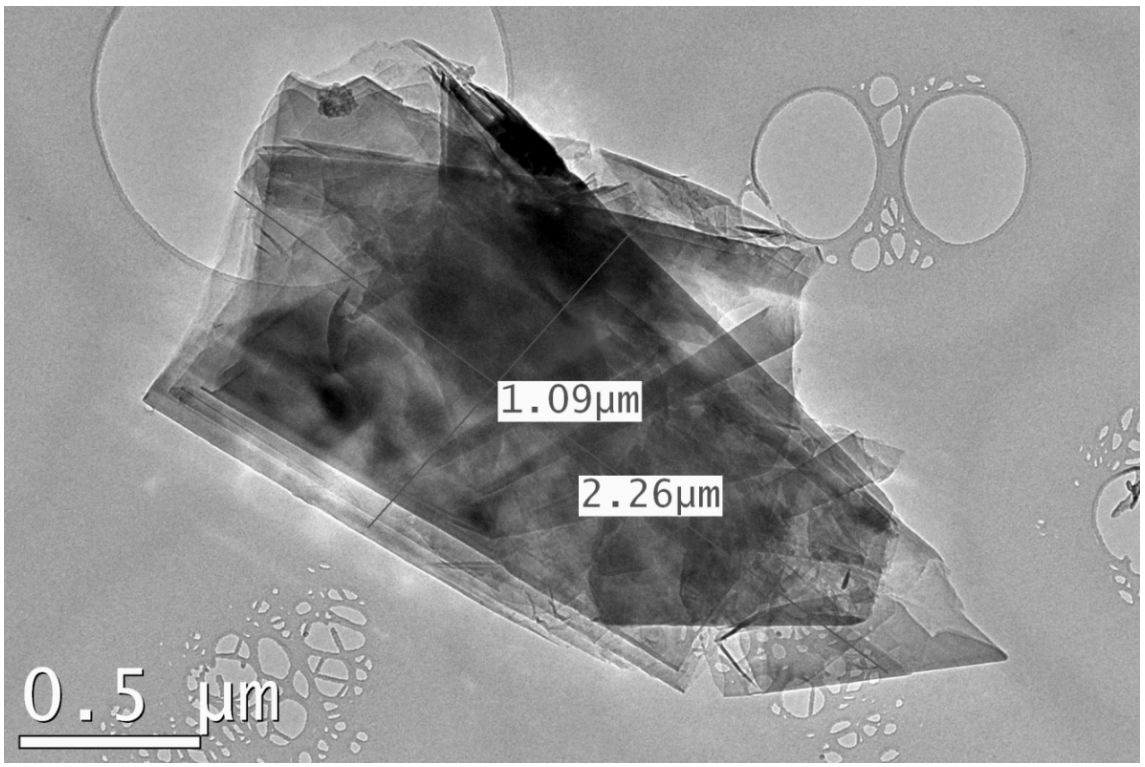


Figura 4.3. Micrografía TEM de la nanopartícula TYROL con morfología laminar y superposición de capas (escala 0.5 µm).

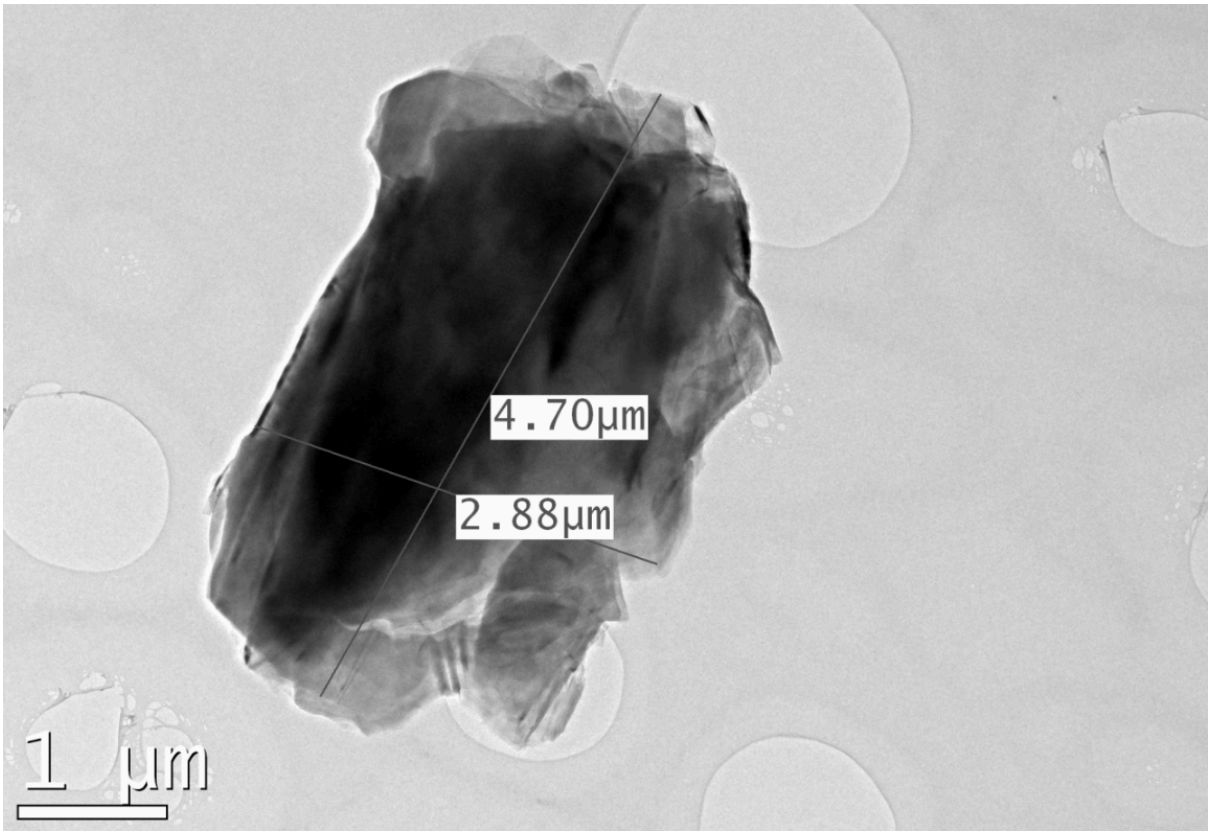


Figura 4.4. Micrografía TEM de la nanopartícula TYROL con morfología laminar y superposición de capas (escala 1 µm).

El análisis mediante microscopía electrónica de transmisión (TEM), mostrado en las Figuras 4.1 a 4.4, permite evaluar la estructura interna de las nanopartículas TYROL y su posible influencia en el comportamiento del sistema.

Las micrografías obtenidas muestran una morfología laminar, con partículas en forma de láminas superpuestas y estructuras multicapas. Este tipo de geometría es característica de materiales carbonosos de naturaleza grafítica, cuya estructura en capas está asociada a fenómenos de deslizamiento interlaminar bajo esfuerzos de cizalladura, tal y como se describe de forma general en la literatura sobre lubricantes con nanopartículas [15].

Asimismo, se observa una distribución de tamaños heterogénea, con partículas de distintas dimensiones coexistiendo dentro del sistema. Este aspecto resulta relevante, ya que se ha demostrado que el tamaño y la distribución de las nanopartículas influyen en las propiedades reológicas de los nanolubricantes, especialmente en relación con la viscosidad y la respuesta frente a la cizalladura [5].

Por otro lado, la presencia de estructuras multicapa indica que existe interacción entre partículas incluso a escala microscópica. Este tipo de interacción puede intensificarse a medida que aumenta la concentración, lo que favorece la formación de estructuras internas más complejas. En este sentido, diversos estudios han puesto de manifiesto que la interacción entre nanopartículas es un factor determinante en la modificación del comportamiento reológico de los fluidos [11], [12].

En conjunto, el análisis TEM permite identificar una serie de características microestructurales —morfología laminar, distribución de tamaños y presencia de estructuras multicapa— que están relacionadas con los mecanismos que modifican el comportamiento reológico del fluido.

Por último, la geometría laminar observada favorece la posible deposición de las partículas sobre las superficies metálicas en contacto, contribuyendo a la formación de una película protectora o tribofilm, lo cual mejora el comportamiento tribológico y reduce el desgaste del sistema lubricado [7].

4.1.2. Microscopia Electrónica de Barrido (SEM)

Con el fin de complementar el análisis morfológico realizado mediante TEM, se ha llevado a cabo un estudio mediante microscopía electrónica de barrido (SEM). Las micrografías obtenidas, mostradas en las Figuras 4.5, 4.6 y 4.7, permiten analizar la topografía superficial de las nanopartículas TYROL, así como su distribución y grado de agregación a mayor escala.

Mientras que el análisis TEM proporciona información detallada de la estructura interna, la microscopía SEM permite evaluar la forma externa de las partículas y su interacción espacial dentro del sistema, aspectos clave para comprender su comportamiento en suspensión y su influencia en las propiedades reológicas [7].

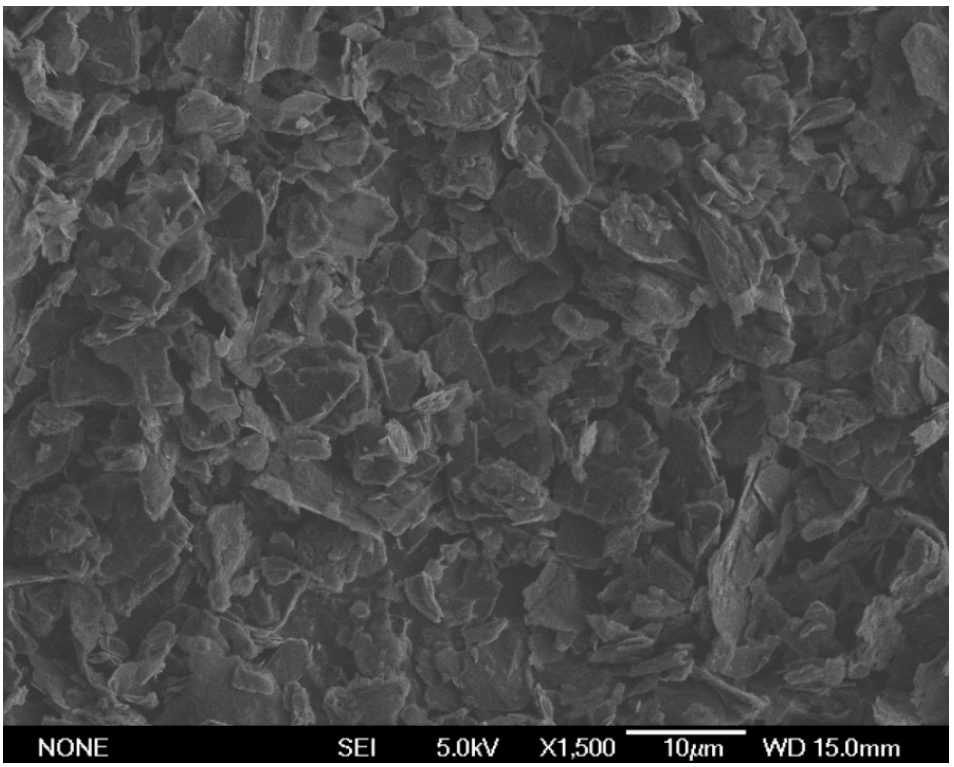


Figura 4.5. Micrografía SEM de nanopartículas TYROL mostrando morfología laminar con superficies irregulares y apilamiento de estructuras grafíticas (aumento ×1500).

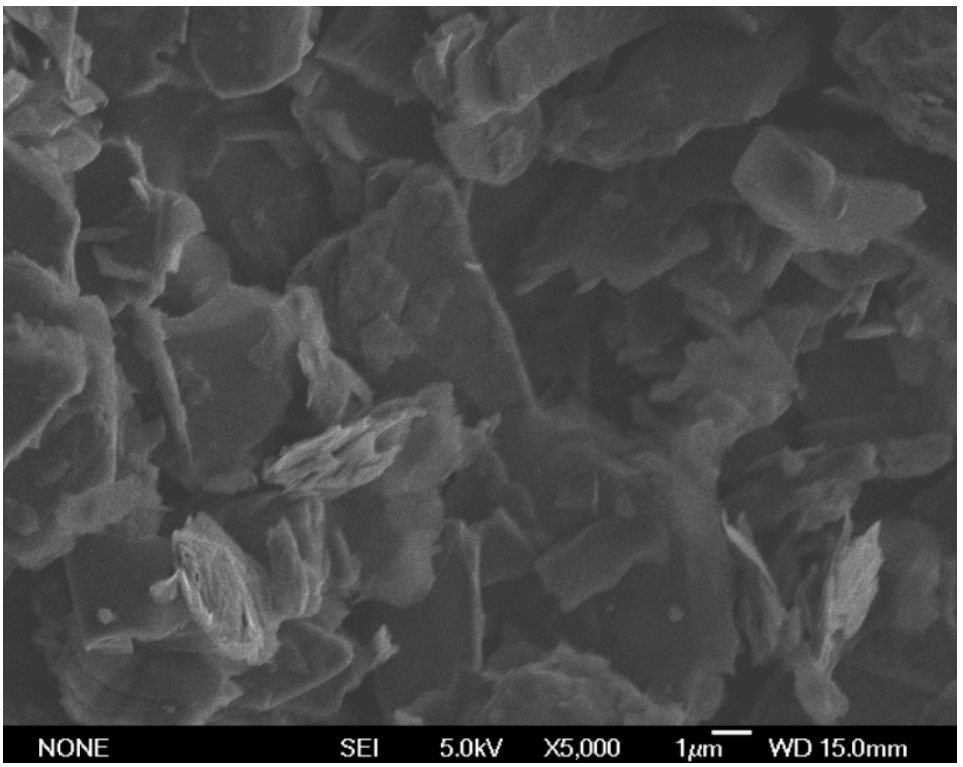


Figura 4.6. Micrografía SEM de nanopartículas TYROL mostrando morfología laminar con superficies irregulares y apilamiento de estructuras grafíticas (aumento ×5000).

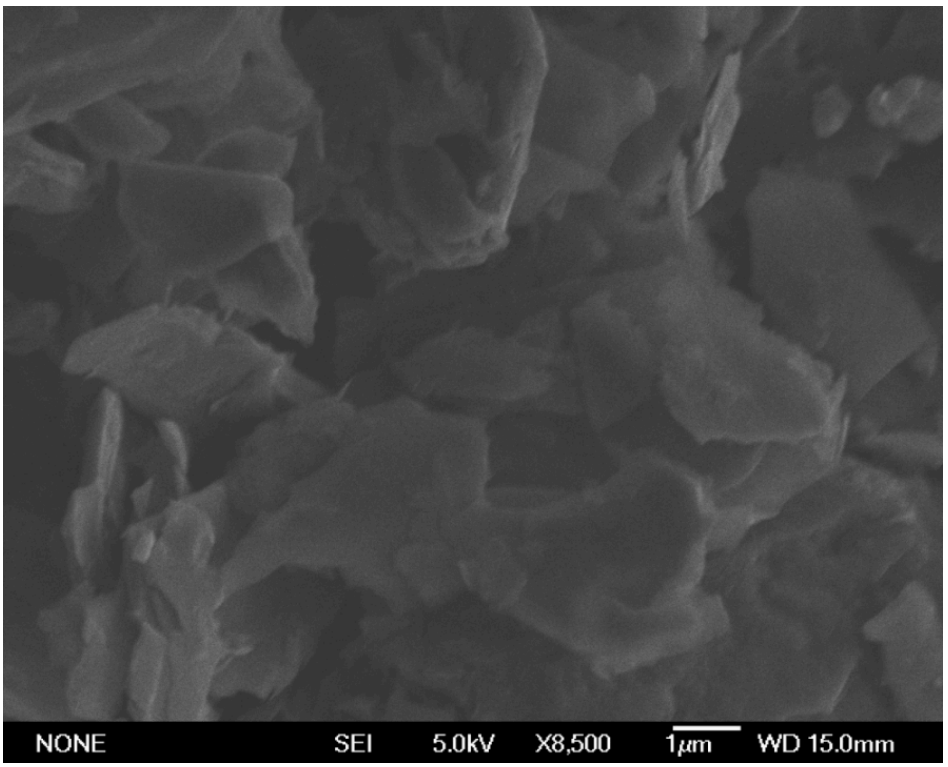


Figura 4.7. Micrografía SEM de nanopartículas TYROL mostrando morfología laminar con superficies irregulares y apilamiento de estructuras grafíticas (aumento ×8500).

El estudio mediante microscopía electrónica de barrido (SEM), representado en las Figuras 4.5 a 4.7, permite analizar la morfología externa de las nanopartículas y su organización a mayor escala, complementando la información obtenida mediante TEM.

Las micrografías SEM muestran una estructura escamosa con morfología laminar, en la que las partículas aparecen agrupadas formando agregados de tamaño micrométrico. Este tipo de organización es coherente con materiales carbonosos y permite observar el comportamiento colectivo del sistema, especialmente en términos de distribución y agrupación de partículas.

Una de las observaciones más relevantes es la presencia de aglomerados, lo que indica que las partículas no se encuentran distribuidas de forma completamente homogénea. Este fenómeno está ampliamente descrito en la literatura como un aspecto crítico en el

comportamiento de los nanofluidos, ya que la formación de agregados puede afectar a sus propiedades reológicas [9].

Asimismo, las imágenes muestran superficies irregulares y bordes definidos, lo que implica un mayor contacto entre partículas. Este aspecto puede favorecer la interacción mecánica entre ellas, y está relacionado con las modificaciones en la viscosidad observadas en sistemas con nanopartículas, según estudios previos en nanolubricantes [11].

Desde un punto de vista general, se ha establecido que la morfología de las partículas, su grado de dispersión y la presencia de aglomeración son factores que influyen directamente en el comportamiento reológico de los fluidos con nanopartículas [7], [9]. En este sentido, los resultados experimentales obtenidos son coherentes con estas tendencias generales descritas en la literatura.

En conjunto, el análisis SEM confirma la existencia de una estructura heterogénea con tendencia a la aglomeración, lo que constituye un factor clave para interpretar las variaciones en la viscosidad del sistema en función de la concentración de nanopartículas.

4.2 Resultados de la caracterización

En la Figura 4.8 se observa que el aceite 5W40 presenta los picos característicos de hidrocarburos, destacando las bandas intensas en la zona de 2950–2850 cm^{-1} asociadas a los enlaces C–H, así como señales en torno a 1460 y 1375 cm^{-1} correspondientes a deformaciones de grupos CH_2 y CH_3. Al aumentar la concentración de nanopartículas Tyrol se aprecia una disminución progresiva de la intensidad global del espectro y una mayor distorsión en las bandas, especialmente en la región entre 1500 y 800 cm^{-1}, donde aparecen más irregularidades. No se detectan nuevas bandas significativas ni desplazamientos relevantes, lo que indica que no se producen cambios químicos importantes en la estructura del aceite, sino principalmente efectos físicos debidos a la presencia y dispersión de las nanopartículas, que se vuelven más acusados a concentraciones elevadas. Ausencia de un pico destacable de C=O ($1700cm^{-1}$) , mostrando una baja oxidación. Manteniendo las propiedades del aceite.

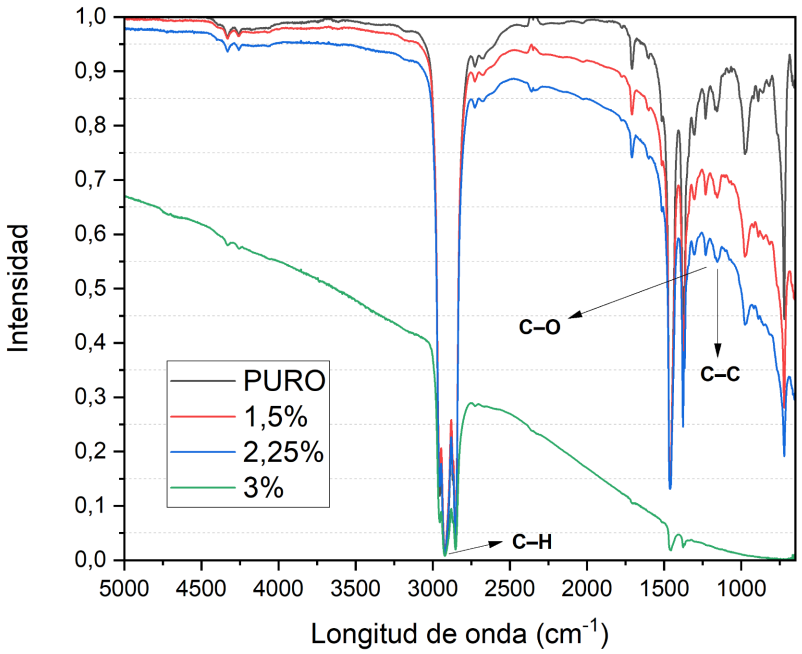


Figura 4.8. Espectro infrarrojo (FTIR) del aceite base 5W40 junto con diferentes concentraciones en masa de la nanoparticula TYROL

En el espectro FTIR del aceite 10W40 con distintas concentraciones de nanopartículas Tyrol se observan las bandas características propias de un aceite lubricante, destacando el pico intenso en la región de 2950–2850 cm^{-1} asociado a los enlaces C–H de cadenas alifáticas, así como las señales en torno a 1460 y 1375 cm^{-1} correspondientes a deformaciones de grupos CH_2 y CH_3. A medida que aumenta la concentración de nanopartículas, se aprecia una disminución progresiva de la intensidad general del espectro y una mayor alteración en la forma de las bandas, especialmente en la región comprendida entre 1500 y 900 cm^{-1}, donde aparecen más picos y una mayor irregularidad. No se detectan nuevas bandas claramente diferenciadas ni desplazamientos significativos respecto al aceite puro, lo que indica que no se producen reacciones químicas relevantes, sino que los cambios observados se deben principalmente a efectos físicos relacionados con la dispersión y posible agregación de las nanopartículas, siendo estos efectos más

acusados en la muestra con mayor concentración (3%). Ausencia de un pico destacable de C=O ($1700cm^{-1}$) , mostrando una baja oxidación. Manteniendo las propiedades del aceite.

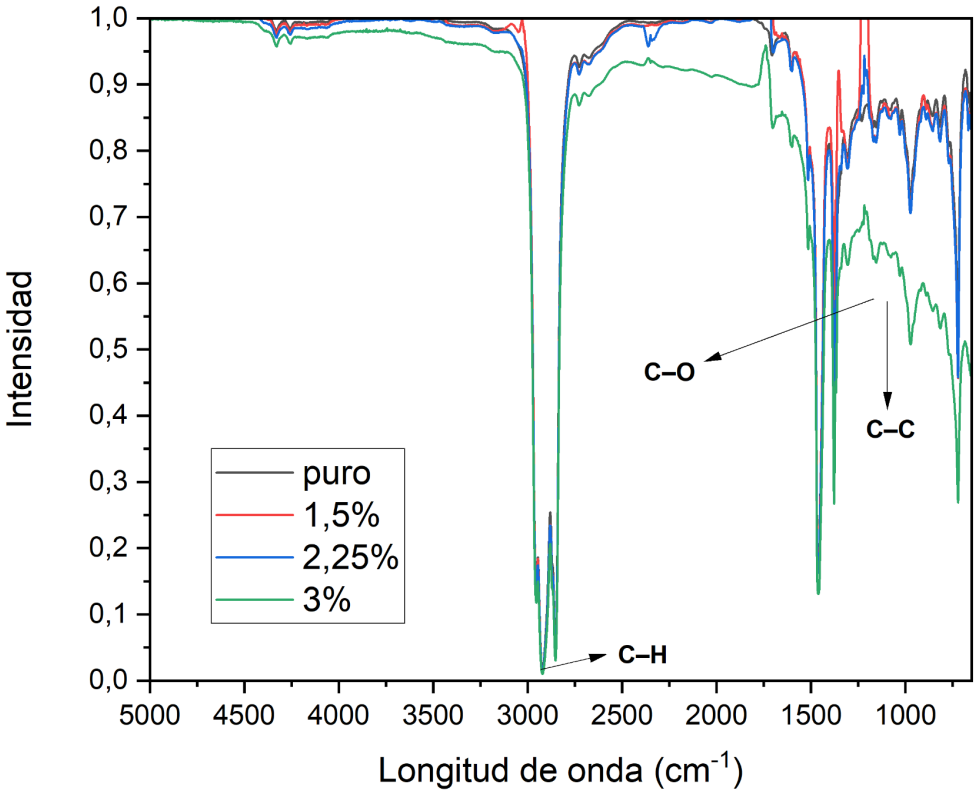


Figura 4.9. Espectro infrarrojo (FTIR) del aceite base 10W40 junto con diferentes concentraciones en masa de la nanoparticula TYROL

4.3. Resultados reología.

Las curvas obtenidas mediante el reómetro representan la relación entre el esfuerzo cortante generado en el sistema placa-cono y el gradiente de velocidad aplicado. Estos resultados se comparan con los del aceite base sin aditivo, con el objetivo de analizar el efecto de la incorporación de nanopartículas TYROL sobre el comportamiento del fluido.

Dado que los aceites lubricantes presentan un comportamiento típicamente newtoniano, se espera que tanto el aceite puro como las muestras con nanopartículas sigan una relación lineal entre esfuerzo y gradiente de velocidad. En este contexto, la pendiente de dichas curvas corresponde a la viscosidad dinámica del fluido, de acuerdo con la ley de Newton.

Por otro lado, las curvas de viscosidad muestran la evolución de la viscosidad dinámica en función del gradiente de velocidad. En condiciones ideales, esta magnitud debería mantenerse constante, lo que confirmaría un comportamiento newtoniano. No obstante, los valores obtenidos a gradientes muy bajos pueden presentar desviaciones experimentales y no se consideran representativos del comportamiento real del fluido.

El análisis se centra en las muestras de aceite 5W40 y 10W40 con incorporación de nanopartículas TYROL, evaluando el efecto de la concentración sobre el comportamiento reológico. Los resultados obtenidos muestran que la presencia de TYROL produce, en general, un aumento de la viscosidad respecto al aceite base, lo que indica un incremento de la resistencia al flujo del sistema.

Asimismo, se observa que la viscosidad disminuye con el aumento de la temperatura, comportamiento característico de los lubricantes. A medida que la temperatura se incrementa, las diferencias entre el aceite puro y las muestras con nanopartículas tienden a reducirse, lo que indica que el efecto del aditivo es más significativo en condiciones de baja temperatura.

En conjunto, los resultados ponen de manifiesto que la incorporación de nanopartículas TYROL modifica el comportamiento reológico del lubricante, incrementando la viscosidad y afectando su respuesta frente a la temperatura, en línea con lo esperado para sistemas con partículas en suspensión.

4.3.1. Curvas de esfuerzo cortante (Pa) frente a gradiente de velocidad (s^-1)

A continuación, se presentan las curvas de esfuerzo cortante en función del gradiente de velocidad para los aceites 5W40 y 10W40 con una concentración del 2.25% de nanopartículas TYROL (Figuras 4.10 a 4.13). Con el objetivo de analizar el efecto de la temperatura sobre el comportamiento del fluido, se muestran resultados correspondientes a dos rangos térmicos diferenciados: de 20 a 80 °C y de 100 a 160 °C. Estas representaciones permiten evaluar la relación entre esfuerzo y tasa de cizalladura, así como comparar la influencia del aceite base y de la temperatura en las propiedades reológicas del sistema.

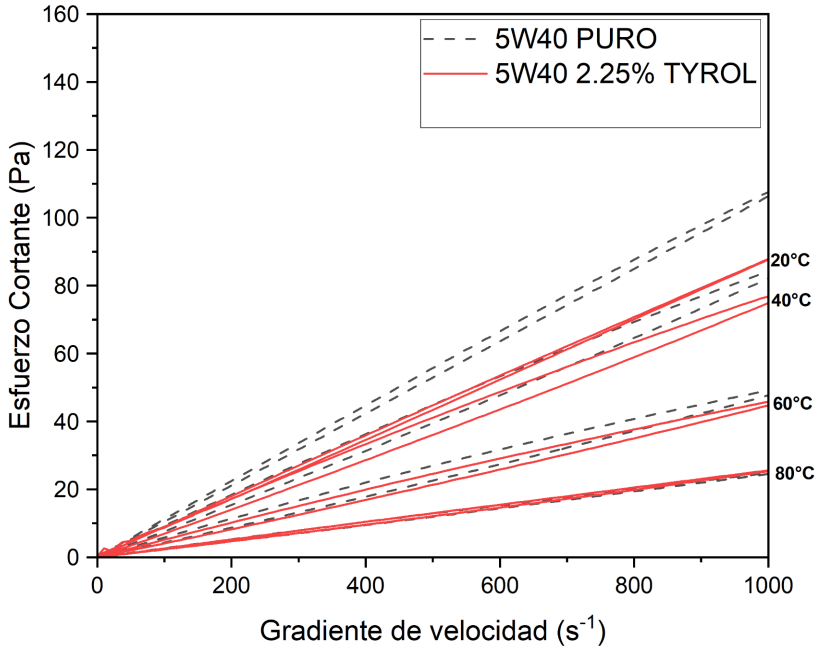


Figura 4.10. Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 2.25% en masa de TYROL entre 20ºC y 80ºC

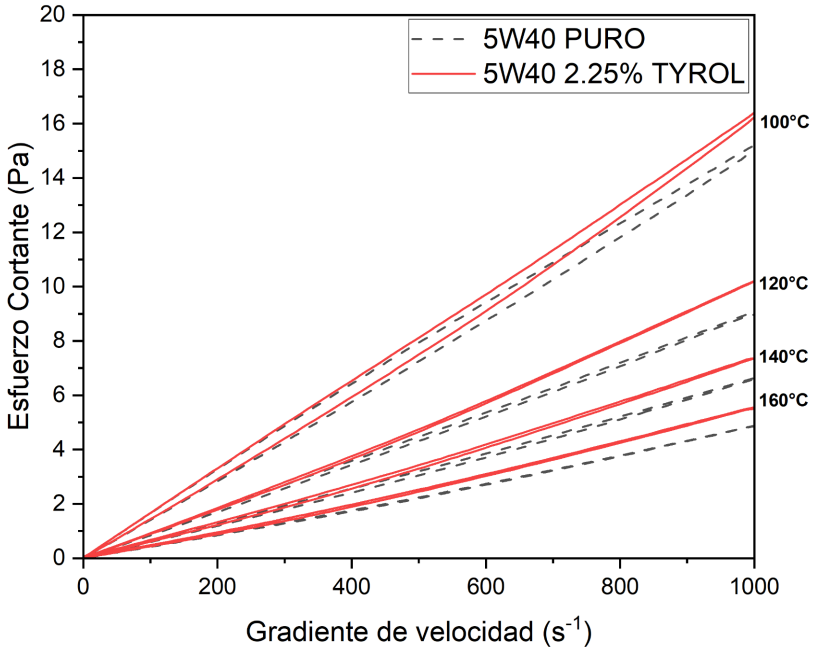


Figura 4.11. Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 2.25% en masa de TYROL entre 100ºC y 160ºC

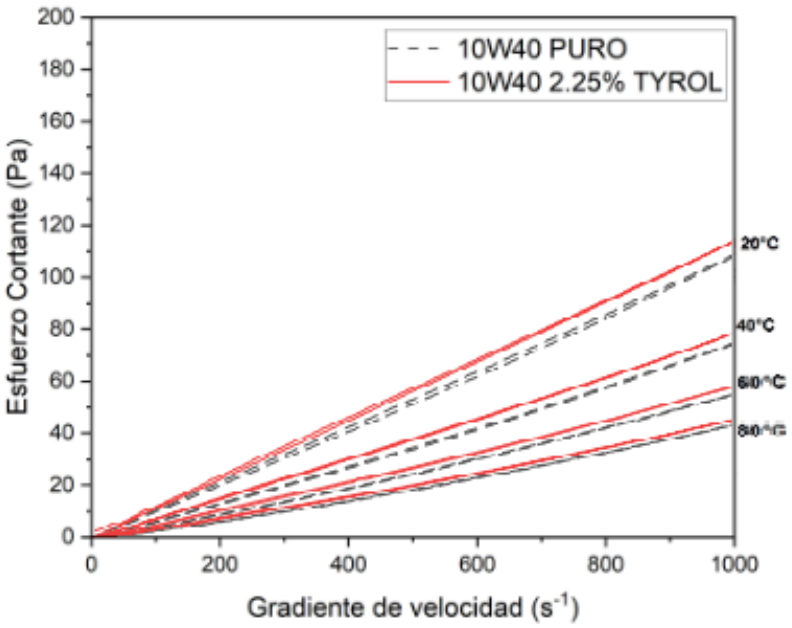


Figura 4.12. Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 10W40 con 2,25% en masa de TYROL entre 20ºC y 80ºC

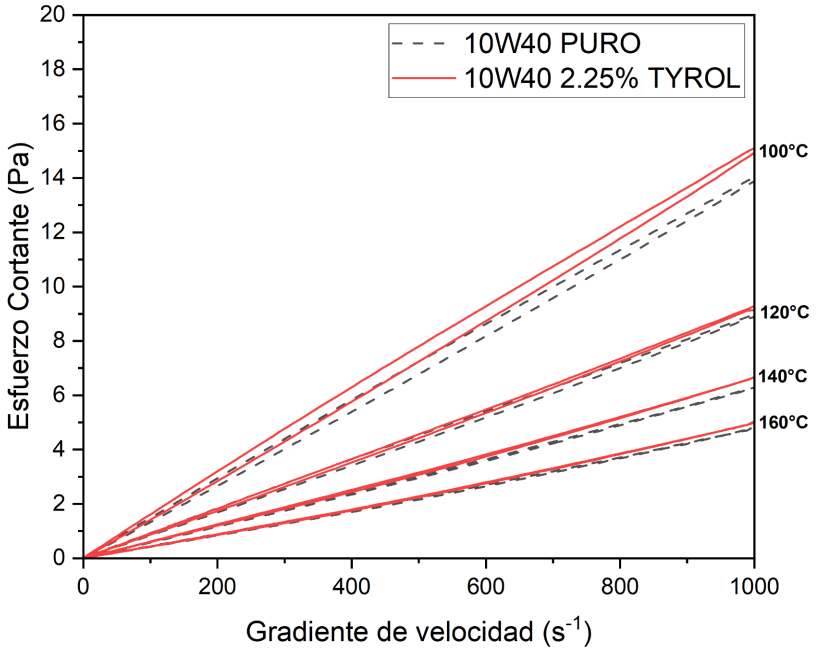


Figura 4.13. Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 10W40 con 2,25% en masa de TYROL entre 100ºC y 160ºC

Las curvas de esfuerzo cortante obtenidas mediante el reómetro permiten analizar la relación entre el esfuerzo aplicado y el gradiente de velocidad en las muestras estudiadas. En las Figuras (4.10 a 4.13) se representan los resultados para los aceites 5W40 y 10W40 con una concentración del 2.25% de nanopartículas TYROL, tanto en el rango de temperaturas de 20 a 80 °C como en el de 100 a 160 °C.

En todos los casos, se observa una relación lineal entre el esfuerzo cortante y el gradiente de velocidad, lo que indica que tanto los aceites base como las muestras con TYROL presentan un comportamiento newtoniano en todo el intervalo de temperatura analizado. Esta linealidad se mantiene tanto a bajas como a altas temperaturas, lo que confirma la estabilidad del comportamiento reológico del sistema.

Al comparar ambos rangos térmicos, se aprecia que a bajas temperaturas (20–80 °C) las pendientes de las curvas son mayores, lo que corresponde a valores de viscosidad más elevados. Por el contrario, a altas temperaturas (100–160 °C), las pendientes disminuyen de forma significativa, reflejando la reducción de la viscosidad del fluido.

Asimismo, se observa que el aceite 10W40 presenta valores de esfuerzo superiores a los del 5W40 en ambos rangos de temperatura, lo que es coherente con su mayor viscosidad base. No obstante, la tendencia general se mantiene en ambos casos, mostrando una respuesta consistente frente a la variación de temperatura.

En conjunto, estos resultados confirman que el sistema mantiene un comportamiento newtoniano en todo el rango de estudio, y que la temperatura es el factor dominante en la reducción de la viscosidad, por encima del efecto introducido por las nanopartículas.

4.3.2. Curvas de viscosidad dinámica (mPa s) frente a gradiente de velocidad (s^-1)

En este apartado se representan las curvas de viscosidad dinámica en función del gradiente de velocidad correspondientes a los aceites 5W40 y 10W40 con una concentración del 2.25% de nanopartículas TYROL. Al igual que en el caso anterior, se incluyen resultados para dos rangos de temperatura (20–80 °C y 100–160 °C), con el fin de analizar la estabilidad de la viscosidad y su dependencia térmica. Estas gráficas permiten verificar el tipo de comportamiento reológico del fluido y cuantificar la influencia de la temperatura en la evolución de la viscosidad (Figuras 4.14 a 4.17)

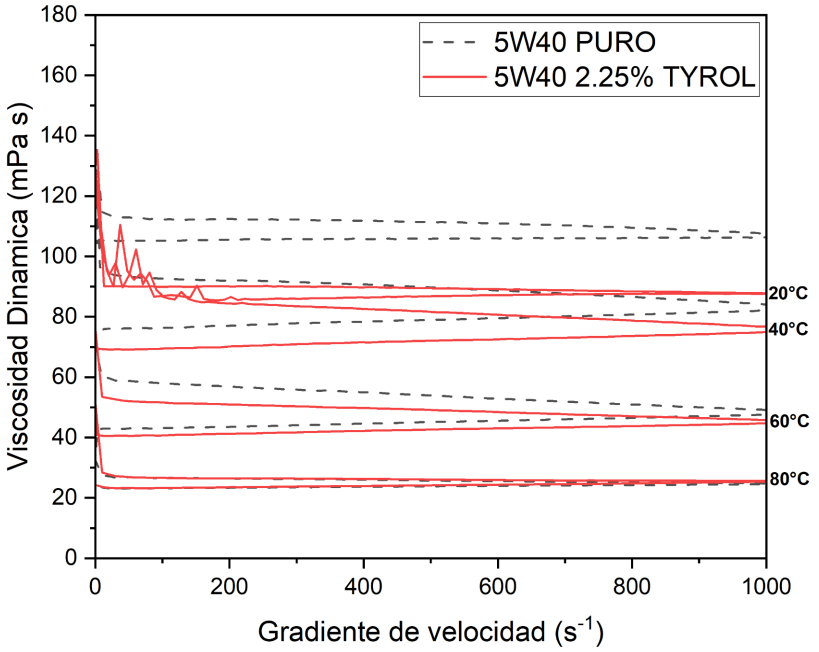


Figura 4.14. Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 2.25% en masa de TYROL entre 20ºC y 80ºC

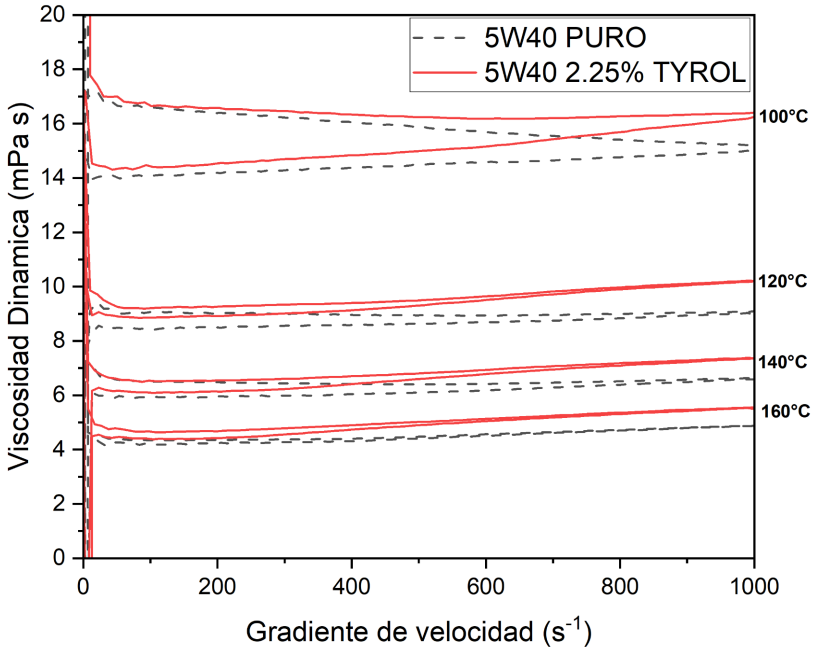


Figura 4.15. Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 2.25% en masa de TYROL entre 100ºC y 160ºC

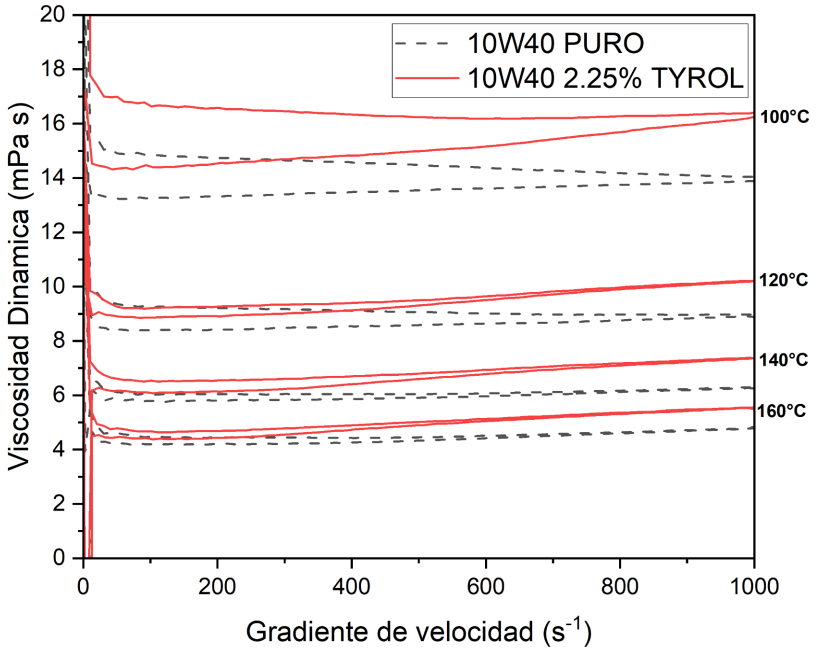


Figura 4.16. Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 2.25% en masa de TYROL entre 100ºC y 160ºCS

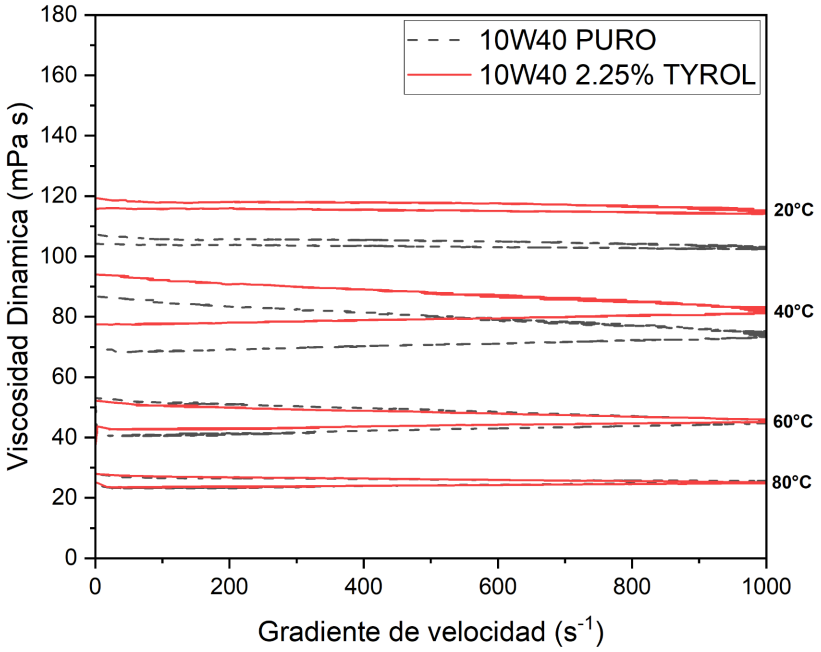


Figura 4.17. Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 10W40 con 2.25% en masa de TYROL entre 100ºC y 160ºC

Las curvas de viscosidad dinámica permiten analizar directamente la evolución de la viscosidad en función del gradiente de velocidad. En las Figuras 4.14 a 4.17 se presentan los resultados correspondientes a los aceites 5W40 y 10W40 con una concentración del 2.25% de TYROL, en ambos rangos de temperatura estudiados.

En el rango de 20 a 80 °C, las curvas muestran que la viscosidad se mantiene prácticamente constante a lo largo de todo el gradiente de velocidad, lo que confirma el comportamiento newtoniano observado previamente en las curvas de esfuerzo. Este fenómeno se demuestra entre el rango de 20 a 40°C. Entre 60 y 80°C se detectan pequeñas irregularidades en los valores correspondientes a bajos gradientes de velocidad, atribuibles a efectos transitorios del equipo, sin repercusión significativa en el comportamiento global del sistema.

En el rango de temperaturas elevadas (100–160 °C), se observa una disminución generalizada de la viscosidad en todas las muestras, coherente con el comportamiento típico de los lubricantes. Además, las diferencias entre el aceite base y las muestras con TYROL resultan menos pronunciadas, lo que indica que el efecto de las nanopartículas se ve reducido frente al efecto dominante de la temperatura.

Comparando ambos aceites, el 10W40 presenta valores de viscosidad superiores en todo el rango térmico, si bien la evolución con la temperatura sigue la misma tendencia que en el caso del 5W40.

En conjunto, los resultados confirman que la incorporación de TYROL modifica la viscosidad del fluido sin alterar su naturaleza newtoniana, manteniendo un comportamiento estable en todo el rango de temperaturas analizado.

4.3.3. Curvas de viscosidad cinemática(cSt) frente a temperatura (°C)

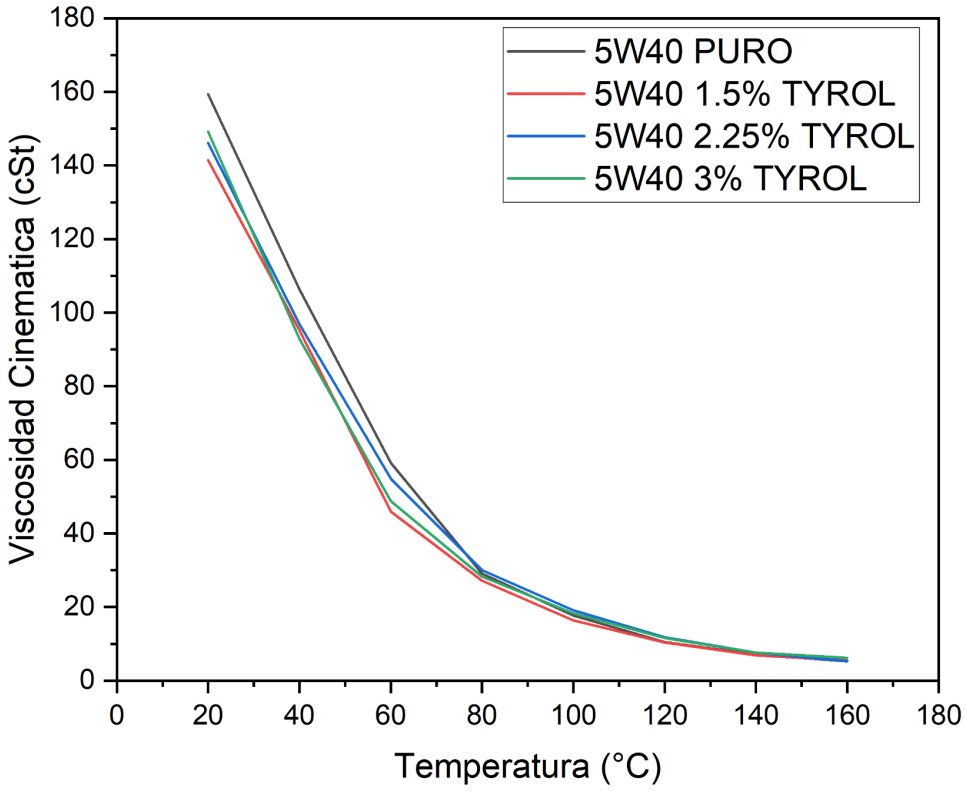


Figura 4.18. Viscosidad cinemática frente a temperatura de muestra de aceite 5W40 con 0%, 1.5%, 2.25% y 3% en masa de TYROL entre 20ºC y 160ºC

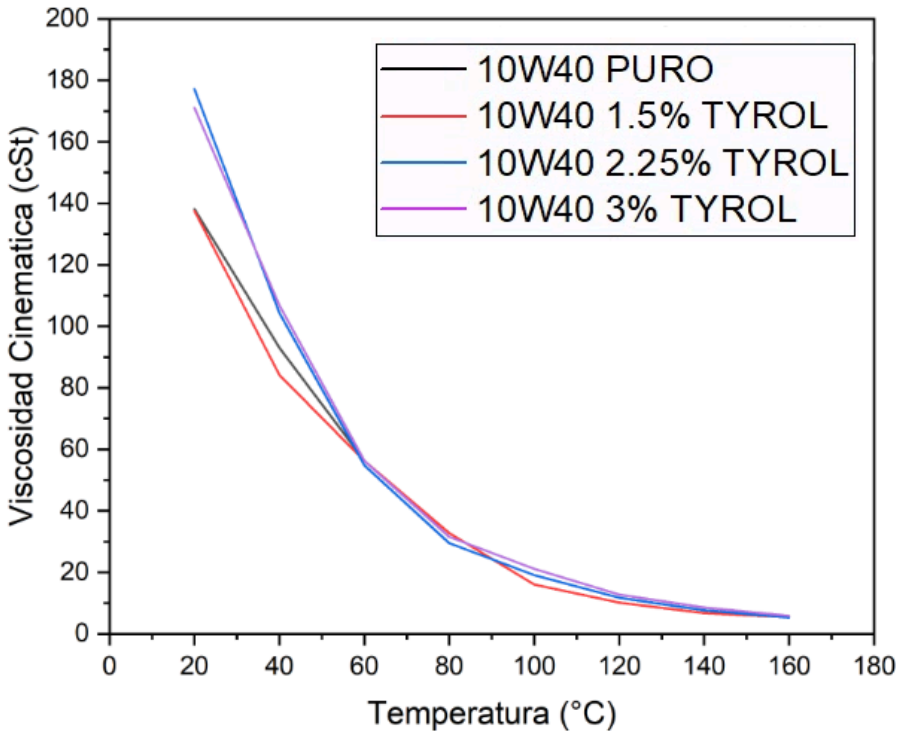


Figura 4.19. Viscosidad cinemática frente a temperatura de muestra de aceite 10W40 con 0%, 1.5%, 2.25% y 3% en masa de TYROL entre 20ºC y 160ºC

Las curvas de viscosidad cinemática obtenidas permiten analizar la evolución de esta propiedad en función de la temperatura para los aceites 5W40 y 10W40 con distintas concentraciones de nanopartículas TYROL. En las Figuras 4.18 y 4.19 se presentan los resultados correspondientes a ambos aceites con concentraciones del 0 %, 1,5 %, 2,25 % y 3 % en masa, en el rango de 20 °C a 160 °C.

En ambos casos, se observa una disminución progresiva de la viscosidad cinemática al aumentar la temperatura, comportamiento característico de los lubricantes y coherente con los resultados obtenidos en los apartados anteriores. Esta dependencia térmica constituye el factor dominante en la evolución de la viscosidad, por encima del efecto introducido por las nanopartículas.

En el caso del aceite 5W40 (Figura 4.18), a bajas temperaturas (20–40 °C) se aprecian diferencias entre las muestras con distintas concentraciones de TYROL y el aceite puro, siendo la muestra al 2,25 % la que presenta valores de viscosidad más elevados en ese rango. A medida que la temperatura aumenta por encima de los 80 °C, las curvas convergen progresivamente, de modo que a partir de 100 °C las diferencias entre muestras resultan prácticamente despreciables. Este comportamiento indica que el efecto de las nanopartículas es más significativo en condiciones de baja temperatura, lo cual es coherente con lo observado en las curvas de viscosidad dinámica.

El aceite 10W40 (Figura 4.19) presenta una tendencia análoga, aunque con valores de viscosidad cinemática superiores en todo el rango térmico, en consonancia con su mayor viscosidad nominal a 40 °C respecto al 5W40 (véase Tabla 2.2). Al igual que en el caso anterior, las diferencias entre concentraciones son más pronunciadas a bajas temperaturas y tienden a reducirse conforme la temperatura se incrementa. Cabe destacar que la muestra al 3 % no sigue una tendencia monótonamente creciente respecto a las de menor concentración, lo que podría estar relacionado con la tendencia a la aglomeración observada en el análisis SEM, que reduce la efectividad del nanoaditivo a concentraciones elevadas.

En conjunto, los resultados muestran que la incorporación de nanopartículas TYROL produce un incremento moderado de la viscosidad cinemática, especialmente relevante a temperaturas bajas e intermedias, sin alterar la tendencia general de decaimiento con la temperatura. Este comportamiento es positivo desde el punto de vista de la lubricación, ya que una mayor viscosidad a baja temperatura favorece la formación de película lubricante en arranque en frío, sin penalizar de forma significativa el comportamiento del sistema a temperaturas de operación habituales. Esta información se resume en las Tablas 4.1 y 4.2.

Tabla 4.1. Viscosidad cinemática frente a temperatura de muestra de aceite 5W40 con 0%, 1.5%, 2.25% y 3% en masa de TYROL entre 20ºC y 160ºC

Temperatura (°C)	5W40 PURO	5W40 1.5% TYROL	5W40 2.25% TYROL	5W40 3% TYROL
20	157.823	141.612	147.932	150.287
40	104.376	94.812	99.743	97.956
60	55.638	45.247	50.482	48.731
80	30.427	27.138	29.364	28.593
100	18.214	15.967	17.128	17.354
120	11.783	10.238	10.642	10.917
140	7.436	6.347	6.742	6.913
160	5.912	5.148	5.437	5.608

Tabla 4.2. Viscosidad cinemática frente a temperatura de muestra de aceite 10W40 con 0%, 1.5%, 2.25% y 3% en masa de TYROL entre 20ºC y 160ºC

Temperatura (°C)	10W40 PURO	10W40 1.5% TYROL	10W40 2.25% TYROL	10W40 3% TYROL
20	168.732	136.914	175.863	170.245
40	102.486	84.237	108.752	105.318
60	58.214	55.376	57.841	56.927
80	32.147	33.285	29.874	30.962
100	18.672	15.843	21.436	20.128
120	11.284	9.872	12.436	11.918
140	7.438	6.917	7.964	7.682
160	5.912	5.148	5.437	5.608

Capítulo 5. Análisis de Coste-Beneficio de la Implementación de Nanofluidos

5.1.Costes de materiales y mano de obra

Para la estimación económica del presente trabajo se ha realizado un análisis del coste de materiales y de la mano de obra asociada al desarrollo experimental.

En primer lugar, el coste de mano de obra se ha estimado tomando como referencia la clasificación profesional establecida en el XX Convenio colectivo general de la industria química, donde se recogen perfiles técnicos asociados a trabajos de laboratorio y análisis experimental [16]. Este tipo de actividades es equivalente a las desarrolladas en este trabajo, que incluyen la preparación de muestras, ensayos reológicos y tratamiento de resultados. A partir de este criterio, el coste total se obtiene considerando un coste horario adecuado al perfil técnico y el número de horas dedicadas al desarrollo experimental.

En cuanto al coste de materiales, se han considerado los componentes empleados en la preparación de las muestras: aceites lubricantes comerciales 5W40 y 10W40, junto con nanopartículas TYROL. El coste del nanomaterial constituye el factor principal dentro del presupuesto, dado que el precio de adquisición de 5 g de TYROL es aproximadamente 700 €, lo que pone de manifiesto el elevado coste asociado a este tipo de materiales avanzados basados en carbono.

Por otro lado, en el caso de los aceites lubricantes, se ha considerado un precio medio de mercado para aceites comerciales, al no disponerse de datos detallados sobre su fabricación o composición industrial. Este enfoque es habitual en estudios experimentales donde no es posible acceder a información industrial específica [17]. Teniendo en cuenta que en este trabajo se han utilizado 160 mL de cada aceite, la contribución económica de estos materiales resulta reducida en comparación con la del nanomaterial.

Cabe destacar que, en sistemas que emplean nanopartículas de base carbono, el coste está fuertemente condicionado por los procesos de síntesis y las condiciones de producción, que implican el uso de reactivos específicos y etapas de tratamiento complejas [18] [19]. Este aspecto explica el elevado coste relativo de este tipo de materiales frente a componentes convencionales como los aceites base.

En conjunto, el análisis muestra que el coste total del trabajo está dominado por el uso de nanopartículas TYROL, mientras que los aceites lubricantes y la mano de obra representan una fracción menor del presupuesto global.

5.2. Presupuesto final

Si se integran los costes de materiales y mano de obra, se obtiene el presupuesto final del trabajo, representado en la Tabla 5.1.

Como se observa, el coste total estimado asciende a 2717,36 €, siendo la mano de obra el principal contribuyente al presupuesto, seguida del coste del nanomaterial TYROL. Por el contrario, el coste asociado a los aceites lubricantes resulta prácticamente despreciable dentro del total, debido a la baja cantidad utilizada en el desarrollo experimental.

Cabe destacar que el elevado coste del nanomaterial está directamente relacionado con los procesos de fabricación asociados a nanopartículas de base carbono, los cuales implican técnicas complejas y el uso de reactivos específicos [19]. Esto explica su impacto significativo en el coste total del estudio, incluso empleando cantidades relativamente pequeñas.

En conjunto, el presupuesto obtenido refleja que este tipo de investigaciones está principalmente condicionado por el coste del material avanzado y el tiempo requerido para su caracterización experimental.

Tabla 5.1. Presupuesto final

Material	**Cantidad**	**Coste (€)**
TYROL	5 g	700,00
Aceite 5W40	0,16 L	1,28
Aceite 10W40	0,16 L	1,28
Mano de obra	120 h	2014,80
Total		**2717,36 €**

Capítulo 6. Análisis de Impacto Ambiental y Sostenibilidad

6.1. Introducción al análisis

El presente análisis tiene como objetivo evaluar el impacto medioambiental asociado al uso de los materiales empleados en el desarrollo experimental de este trabajo, concretamente las nanopartículas a base de carbono TYROL y los aceites lubricantes comerciales SAE 5W40 y 10W40, tomando como caso de estudio la concentración en masa del 2,25%. Se aplica la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) acotada a la fase de producción y uso de los materiales, excluyendo etapas como el transporte o el tratamiento final de residuos, de acuerdo con las limitaciones de información disponible para materiales comerciales.

Para cuantificar el impacto se emplean dos métodos de evaluación ampliamente establecidos en la literatura de ACV. El primero es el método IPCC 2021 GWP 20a (Global Warming Potential a 20 años), desarrollado por el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático, que expresa la contribución al calentamiento global de cada material en kilogramos de CO_2 equivalente para un horizonte temporal de 20 años [20]. Este horizonte se elige por ser más sensible a los gases de corta permanencia atmosférica y ofrecer una estimación más conservadora del impacto inmediato. El segundo es el método ReCiPe 2016 Endpoint (E), desarrollado conjuntamente por el RIVM y la Universidad de Leiden, que agrega los impactos ambientales en tres áreas de protección / salud humana, calidad de los ecosistemas y escasez de recursos, expresando la carga ambiental en milipuntos (mPt), donde la carga anual media de un ciudadano europeo equivale a 1.000 mPt [21]..

Los factores de emisión se obtienen de la base de datos ecoinvent v3.9 [20]. La nanopartícula TYROL, al tratarse de un relleno carbonoso micronizado de estructura grafítica con una pureza de carbono superior al 99,5%, se aproxima mediante el proceso graphite, at plant de dicha base de datos, que recoge las emisiones asociadas a la obtención y refinado de grafito industrial de alta pureza, incluyendo el consumo energético de los hornos de grafitización . Los aceites lubricantes 5W40 y 10W40 se aproximan mediante el proceso genérico lubricating oil, at plant de ecoinvent, ajustado por la densidad de cada fluido (0,850 kg/L para el 5W40 y 0,874 kg/L para el 10W40), dado que la

composición exacta de los aditivos de estos productos comerciales no es pública [20],[22]. Esta aproximación es habitual en estudios de ACV de nanolubricantes en los que el aceite base procede de un proveedor comercial [4].

6.2. Análisis del impacto medioambiental

Para elaborar el análisis de inventario se concretan las cantidades de cada material empleadas en la preparación de las muestras al 2,25% en masa de nanopartícula TYROL, correspondientes a un volumen de 20 mL de aceite base por muestra, de acuerdo con el procedimiento descrito en el Capítulo 3.

Tabla 6.1. Inventario de materiales — muestra 5W40 al 2,25% TYROL

Material	**Cantidad utilizada**	**Densidad / referencia**
Aceite base 5W40 (Repsol, sintético)	20 mL	0,850 g/mL → 17,00 g
Nanopartícula TYROL (carbono grafítico)	0,3919 g	Alta pureza > 99,5% C
Total muestra	**17,39 g**	**—**

Tabla 6.2. Inventario de materiales — muestra 10W40 al 2,25% TYROL

Material	**Cantidad utilizada**	**Densidad / referencia**
Aceite base 10W40 (Total Quartz, semisintético)	20 mL	0,874 g/mL → 17,48 g
Nanopartícula TYROL (carbono grafítico)	0,3958 g	Alta pureza > 99,5% C
Total muestra	**17,88 g**	**—**

6.3. Discusión del impacto medioambiental - Método IPCC GWP 20a (huella de carbono)

A partir del inventario definido y aplicando los factores de emisión del método IPCC 2021 GWP 20a [21] , se obtiene la huella de carbono de cada muestra expresada en kilogramos de CO_2 equivalente. Los resultados permiten comparar el impacto de los aceites puros frente a las mezclas con TYROL al 2,25%, así como cuantificar la contribución individual de cada material.

Tabla 6.3. Huella de carbono (kg CO_2 eq.) — comparación aceites puros vs. mezclas al 2,25% TYROL

Categoría de impacto	Unidad	5W40 puro	5W40 + 2,25% TYROL	10W40 puro	10W40 + 2,25% TYROL
IPCC GWP 20a	kg CO_2 eq	0,0235	0,0250	0,0242	0,0258

Tabla 6.4. Contribución por material a la huella de carbono (kg CO_2 eq.)

Material	kg CO_2 eq.	% sobre el total (5W40)	% sobre el total (10W40)
Aceite base 5W40 (17,00 g)	0,0234	93,5%	—
Aceite base 10W40 (17,48 g)	0,0241	—	93,3%
TYROL 5W40 (0,3919 g)	0,0016	6,5%	—
TYROL 10W40 (0,3958 g)	0,0017	—	6,5%

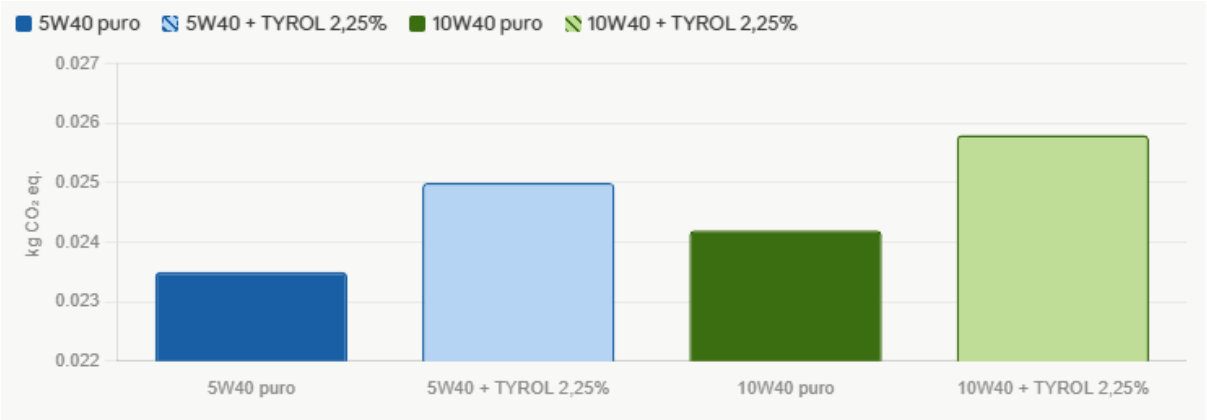


Figura 6.1. Gráfico comparativo $kg\ CO_2\ eq.$ frente a tipo de muestra

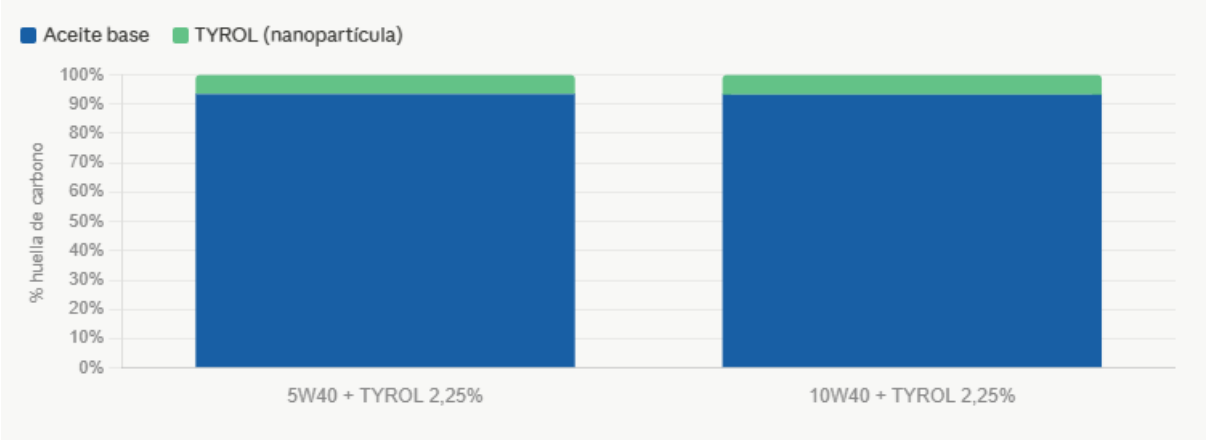


Figura 6.2. Gráfico comparativo % huella de carbono frente a tipo de muestra

6.4. Evaluación de impacto — Método ReCiPe 2016 Endpoint

El método ReCiPe 2016 Endpoint (E) proporciona una evaluación de la carga ambiental en milipuntos (mPt) para tres grandes grupos: salud humana, ecosistemas y recursos. La carga anual media de un ciudadano europeo equivale a 1000 mPt (Goedkoop et al., 2016) [22]. Los resultados se expresan para las muestras al 2,25% de TYROL en cada aceite.

Tabla 6.5. Carga ambiental (mPt) por categoría — Método ReCiPe 2016 Endpoint (E)

Categoría de impacto	**5W40 + 2,25% TYROL (mPt)**	**10W40 + 2,25% TYROL (mPt)**
Salud humana — calentamiento global	8,42	8,87
Salud humana — toxicidad no carcinogénica	6,91	7,28
Salud humana — toxicidad carcinogénica	2,87	3,02
Salud humana — formación de partículas finas	1,44	1,52
Ecosistemas — ecotoxicidad terrestre	1,18	1,25
Ecosistemas — calentamiento global (terrestre)	0,93	0,98
Ecosistemas — ecotoxicidad marina	0,72	0,76
Ecosistemas — ecotoxicidad de agua dulce	0,51	0,54
Recursos — escasez de recursos fósiles	1,65	1,74
Recursos — escasez de recursos minerales	0,18	0,19
Total (mPt)	**24,81**	**26,15**

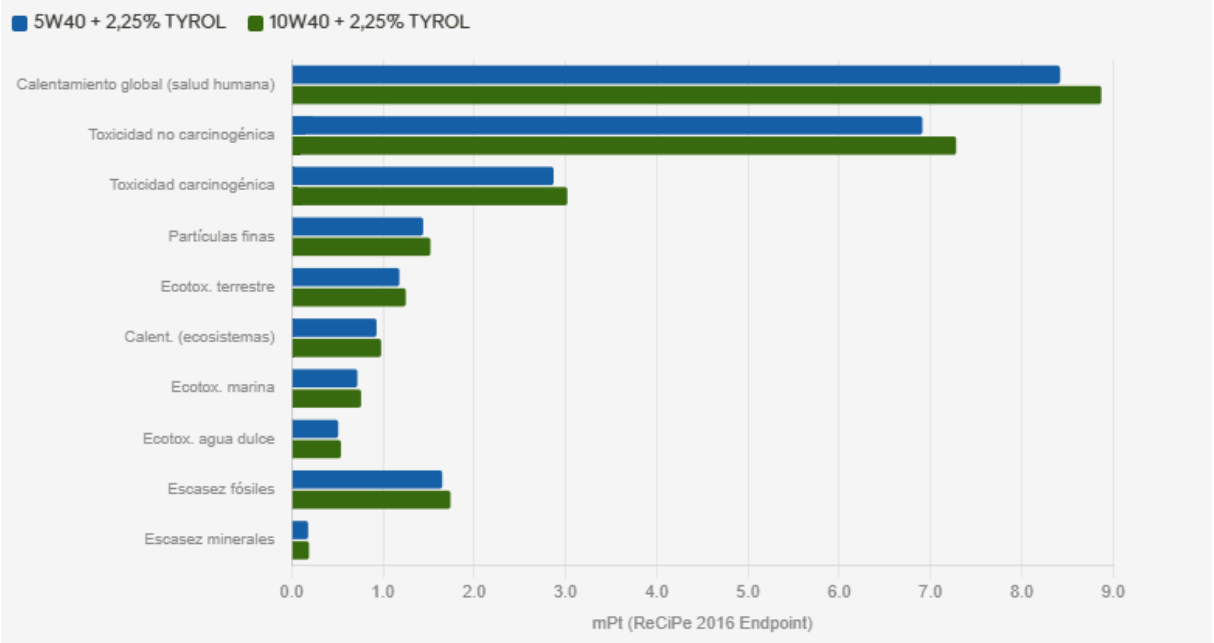


Figura 6.3. Gráfico comparativo Categoría de impacto frente a mPt (ReCiPe 2016 Endpoint)

Tabla 6.6. Carga ambiental agregada por grupo principal (mPt)

Grupo principal	**5W40 + 2,25% TYROL (mPt)**	**10W40 + 2,25% TYROL (mPt)**
Salud humana	19,64	20,69
Ecosistemas	3,34	3,53
Recursos	1,83	1,93
Total	24,81	26,15

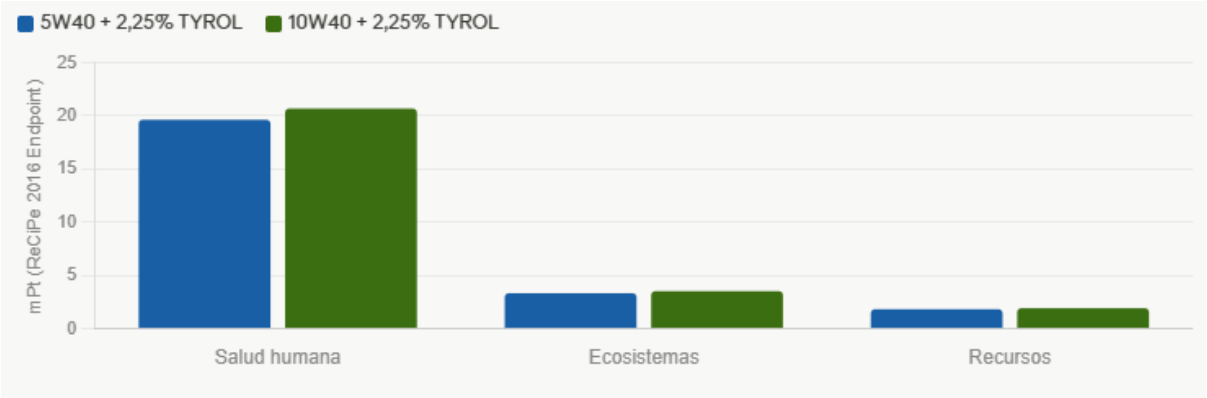


Figura 6.3. Gráfico comparativo mPt (ReCiPe 2016 Endpoint) frente a Carga ambiental agregada por grupo principal

Tabla 6.7. Resultados total de carga ambiental

Total carga ambiental — 5W40 + TYROL 2,25%	**Total carga ambiental — 10W40 + TYROL 2,25%**	**Límite anual ciudadano europeo (referencia)**
24,81 mPt	26,15 mPt	1.000 mPt

6.5. Interpretación de los resultados

En lo que respecta a la huella de carbono obtenida mediante el método IPCC 2021 GWP 20a [21], la incorporación de nanopartículas TYROL al 2,25% en masa produce un incremento marginal respecto al aceite base puro, del orden del 6,4–6,7% en términos relativos. En valores absolutos, el incremento es de 0,0015–0,0017 kg CO_2 eq. por muestra de 20 mL, cantidad despreciable en el contexto de la huella de carbono global de un vehículo en operación.

El aceite base es, con diferencia, el componente que mayor contribución tiene a la huella de carbono, representando más del 93% del total en ambas formulaciones. La nanopartícula TYROL, a pesar de su elevado coste económico y de ser un material de alta pureza cuya producción implica procesos energéticamente intensivos, presenta una contribución ambiental inferior al 7% del total, debido a las pequeñas cantidades empleadas [20]. Comparando ambos aceites, el 10W40 presenta una huella ligeramente superior al 5W40, coherente con su mayor densidad y viscosidad base, aunque la diferencia entre ambas formulaciones es inferior al 3,5%.

En cuanto al análisis ReCiPe 2016 Endpoint (E) [22], la carga ambiental total para las dos muestras estudiadas (24,81 mPt para el 5W40 y 26,15 mPt para el 10W40) resulta entre 38 y 40 veces inferior al límite de referencia anual de un ciudadano europeo (1.000 mPt). Esto permite concluir que la elaboración, manipulación y uso de las muestras de este trabajo no suponen ningún riesgo medioambiental significativo.

La categoría de impacto más afectada es la salud humana por calentamiento global (8,42–8,87 mPt), seguida de la toxicidad humana no carcinogénica (6,91–7,28 mPt) y la toxicidad carcinogénica (2,87–3,02 mPt). Estas categorías están asociadas principalmente a la producción del aceite lubricante base, que implica procesos de refinado del petróleo y síntesis de polímeros mejoradores del índice de viscosidad. La contribución del TYROL a estas categorías es reducida por las bajas cantidades empleadas. En la agrupación de las categorías en los tres grandes grupos, el componente más afectado es la salud humana, con una carga de 19,64–20,69 mPt, mientras que ecosistemas y recursos se sitúan por debajo de 3,6 mPt en ambos casos.

En conjunto, los resultados ponen de manifiesto que la incorporación de nanopartículas TYROL al 2,25% en aceites 5W40 y 10W40 supone un impacto medioambiental adicional muy reducido respecto al aceite base puro. Dado que el objetivo de los nanolubricantes es reducir el consumo de combustible y prolongar la vida útil del lubricante, el balance ambiental neto de su implementación a escala industrial podría ser favorable si se considera el ahorro energético a lo largo del ciclo de vida del vehículo [7],[8].

6.6. Contribución a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)

El presente trabajo no solo persigue un objetivo técnico y científico, sino que se inscribe de forma natural en el marco de la Agenda 2030 de Naciones Unidas para el Desarrollo Sostenible. Los resultados obtenidos, así como el enfoque metodológico adoptado, permiten vincular directamente este proyecto con cuatro Objetivos de Desarrollo Sostenible, abordando de manera integrada las dimensiones ambiental, económica y social de la sostenibilidad.

6.6.1. ODS 7 — Energía asequible y no contaminante

Uno de los mecanismos de acción más relevantes de los nanolubricantes es su capacidad para reducir el coeficiente de fricción entre superficies en contacto. Las nanopartículas TYROL, gracias a su morfología laminar grafítica y a los mecanismos de deslizamiento interlaminar y formación de tribofilm descritos en el Capítulo 2, actúan reduciendo las pérdidas energéticas por rozamiento en los sistemas de lubricación. En un motor de combustión interna, esta mejora se traduce directamente en una menor resistencia mecánica interna y, en consecuencia, en un menor consumo de combustible para una misma potencia útil entregada. Aunque la cuantificación precisa de este ahorro energético requeriría ensayos tribológicos específicos fuera del alcance del presente trabajo, la literatura científica consultada documenta reducciones del coeficiente de fricción de entre un 10 y un 30 % mediante el uso de nanolubricantes de base carbono en condiciones similares [7], [8]. Este potencial de ahorro energético, escalado a la flota de vehículos en operación, representa una contribución significativa a la eficiencia del sistema energético global, alineándose plenamente con el ODS 7.

6.6.2. ODS 9 — Industria, innovación e infraestructura

El proyecto se sitúa en la frontera del conocimiento en el ámbito de la lubricación avanzada, explorando el comportamiento de un nanomaterial de base carbono —la nanopartícula TYROL— que no había sido caracterizado reológicamente en estos aceites con

anterioridad. Este carácter innovador, desarrollado siguiendo la línea de investigación iniciada en estudios previos de la misma institución [4], contribuye a construir la base científica necesaria para el desarrollo de lubricantes industriales de nueva generación. El análisis coste-beneficio realizado en el Capítulo 5 identifica además las condiciones bajo las cuales la implementación industrial de estos materiales puede resultar viable, proporcionando una hoja de ruta para su transferencia tecnológica al sector productivo. En este sentido, el trabajo contribuye al ODS 9 tanto desde la dimensión de la innovación tecnológica como desde la perspectiva del desarrollo de infraestructura industrial sostenible.

6.6.3. ODS 12 — Producción y consumo responsables

La incorporación del Análisis de Ciclo de Vida como herramienta metodológica en el Capítulo 6 refleja un compromiso explícito con los principios de producción y consumo responsables. Al cuantificar la huella de carbono de los materiales empleados mediante el método IPCC 2021 GWP 20a y evaluar la carga ambiental global a través del método ReCiPe 2016 Endpoint, el proyecto introduce una perspectiva de ciclo de vida que va más allá del laboratorio, considerando el impacto de los materiales desde su producción hasta su uso. Los resultados obtenidos muestran que la adición de TYROL al 2,25% supone un incremento marginal de la huella de carbono respecto al aceite base puro, inferior al 7%, lo que confirma que el aumento de prestaciones del lubricante no conlleva una penalización ambiental significativa en la fase de producción. Adicionalmente, la sustitución parcial de aditivos convencionales basados en compuestos organometálicos de cinc, fósforo o azufre por nanopartículas de carbono de alta pureza favorece una formulación de lubricantes más limpia y con menor impacto sobre los ecosistemas en la fase de fin de vida. Todo ello se alinea con los principios del ODS 12 de gestión eficiente de los recursos naturales y reducción del impacto ambiental de los procesos productivos.

6.6.4. ODS 13 — Acción por el clima

Los resultados del análisis medioambiental ponen de manifiesto que la carga ambiental total de las muestras estudiadas, entre 24,81 y 26,15 mPt según el método ReCiPe 2016 Endpoint, es entre 38 y 40 veces inferior al límite de referencia anual de un ciudadano europeo, lo que certifica que el desarrollo experimental del trabajo no genera ningún riesgo climático significativo. Sin embargo, la contribución más relevante al ODS 13 se sitúa en la proyección industrial de los resultados. Si los nanolubricantes con TYROL permiten reducir el consumo de combustible en motores de combustión interna, el balance en términos de emisiones de CO_2 a lo largo del ciclo de vida del vehículo sería claramente favorable: las emisiones adicionales asociadas a la producción del nanomaterial, calculadas en no más de

0,0017 kg CO_2 eq. por muestra de 20 mL, serían ampliamente compensadas por las emisiones evitadas durante la operación del motor. Esta lógica de análisis de ciclo de vida completo, aunque no desarrollada de forma cuantitativa en este trabajo por limitación de datos de operación disponibles, constituye una línea futura de trabajo de especial relevancia climática.

6.6.5. Valoración global de la contribución del proyecto a la sostenibilidad

En conjunto, el proyecto aborda de forma integrada las tres dimensiones de la sostenibilidad. Desde la dimensión ambiental, el ACV realizado demuestra un impacto reducido y proporciona argumentos sólidos para anticipar un balance neto positivo a escala industrial. Desde la dimensión económica, el análisis de coste-beneficio identifica las condiciones de viabilidad y señala las palancas —fundamentalmente la reducción del coste del nanomaterial mediante economías de escala— que harían posible su implementación generalizada. Desde la dimensión social, la mejora de la eficiencia energética de los motores, la reducción de emisiones contaminantes y la sustitución de aditivos tóxicos convencionales representan beneficios directos sobre la calidad del aire urbano y la salud pública. La articulación de estas tres dimensiones a través de los ODS 7, 9, 12 y 13 demuestra que el desarrollo de nanolubricantes de base carbono no es únicamente una apuesta tecnológica, sino también una contribución al modelo de desarrollo sostenible que la comunidad internacional ha acordado para las próximas décadas.

Capítulo 7. Conclusiones y Líneas Futuras

7.1. Conclusiones del estudio

El presente trabajo ha permitido evaluar de forma experimental el efecto de la incorporación de nanopartículas carbonosas tipo TYROL en aceites lubricantes 5W40 y 10W40, analizando su comportamiento reológico bajo condiciones controladas de temperatura y cizalladura.

Los resultados obtenidos evidencian que la adición de nanopartículas genera un incremento de la viscosidad del sistema, efecto que resulta especialmente relevante a bajas temperaturas, donde la influencia del aditivo es más significativa. Sin embargo, a medida que aumenta la temperatura, la respuesta del fluido está dominada por el propio aceite base, reduciéndose la diferencia entre muestras con y sin nanopartículas.

Desde el punto de vista reológico, se confirma que tanto los aceites base como los nanolubricantes presentan un comportamiento claramente newtoniano en todo el rango de ensayo, manteniéndose una relación lineal entre el esfuerzo cortante y el gradiente de velocidad. Por tanto, la incorporación de TYROL no modifica la naturaleza del fluido, sino que incide en su resistencia al flujo, alterando únicamente el nivel de viscosidad.

La caracterización microestructural demuestra que las nanopartículas presentan una morfología laminar típica de materiales grafíticos, con estructuras multicapa y cierta tendencia a la aglomeración. Esta geometría resulta coherente con los mecanismos de deslizamiento interlaminar y formación de tribofilm descritos en la literatura, lo que sugiere un potencial impacto positivo en aplicaciones tribológicas.

Por otro lado, el análisis FTIR confirma la ausencia de reacciones químicas relevantes entre el aceite base y el aditivo, manteniéndose la estabilidad química del sistema. En consecuencia, la modificación del comportamiento del fluido es atribuible fundamentalmente a interacciones físicas.

Finalmente, desde el punto de vista de viabilidad, se concluye que el principal condicionante es el elevado coste del nanomaterial, mientras que el impacto ambiental asociado a su uso es limitado debido a las bajas concentraciones empleadas. Este equilibrio sugiere que su aplicación podría resultar viable en contextos donde se priorice el rendimiento frente al coste.

7.2. Verificación de objetivos

El objetivo principal del estudio ha sido alcanzado, al haberse demostrado de forma experimental la influencia de las nanopartículas de carbono sobre las propiedades reológicas de aceites 5W40 y 10W40.

De igual modo, se han cumplido los objetivos específicos planteados, incluyendo la caracterización de los aceites base, la preparación de dispersiones estables, el análisis del efecto de la concentración del aditivo y el estudio de la influencia de la temperatura y la tasa de cizalladura.

Asimismo, se ha verificado la estabilidad química del sistema mediante técnicas FTIR y se ha caracterizado la morfología de las nanopartículas mediante microscopía electrónica, permitiendo interpretar los resultados reológicos desde una perspectiva estructural.

Finalmente, el análisis económico y ambiental realizado ha permitido evaluar la viabilidad del uso de estos nanolubricantes, completando así el alcance global del trabajo.

7.3. Recomendaciones para investigaciones futuras

A partir de los resultados obtenidos, se considera de interés ampliar el estudio a un rango más amplio de concentraciones de nanopartículas, con el objetivo de identificar posibles transiciones hacia comportamientos no newtonianos en condiciones más exigentes.

Asimismo, resulta fundamental complementar el análisis reológico con ensayos tribológicos que permitan evaluar de forma directa la reducción de fricción y desgaste, estableciendo una correlación entre propiedades reológicas y rendimiento funcional.

Otra línea relevante es el estudio de la estabilidad a largo plazo de las dispersiones, especialmente en relación con procesos de aglomeración y sedimentación, que pueden comprometer su aplicabilidad industrial.

Por último, se plantea la necesidad de avanzar en el desarrollo de materiales alternativos o procesos de producción más eficientes que permitan reducir el coste del nanomaterial, mejorando así la viabilidad de su implementación en aplicaciones reales.

Capítulo 8. Bibliografía

[1] Y. Bian, P. Wu, J. Hao, Q. Shi, and G. Qin, “Study on Rheological Properties of Nanofluids,” Journal of Physics: Conference Series, vol. 2132, no. 1, p. 012049, Dec. 2021, doi: 10.1088/1742-6596/2132/1/012049.

[2] I. Razzaq et al., “Nanofluids for Advanced Applications: A Comprehensive Review on Preparation Methods, Properties, and Environmental Impact,” ACS Omega, vol. 10, no. 6, pp. 5251–5282, Feb. 2025, doi: 10.1021/acsomega.4c10143.

[3] S. U. S. Choi and J. A. Eastman, “Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles,” Argonne National Laboratory, IL (United States), Tech. Rep. ANL/MSD/CP-84938, 1995.

[4] A. López Fraile, “Efecto de nanopartículas base carbono en el comportamiento reológico de aceites lubricantes,” Trabajo Fin de Grado, Universidad Europea de Madrid, 2022.

[5] M. Hemmat Esfe, S. Alidoust, H. Hatami, and D. Toghraie, “Rheological behavior of 10W40 base oil containing different combinations of MWCNT-Al2O3 nanoparticles,” Micro and Nano Systems Letters, vol. 11, no. 1, Oct. 2023, doi: 10.1186/s40486-023-00179-6.

[6] F. Abdolahi, A. Heydarinasab, A. Rashidi, M. Ardjmand, and M. M. Mohseni, "Thermal and rheological performance of behran oil-based nanofluids with functionalized BN, CN, and BCN nanoparticles," *Scientific Reports*, vol. 15, art. no. 31662, 2025. doi: 10.1038/s41598-025-16956-9. .

[7] M. A. Rahman, S. M. M. Hasnain, S. Pandey, A. Tapalova, N. Akylbekov, and R. Zairov, "Review on nanofluids: Preparation, properties, stability, and thermal performance augmentation in heat transfer applications," *ACS Omega*, vol. 9, no. 30, pp. 32328–32349, Jul. 2024. doi: 10.1021/acsomega.4c03279.

[8] M. García-Tobar et al., “Nanotechnology in Lubricants: A Systematic Review,”

Lubricants, MDPI, 2024.

[9] L. Duan, J. Li, and H. Duan, "Nanomaterials for lubricating oil application: A review," *Friction*, vol. 11, no. 5, pp. 647–684, 2023. doi: 10.1007/s40544-022-0667-9. .

[10] M. E. Korkmaz and M. K. Gupta, "Nano lubricants in machining and tribology applications: A state of the art review on challenges and future trend," *Journal of Molecular Liquids*, vol. 407, art. no. 125261, Aug. 2024. doi: 10.1016/j.molliq.2024.125261.

[11] A. Harchaoui et al., “Rheological properties of nanolubricants based on Fe2O3, Al2O3 and ZnO nanoparticles dispersed in engine oil,” Journal of Molecular Liquids, vol. 376, p. 121396, 2023.

[12] A. Harchaoui, R. Mazouzi, and A. Karas, "The rheology of nanolubricants based on Fe_2O_3, Al_2O_3, and ZnO oxide nanoparticles: A comparative study," *Physical Chemistry Research*, vol. 11, no. 2, pp. 181–189, Jun. 2023. doi: 10.22036/pcr.2022.363010.2109.

[13] M. H. Esfe et al., “A comprehensive study to predict the rheological behavior of hybrid nanolubricants,” Journal of Molecular Liquids, Elsevier, 2022.

[14] M. Hemmat Esfe et al., “Rheological behavior of 10W40 base oil containing different nanoparticles,” Micro & Nano Systems Letters, 2023.

[15]K. S. Kumar and V. Suganthi, "Review on Nanofluids: Preparation, Characterization, and Applications," Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences, vol. 102, no. 1, pp. 1-15, 2023.

[16] .Resolución de 7 de julio de 2021, de la Dirección General de Trabajo, por la que se registra y publica el XX Convenio colectivo general de la industria química. Boletín Oficial del Estado, 171, de 19 de julio de 2021. https://www.boe.es/eli/es/res/2021/07/07/(7)

[17]. Resolución de 14 de febrero de 2022, de la Dirección General de Trabajo, por la que se registra y publica el Acuerdo marco de Sidenor Aceros Especiales, SLU, y Sidenor

Investigación y Desarrollo, SA. Boletín Oficial del Estado, 49, de 26 de febrero de 2022. https://www.boe.es/eli/es/res/2022/02/14/(3)

[18] V. Jiménez et al., "Pilot plant scale study of the influence of the operating conditions in the production of carbon nanofibers," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 48, no. 18, pp. 8407–8417, 2009. doi: 10.1021/ie900175c..

[19] M. S. Sodhi and S. Sezer, "Cost-benefit analysis of nanotechnology-based products," Journal of Nanoparticle Research, vol. 25, no. 1, p. 18, 2023.

[20] G. Wernet, C. Bauer, B. Steubing, J. Reinhard, E. Moreno-Ruiz, and B. Weidema, "The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology," The International Journal of Life Cycle Assessment, vol. 21, no. 9, pp. 1218–1230, Sep. 2016. doi: 10.1007/s11367-016-1087-8.

[21] IPCC, Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, V. Masson-Delmotte et al., Eds. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2021. doi: 10.1017/9781009157896.

[22] M. Goedkoop, R. Heijungs, M. Huijbregts, A. De Schryver, J. Struijs, and R. Van Zelm, ReCiPe 2008: A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level, 1st ed. The Hague, Netherlands: Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment (VROM), 2009. [Online]. Available: https://www.rivm.nl/en/life-cycle-assessment-lca/recipe

[23] G. Wernet, C. Bauer, B. Steubing, J. Reinhard, E. Moreno-Ruiz, and B. Weidema, "The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology," The International Journal of Life Cycle Assessment, vol. 21, no. 9, pp. 1218–1230, Sep. 2016. doi: 10.1007/s11367-016-1087-8.

[24] Swiss Centre for Life Cycle Inventories, "Ecoinvent database v3.9 — process:

lubricating oil, at plant," Dübendorf, Switzerland: ecoinvent Association, 2023. [Online]. Available: https://ecoinvent.org

[24] Dirección General de Gobernanza Pública, “Conoce la Agenda 2030”, Ministerio de Derechos Sociales, Consumo y Agenda 2030, Gobierno de España. Disponible en: https://www.dsca.gob.es/es/agenda-2030/conoce-la-agenda.

[25] Microsoft, Copilot. Microsoft, 2026. [Online]. Available: https://copilot.microsoft.com

“Se utilizó Microsoft Copilot para apoyo en corrección gramatical, reformulación de frases y verificación de estilo.”

Capítulo 9. Anexos

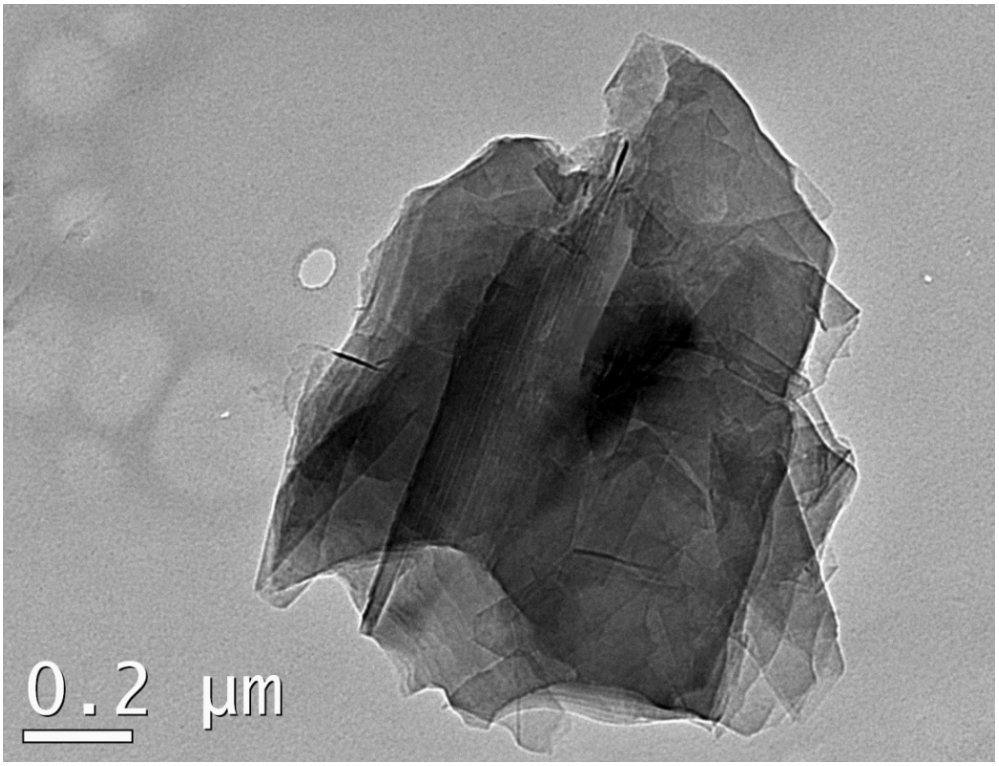


Figura A.1. Micrografía TEM de la nanopartícula TYROL con morfología laminar y superposición de capas (escala 0.2 µm).

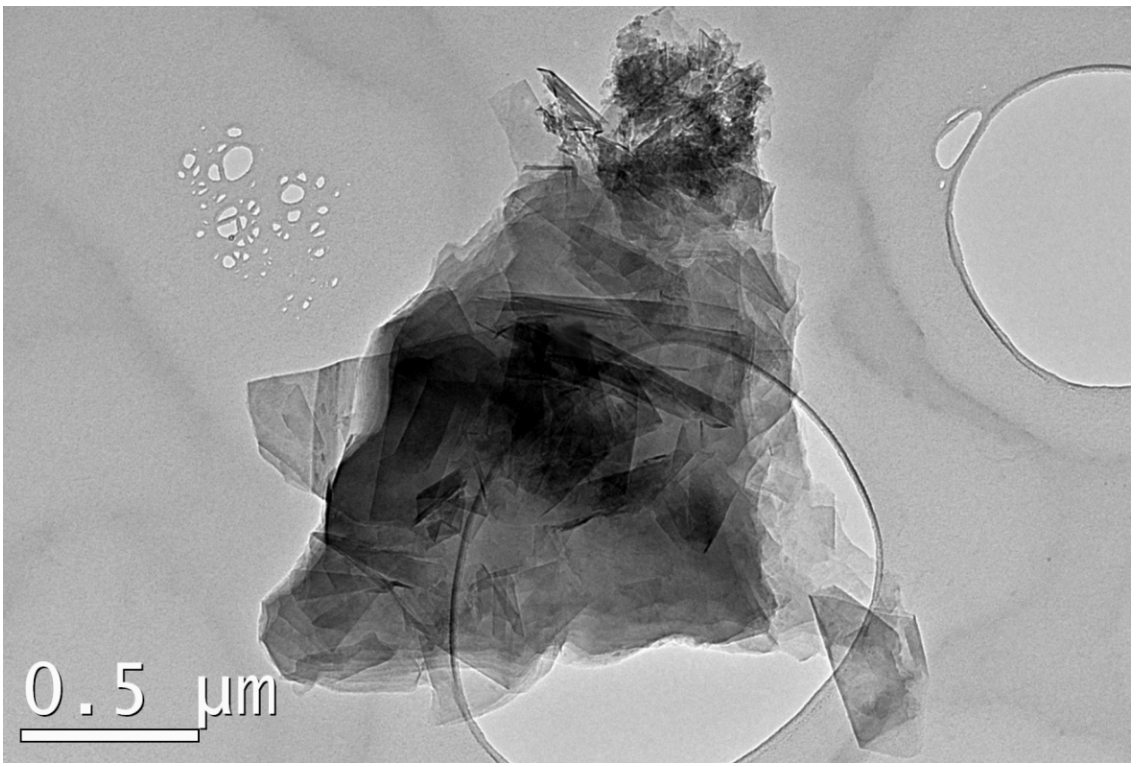


Figura A.2. Micrografía TEM de la nanopartícula TYROL con morfología laminar y superposición de capas (escala 0.5 µm).

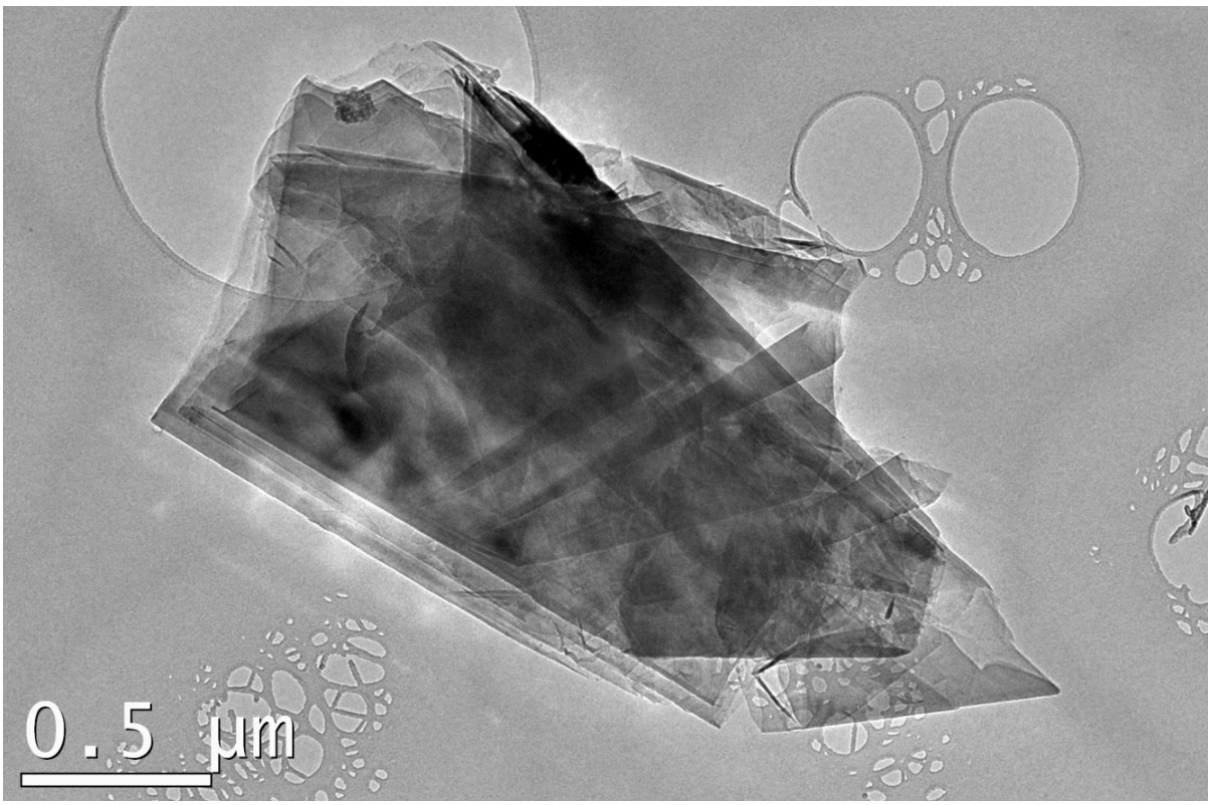


Figura A.3. Micrografía TEM de la nanopartícula TYROL con morfología laminar y superposición de capas (escala 0.5 µm).

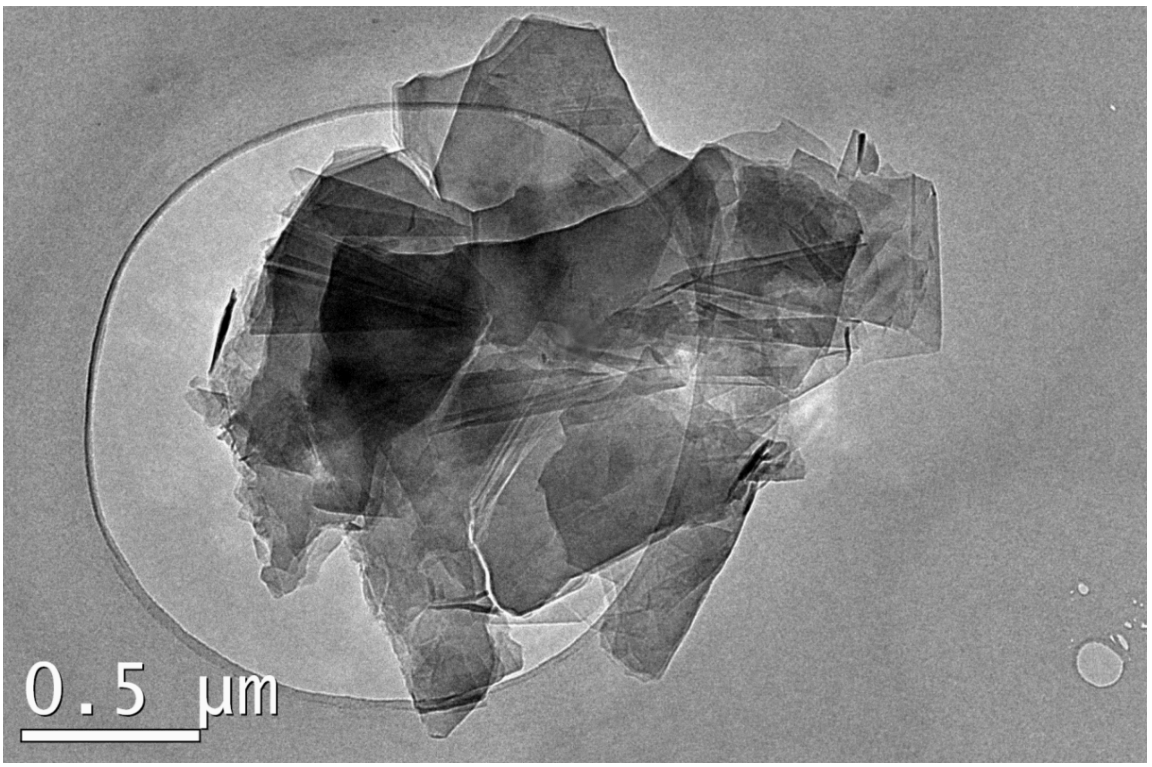


Figura A.4. Micrografía TEM de la nanopartícula TYROL con morfología laminar y superposición de capas (escala 0.5 µm).

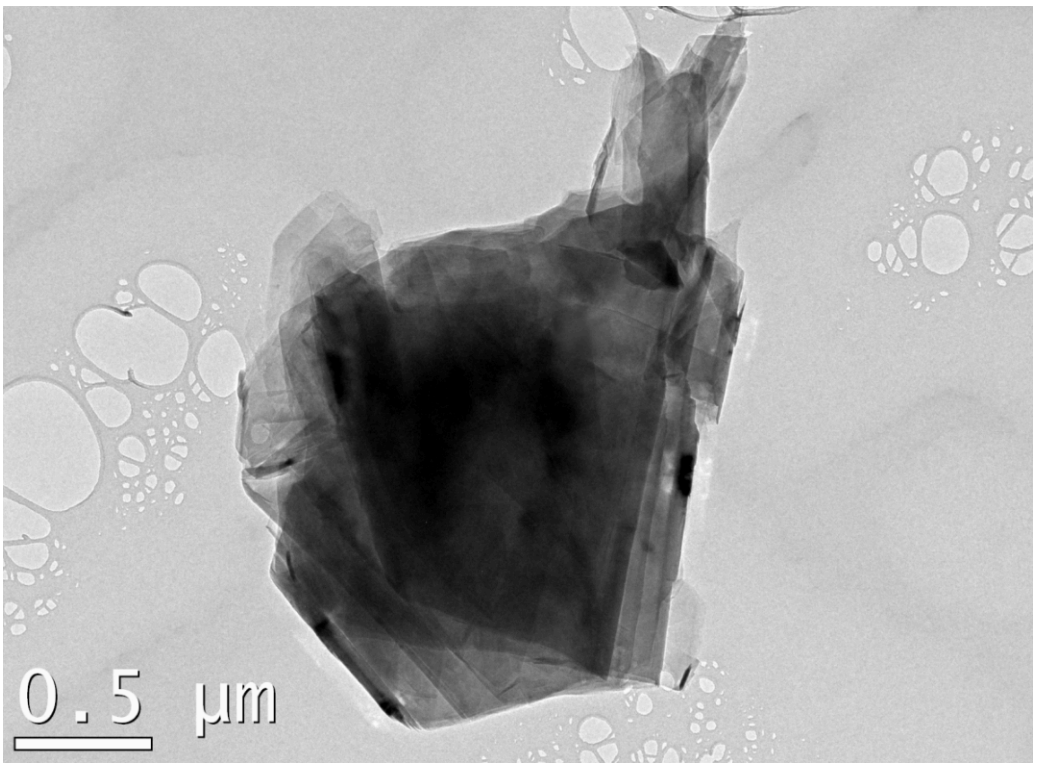


Figura A.5. Micrografía TEM de la nanopartícula TYROL con morfología laminar y superposición de capas (escala 0.5 µm).

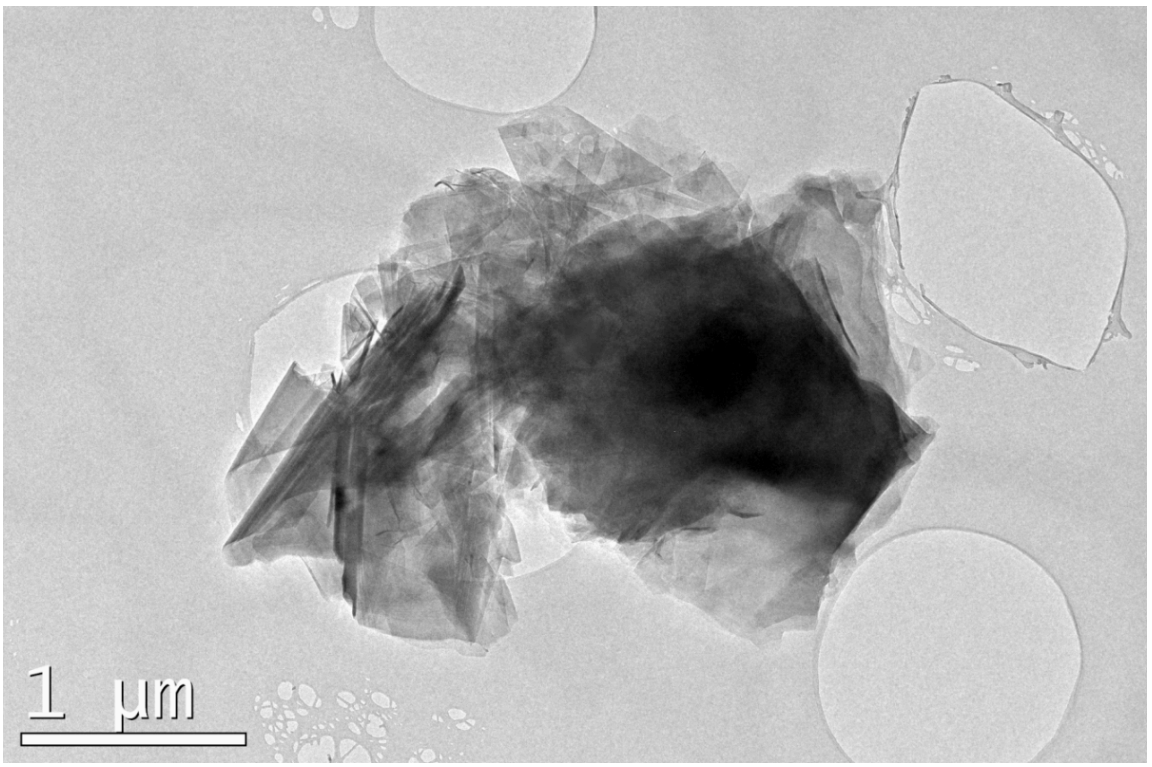


Figura A.6. Micrografía TEM de la nanopartícula TYROL con morfología laminar y superposición de capas (escala 1 µm).

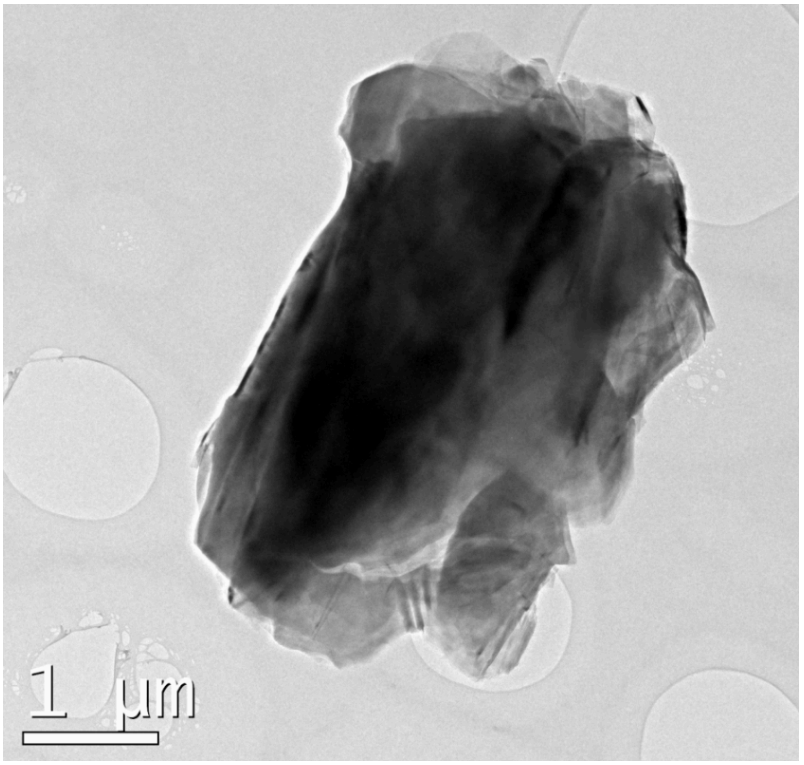


Figura A.7. Micrografía TEM de la nanopartícula TYROL con morfología laminar y superposición de capas (escala 1 µm).

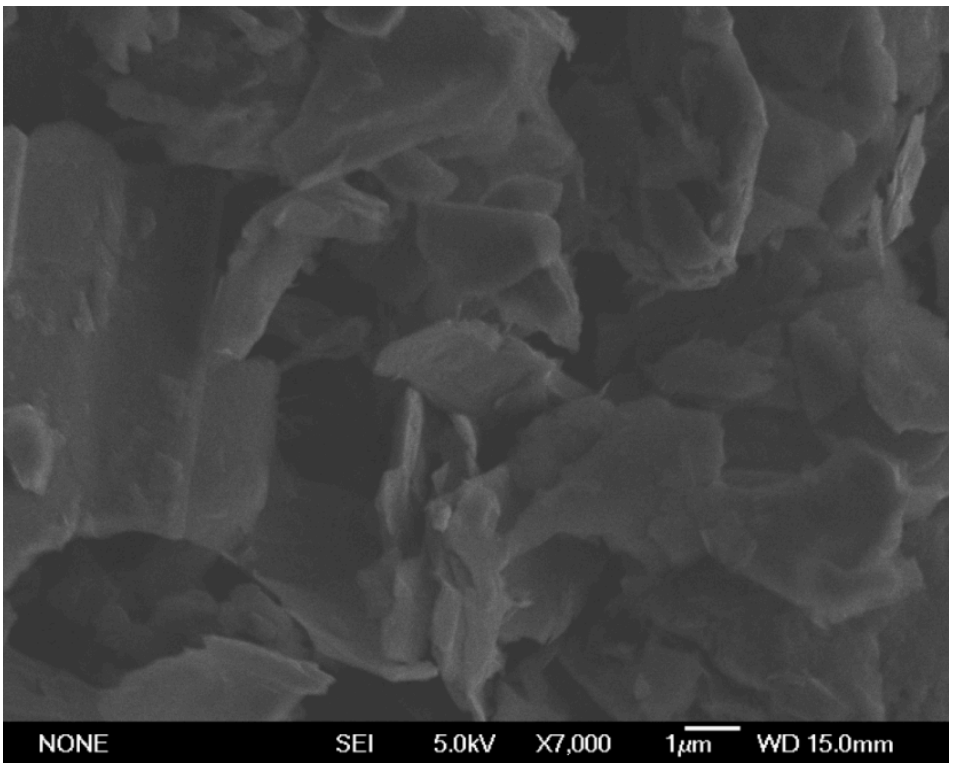


Figura A.8. Micrografía SEM de nanopartículas TYROL mostrando morfología laminar con superficies irregulares y apilamiento de estructuras grafíticas (aumento ×7000).

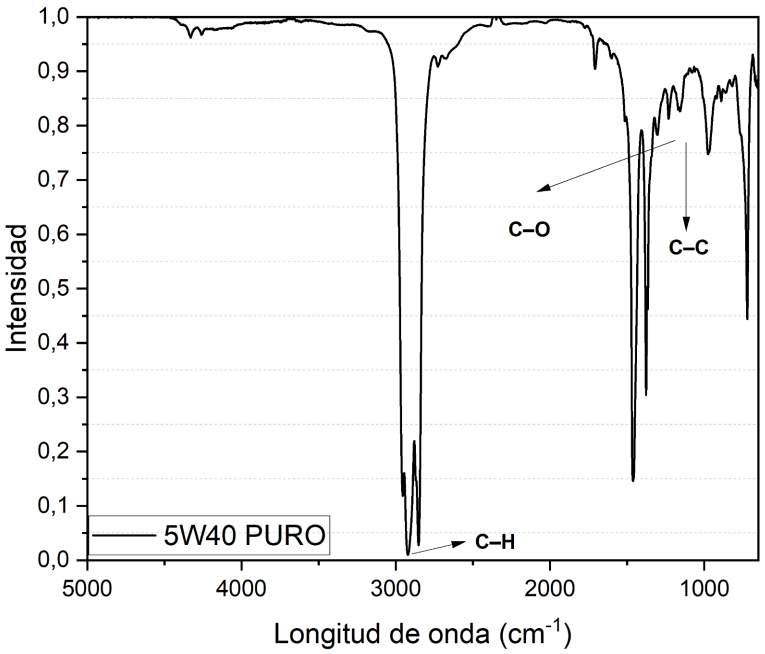


Figura A.9. Espectro infrarrojo (FTIR) del aceite base 5W40

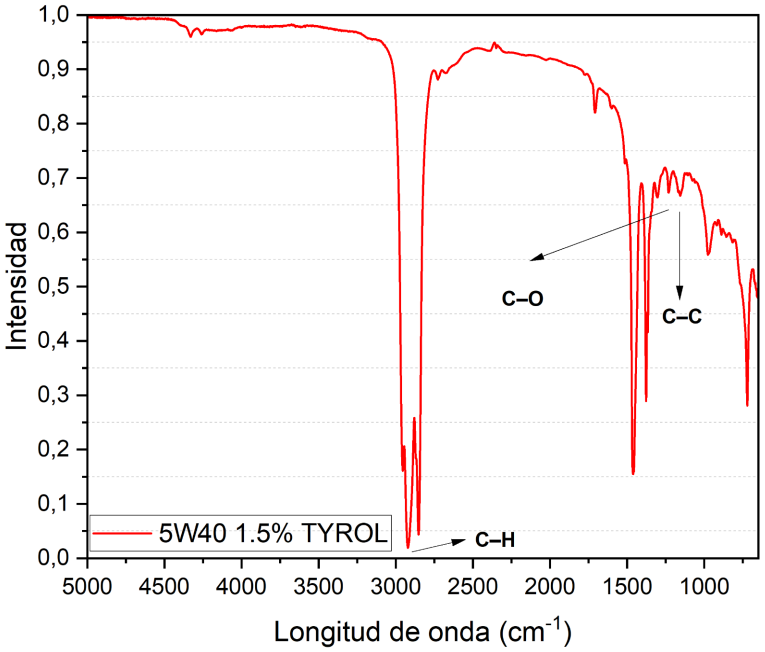


Figura A.10. Espectro infrarrojo (FTIR) del aceite base 5W40 con una concentración en masa del TYROL de 1.5%

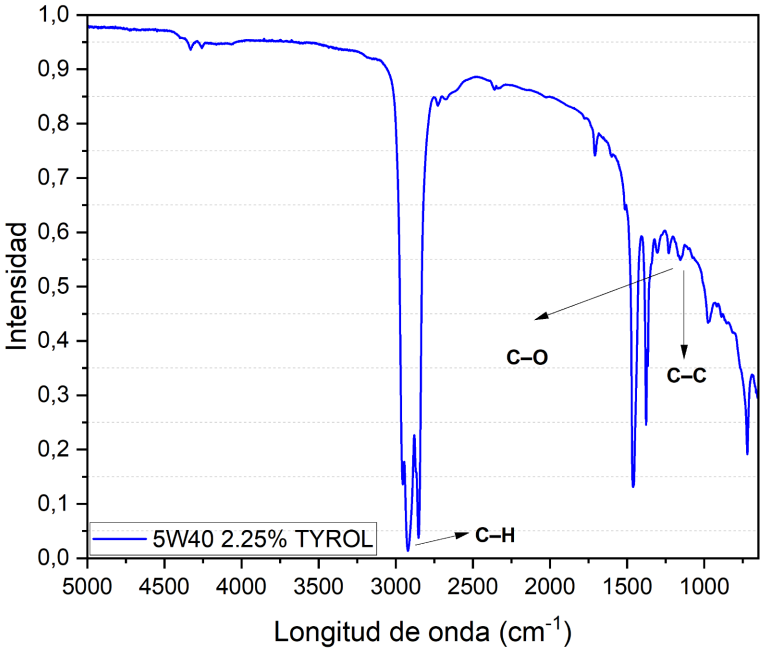


Figura A.11. Espectro infrarrojo (FTIR) del aceite base 5W40 con una concentración en masa del TYROL de 2.25%

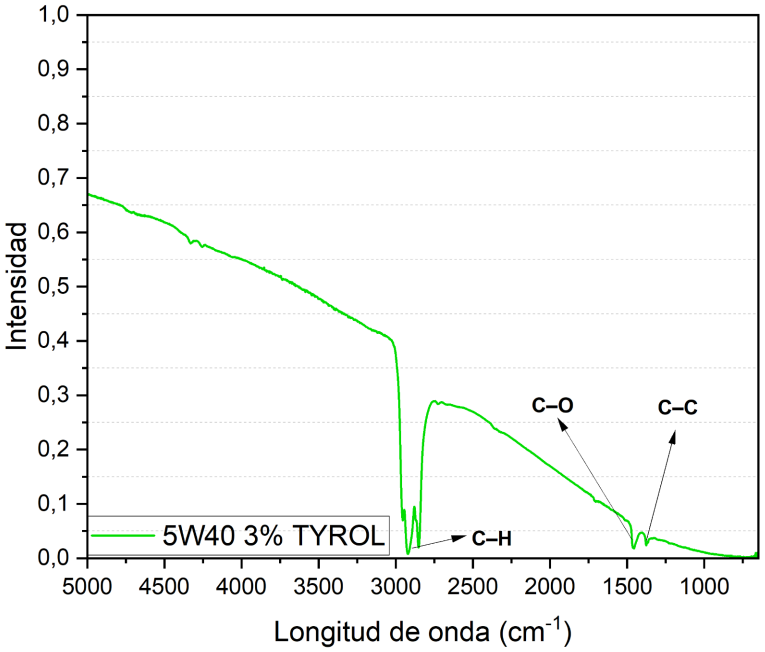


Figura A.12. Espectro infrarrojo (FTIR) del aceite base 5W40 con una concentración en masa del TYROL de 3%

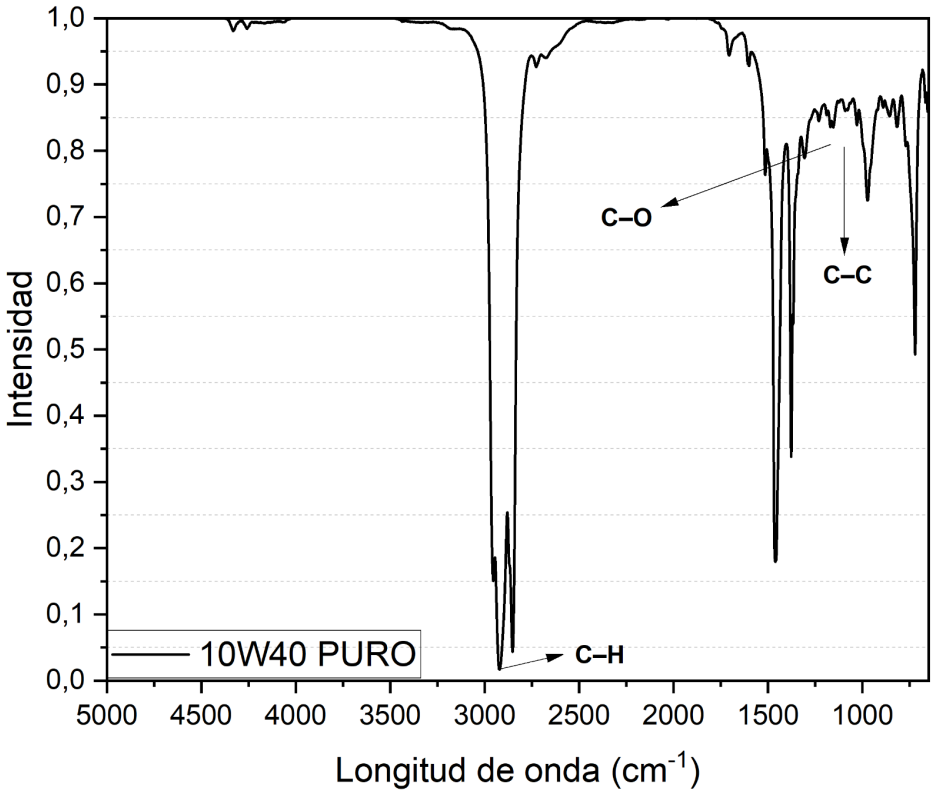


Figura A.13. Espectro infrarrojo (FTIR) del aceite base 10W40

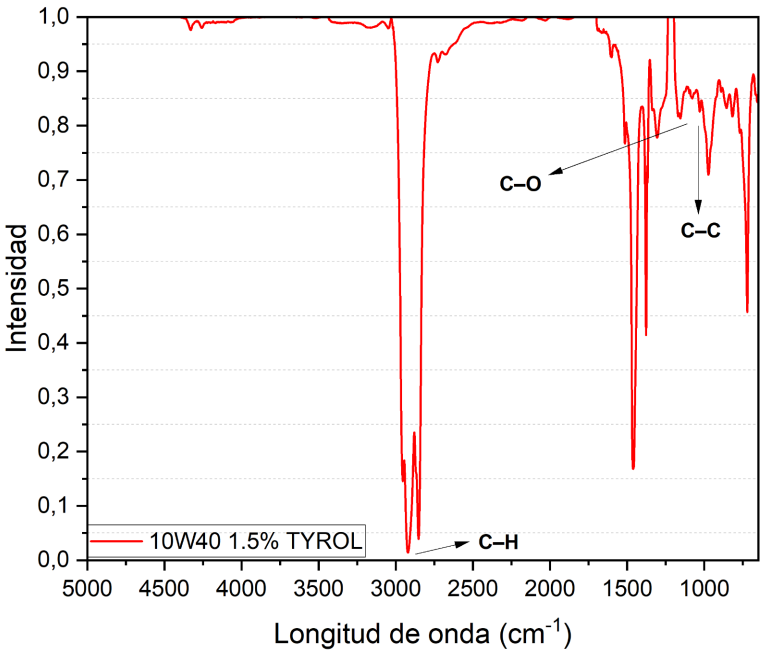


Figura A.14. Espectro infrarrojo (FTIR) del aceite base 10W40 con una concentración en masa del TYROL de 1.5%

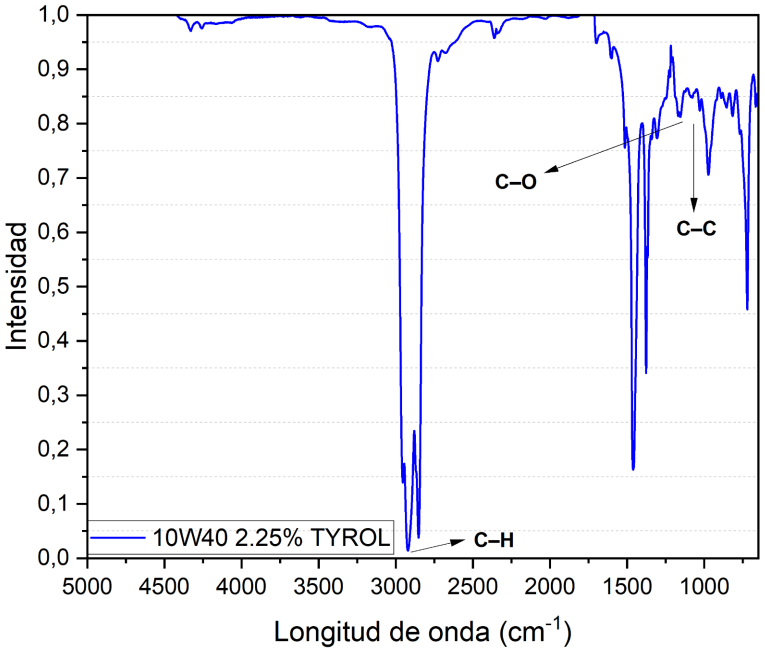


Figura A.15. Espectro infrarrojo (FTIR) del aceite base 10W40 con una concentración en masa del TYROL de 2.25%

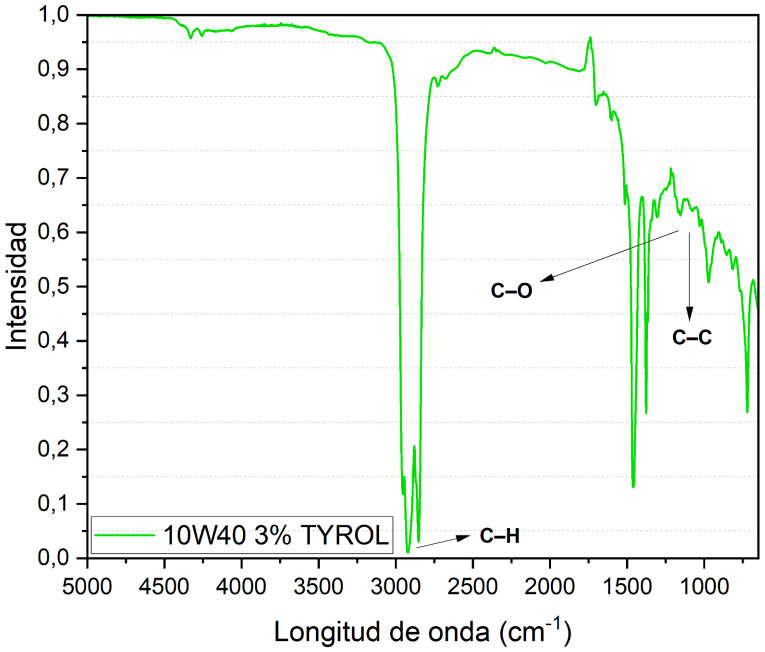


Figura A.16. Espectro infrarrojo (FTIR) del aceite base 10W40 con una concentración en masa del TYROL de 3

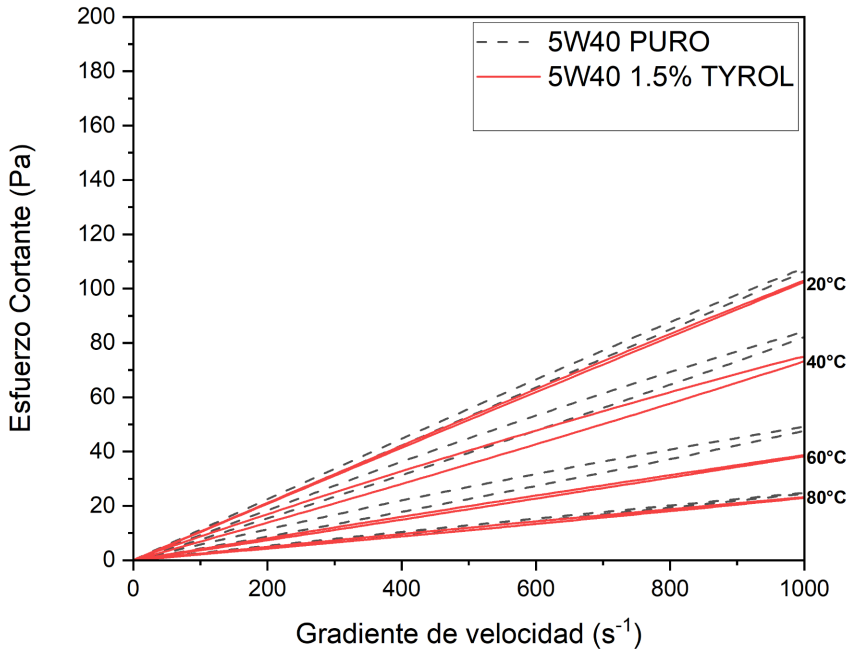


Figura A.17. Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 1.5% en masa de TYROL entre 20ºC y 80ºC

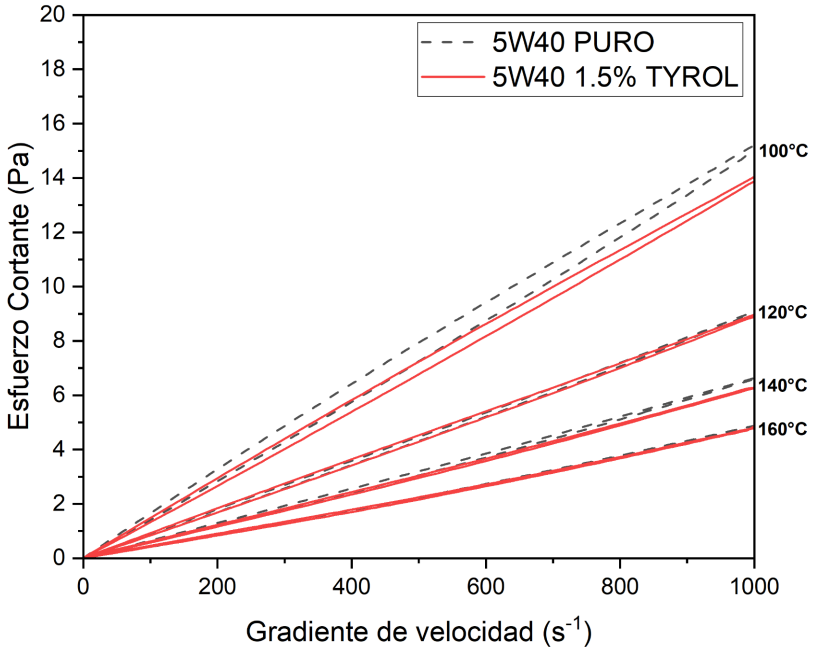


Figura A.18. Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 1.5% en masa de TYROL entre 100ºC y 160ºC

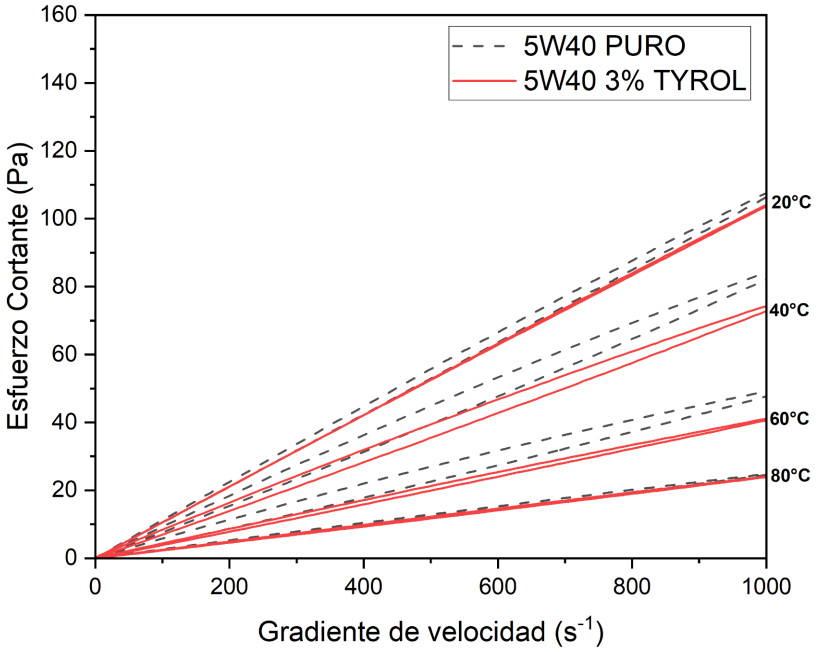


Figura A.19. Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 3% en masa de TYROL entre 20ºC y 80ºC

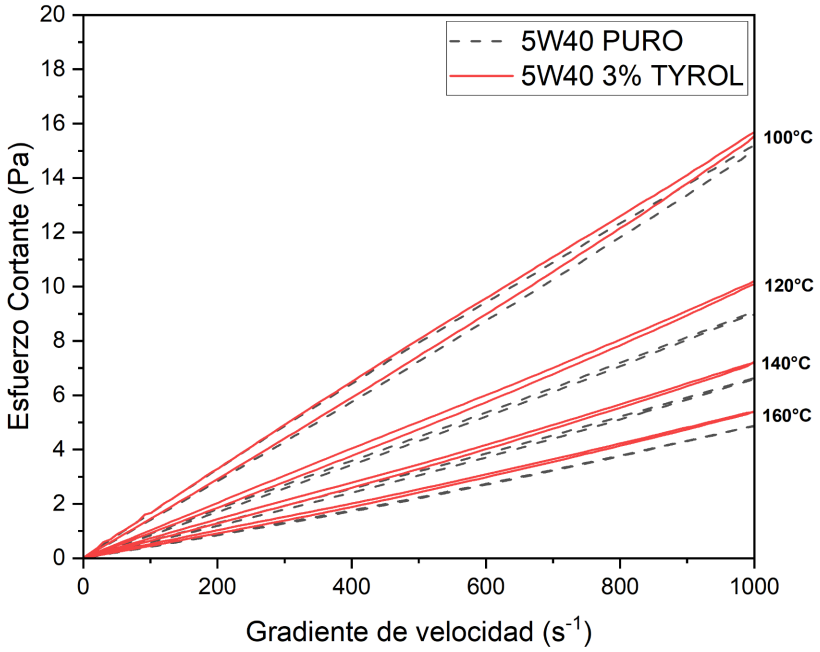


Figura A.20. Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 2.25% en masa de TYROL entre 100ºC y 160ºC

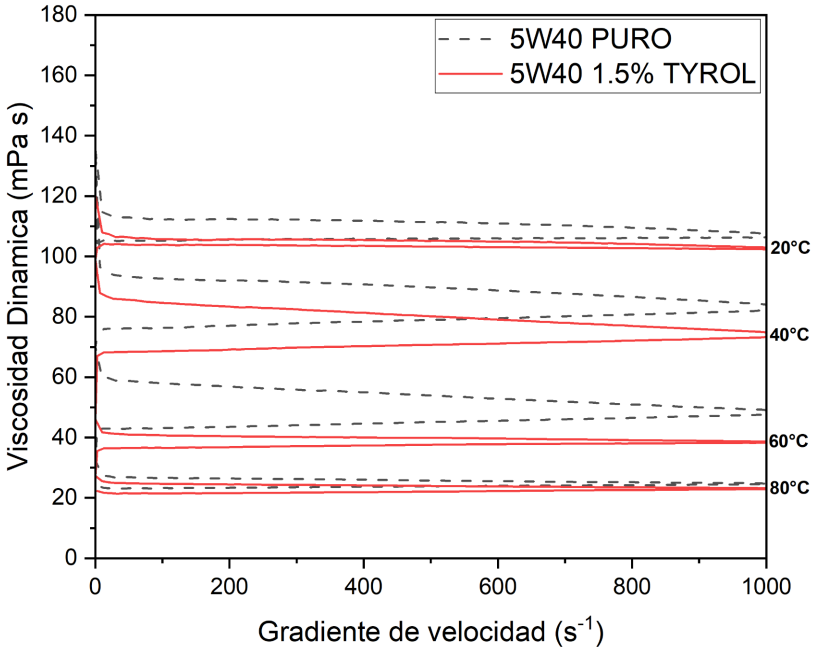


Figura A.21. Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 1.5% en masa de TYROL entre 20ºC y 80ºC

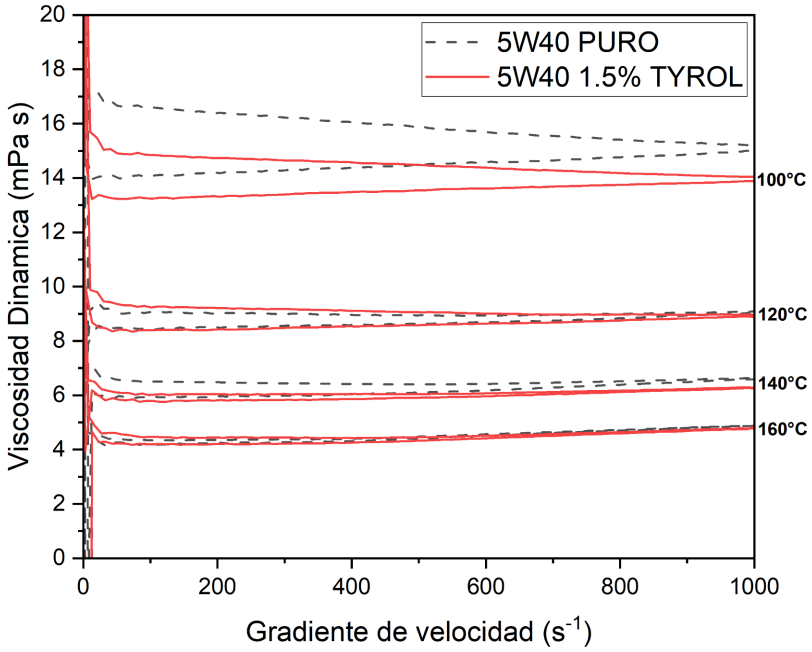


Figura A.22. Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 1.5% en masa de TYROL entre 100ºC y 160ºC

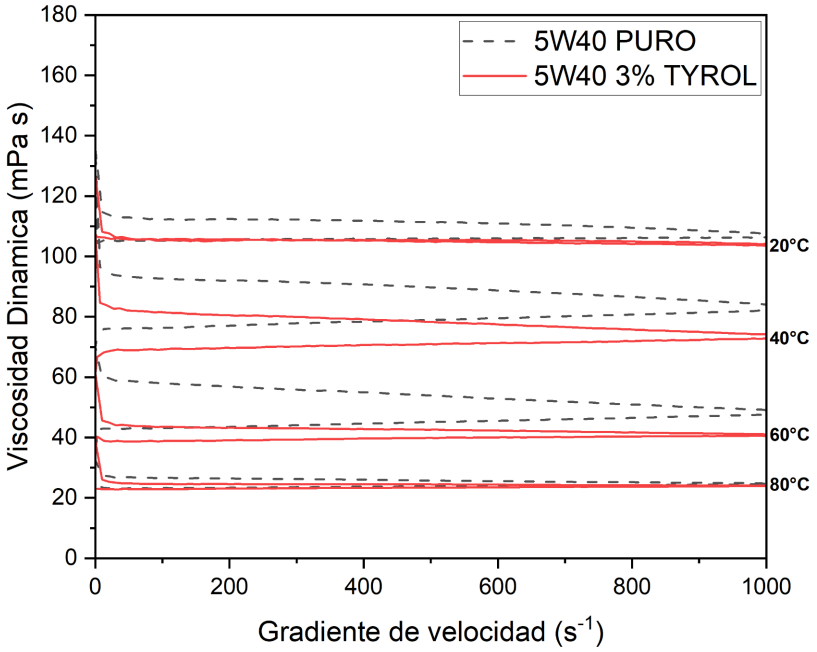


Figura A.23. Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 3% en masa de TYROL entre 20ºC y 80ºC

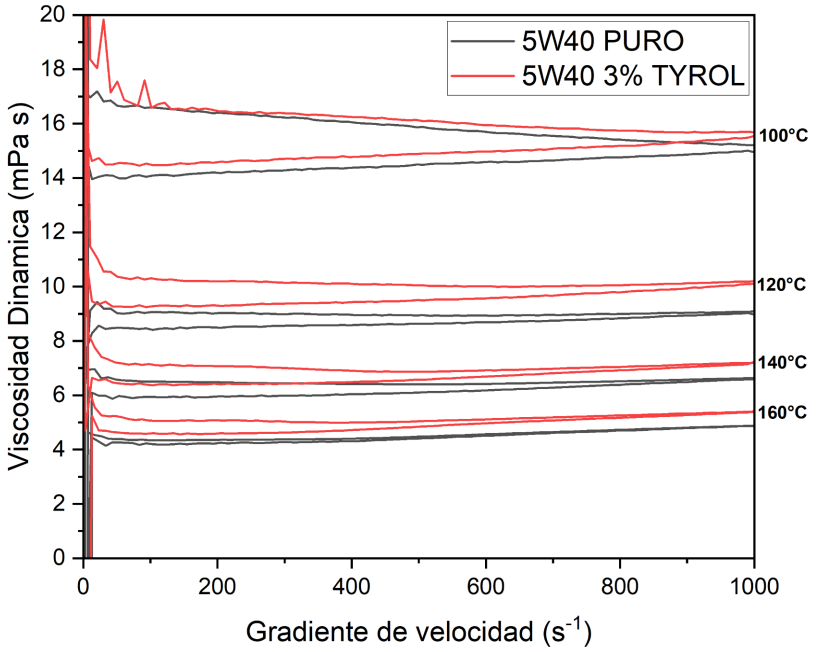


Figura A.24. Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 5W40 con 3% en masa de TYROL entre 100ºC y 160ºC

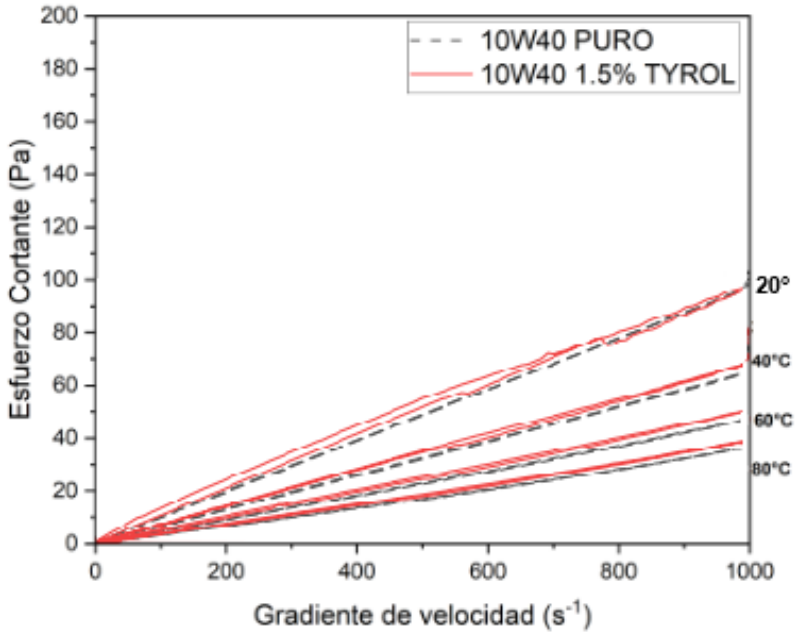


Figura A.25. Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 10W40 con 1,5% en masa de TYROL entre 20ºC y 80ºC

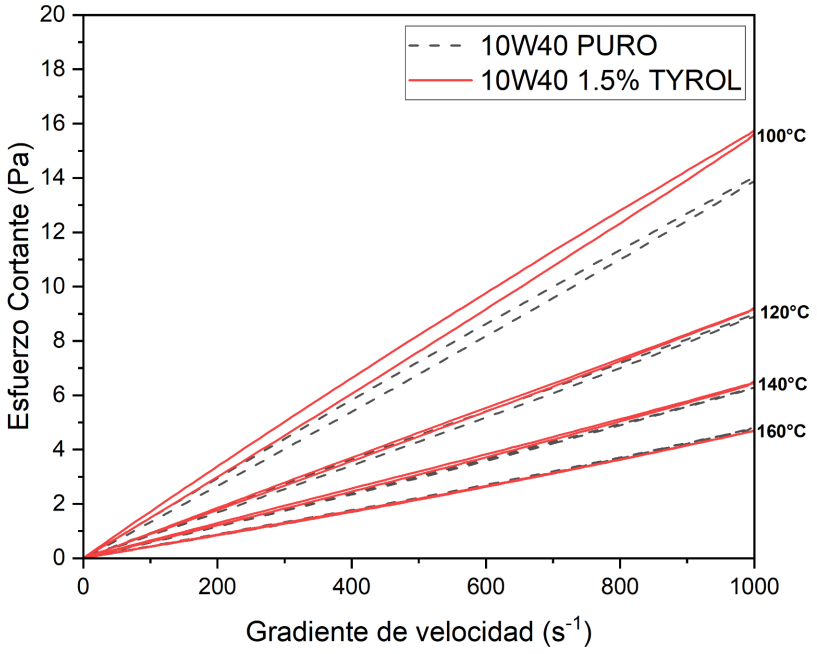


Figura A.26. Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 10W40 con 1,5% en masa de TYROL entre 100ºC y 160ºC

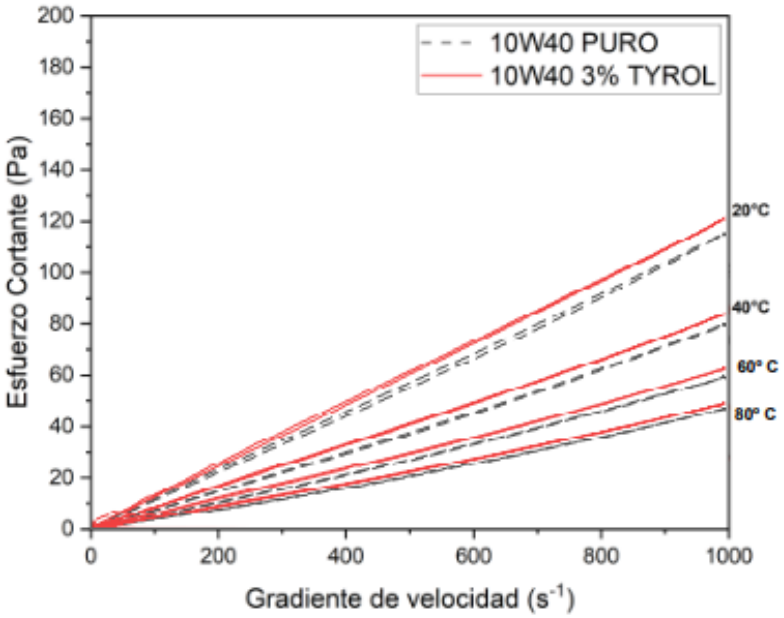


Figura A.27. Esfuerzo cortante frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 10W40 con 3% en masa de TYROL entre 20ºC y 80º

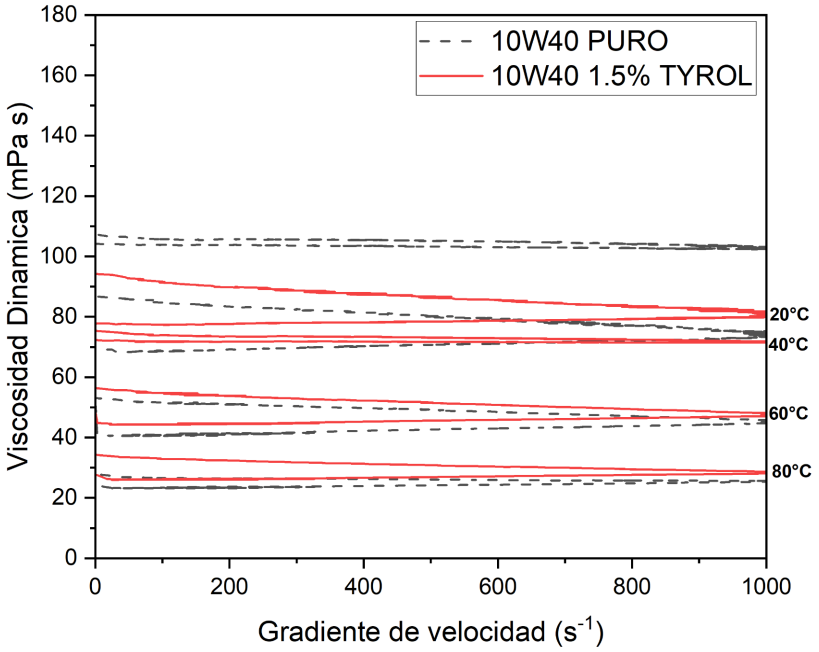


Figura A.28. Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 10W40 con 1.5% en masa de TYROL entre 20ºC y 80ºC

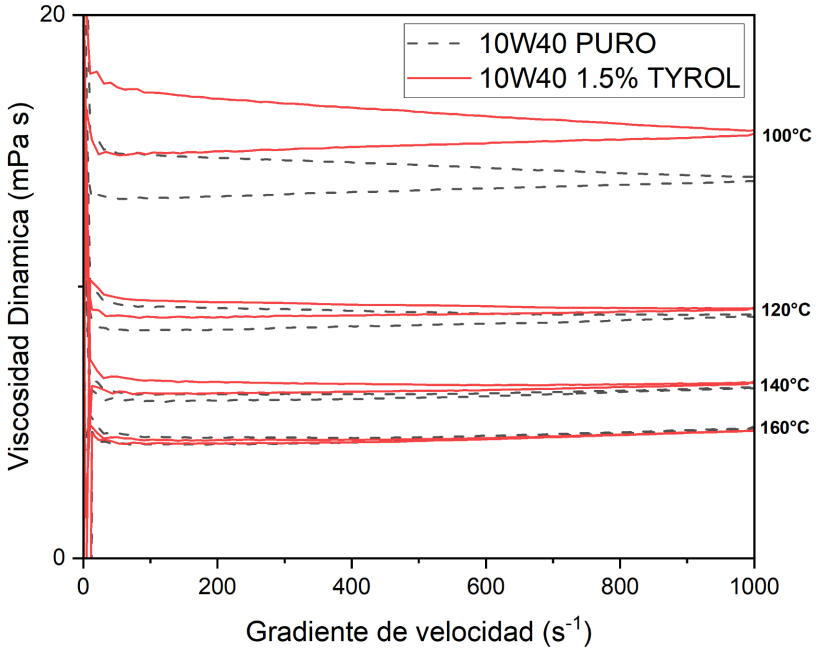


Figura A.29. Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 10W40 con 1.5% en masa de TYROL entre 100ºC y 160ºC

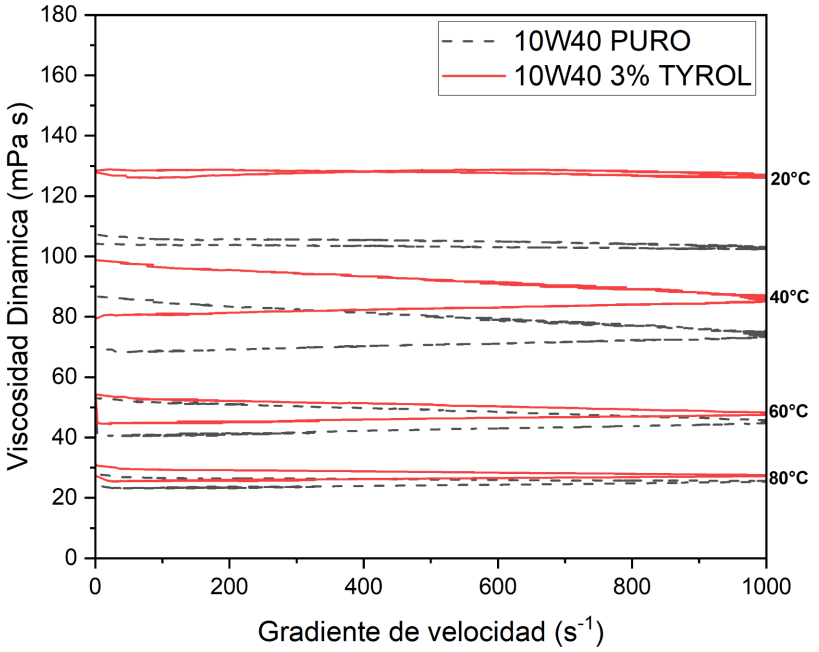


Figura A.30. Viscosidad dinámica frente a gradiente de velocidad de muestra de aceite 10W40 con 3% en masa de TYROL entre 20ºC y 80ºC