UNIVERSIDAD EUROPEA DE MADRID

ESCUELA DE ARQUITECTURA, INGENIERÍA, CIENCIA Y COMPUTACIÓN (STEAM)

GRADO DE INGENIERÍA EN SISTEMAS INDUSTRIALES

DOBLE MENCIÓN EN MECÁNICA Y AUTOMOCIÓN

TRABAJO FIN DE GRADO

ESTUDIO DE NANOFLUIDOS EN ACEITES LUBRICANTES 5W30 Y 20W50

Alumno: D. ANTONIO LÓPEZ MARTÍNEZ

Directores: Dra. ARISBEL CERPA NARANJO

Dr. JAVIER PEREZ PIÑEIRO

JUNIO 2026

TÍTULO: Estudio de nanofluidos basados en aceites lubricantes 5W30 y 20W50

AUTOR: Antonio López Martínez

DIRECTORA DEL PROYECTO: Dra. Arisbel Cerpa Naranjo

FECHA: 02 de JUNIO de 2026

RESUMEN

El presente trabajo se basa en el diseño, desarrollo y caracterización de diferentes nanofluidos, obtenidos mediante la dispersión creada con nanotubos de carbono de pared múltiple (HGN-1) sobre los aceites lubricantes comerciales 5W30 y 20W50, utilizados como base. El objetivo principal consiste en evaluar su comportamiento a nivel físico y térmico con el fin de determinar su viabilidad técnica y su posterior aplicación a escala industrial en los diferentes sistemas de lubricación.

Para alcanzar este propósito, la metodología contempla la formulación de las diferentes dispersiones incorporando varias concentraciones de aditivo. Los nanotubos de carbono, utilizados como aditivo han sido caracterizados mediante técnicas de microscopía de alta resolución para poder comprender su estructura y composición, las cuales van a determinar su influencia en las posteriores dispersiones. Una vez analizados los diferentes componentes, tanto los aceites base como los aditivos, se analizan las propiedades reológicas de las diferentes concentraciones (0,25%, 0,5% y 0,75%) en un amplio rango de temperatura que se encuentra entre los 20ºC y los 160ºC.

El estudio concluye con diferentes análisis relevantes para la viabilidad del proyecto entre los que se encuentran un análisis económico, el cual determina la inversión financiera necesaria para llevar a cabo la investigación. Por otro lado, se establece un análisis medioambiental, necesario para detallar el impacto ecológico y la huella de carbono generados durante las fases de experimentación y creación de productos, su propósito es cuantificar las emisiones y el impacto que tienen en el medio ambiente.

Palabras clave: aceite, nanopartículas, viscosidad, reología, espectro.

ABSTRACT

The present work is based on the design, development, and characterization of different nanofluids, obtained through the dispersion of carbon nanotubes within commercial 5W30 and 20W50 lubricant oils used as base fluids. The main objective is to evaluate their physical and thermal behavior in order to determine their technical feasibility and subsequent industrial-scale application in various lubrication systems.

To achieve this purpose, the methodology involves the formulation of different dispersions incorporating several additive concentrations. The carbon nanotubes used as additives have been characterized using high-resolution microscopy techniques to understand their structure and composition, which will determine their influence on the subsequent dispersions. Once the individual components both the base oils and the additives are analyzed, the rheological properties of the different concentrations (0,25%, 0,5% & 0,75%) are evaluated over a wide temperature range between 20°C and 160°C.

The study concludes with several analyses relevant to the project's feasibility, including an economic analysis that determines the financial investment required to carry out the research. Additionally, an environmental analysis is established to detail the ecological impact and carbon footprint generated during the experimentation and product development phases, aiming to quantify the emissions and their overall impact on the environment.

Key words: oil, nanoparticles, viscosity, rheology, spectrum.

Índice

RESUMEN 3

ABSTRACT 4

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN 13

1.1 CONTEXTUALIZACIÓN HISTÓRICA 13

1.2 INTRODUCCIÓN AL PROYECTO 14

1.3 OBJETIVOS DEL PROYECTO 15

Capítulo 2. MARCO TEÓRICO 16

2.1 TRIBOLOGÍA 16

2.1.1 ACEITES LUBRICANTES 16

2.1.2 CURVA DE STRIBECK 18

2.2 REOLOGÍA 19

2.2.1 VISCOSIDAD 20

2.2.2 LÍQUIDOS NEWTONIANOS 21

2.2.3 LÍQUIDOS NO NEWTONIANOS 21

2.3 NANOTECNOLOGÍA 22

2.4 NANOPARTÍCULAS 23

Capítulo 3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL 24

3.1 MATERIALES 24

3.1.1 ACEITES 24

3.1.2 NANOTUBOS DE CARBONO DE PARED MÚLTIPLE 25

3.2 EQUIPOS 28

3.2.1 REÓMETRO 28

3.2.2 BÁSCULA 31

3.2.3 ESPECTRÓMETRO 32

3.2.4 AGITADOR MAGNÉTICO 35

3.2.5 SONICADOR DE PUNTA ... 36
3.2.6 MICROSCÓPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO (SEM) ... 37
3.2.7 MICROSCÓPIO ELECTRÓNICO DE TRANSMISIÓN (TEM) ... 38
3.3 PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS ... 39
Capítulo 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN ... 41
4.1 MICROSCOPÍA SEM ... 41
4.2 MICROSCOPÍA TEM ... 44
4.3 GRÁFICAS REOLÓGICAS ... 47
4.4 VISCOSIDAD CINEMATICA ... 53
4.5 CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES Y MUESTRAS ... 56
Capítulo 5. ANÁLISIS ECONÓMICO ... 62
5.1 COSTES DE MATERIAS PRIMAS ... 62
5.2 AMORTIZACIÓN DE EQUIPOS ... 63
5.3 COSTE DE OPERARIO ... 65
5.4 PRESUPUESTO FINAL ... 66
Capítulo 6. ESTUDIO MEDIOAMBIENTAL ... 68
6.1 ANÁLISIS DE INVENTARIO ... 68
6.2 EVALUACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL ... 70
6.3 INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS ... 75
6.4 COMPROMISO CON LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE (ODS) ... 75
Capítulo 7. CONCLUSIONES, FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN Y POSIBLES APLICACIONES. ... 77
7.1 CONCLUSIONES ... 77
7.2 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN ... 78
7.3 POSIBLES APLICACIONES ... 79
BIBLIOGRAFÍA ... 81
ANEXOS ... 86

Índice de Figuras

Ilustración 1 Curva de Stribeck (**17**) 18
Ilustración 2 Aceites analizados 24
Ilustración 3 Nanotubos de carbono de pared múltiple (HGN-1) 25
Ilustración 4 Reómetro Haake Rheostress 6000 28
Ilustración 5 Reometro con sistema de medida Cono-Plato 29
Ilustración 6 Termostato del reómetro 30
Ilustración 7 Báscula Ohaus Pioneer PX 31
Ilustración 8 Espectrómetro Antoon Paar Lyza 7000 32
Ilustración 9 Placa ZnSe de valle para líquidos. Espectrómetro Anton Paar Lyza 7000 33
Ilustración 10 Accesorio para medir sólidos. Espectrómetro Anton Paar Lyza 7000 34
Ilustración 11 Agitador magnético JP Selecta Multimatic-5N 35
Ilustración 12 Sonicador de punta Bandelin 36
Ilustración 13 microscopio electrónico de barrido del CNME (**23**) 37
Ilustración 14 microscopio electrónico de transmisión del CNME (**24**) 38
Ilustración 15 Muestras de aceite 20W50 con 0.75% de aditivo (HGN-1) y aceite 5W30 con 0.5% de aditiva (HGN-1) 40
Ilustración 16 Imagen microscopía SEM de nanotubos de carbono HGN-1 con aumento x18.000 41
Ilustración 17 Imagen microscopía SEM de nanotubos de carbono HGN-1 con aumento x27.000 42
Ilustración 18 Imagen microscopía SEM de nanotubos de carbono con aumento x35.000 42
Ilustración 19 Imagen microscopía SEM de nanotubos de carbono con aumento x70.000 43
Ilustración 20 Imagen microscopía TEM de nanotubos de carbono a escala 200nm 44
Ilustración 21 Imagen microscopía TEM de nanotubos de carbono a escala 200nm ... 45
Ilustración 22 Imagen microscopía TEM de nanotubos de carbono a escala 200nm ... 45
Ilustración 23 Esfuerzo cortante frente a Gradiente de velocidad en muestra 5W30 con 0.75% HGN-1 de 20ºC a 80ºC 48
Ilustración 24 Esfuerzo cortante frente a Gradiente de velocidad en muestra 5W30 con 0.75% HGN-1 de 100ºC a 160ºC 48
Ilustración 25Viscosidad dinámica frente a Gradiente de velocidad en muestra 5W30 con 0.75% HGN-1 de 20ºC a 80ºC 49

Ilustración 26 Viscosidad dinámica frente a Gradiente de velocidad en muestra 5W30 con 0.75% HGN-1 de 100ºC a 160ºC 49
Ilustración 27 Esfuerzo cortante frente a Gradiente de velocidad en muestra 20W50 con 0.75% HGN-1 de 20ºC a 80ºC 50
Ilustración 28 Esfuerzo cortante frente a Gradiente de velocidad en muestra 20W50 con 0.75% HGN-1 de 100ºC a 160ºC 50
Ilustración 29 Viscosidad dinámica frente a Gradiente de velocidad en muestra 20W50 con 0.75% HGN-1 de 20ºC a 80ºC 51
Ilustración 30 Viscosidad dinámica frente a Gradiente de velocidad en muestra 20W50 con 0.75% HGN-1 de 100ºC a 160ºC 51
Ilustración 31 Gráfica viscosidad cinemática frente a Temperatura en dispersiones 5W30 con concentraciones 0%, 0.25%, 0.5%, 0.75% 54
Ilustración 32 Gráfica viscosidad cinemática frente a Temperatura en dispersiones 20W50 con concentraciones 0%, 0.25%, 0.5%, 0.75% 55
Ilustración 33 Espectro de muestra 5W30+0.25% HGN-1 y 5W30 PURO Intensidad vs Longitud de Onda 57
Ilustración 34 Espectro de muestra 5W30+0.5% HGN-1 y 5W30 PURO Intensidad vs Longitud de Onda 57
Ilustración 35 Espectro de muestra 5W30+0.75% HGN-1 y 5W30 PURO Intensidad vs Longitud de Onda 58
Ilustración 36 Espectro de muestra 20W50+0.25% HGN-1 y 5W30 PURO Intensidad vs Longitud de Onda 59
Ilustración 37 Espectro de muestra 20W50+0.5% HGN-1 y 5W30 PURO Intensidad vs Longitud de Onda 60
Ilustración 38 Espectro de muestra 20W50+0.75% HGN-1 y 5W30 PURO Intensidad vs Longitud de Onda 60
Ilustración 39 Comparación de CO_2 equivalente emitido por cada aceite con una dispersión de 1.5% 71
Ilustración 40 Gráfico porcentual de contaminación de cada material 72
Ilustración 41 Carga ambiental en mPt en subcategorías de impacto 73
Ilustración 42 Carga ambiental en mPt en las categorías principales de impacto 74
Ilustración 43 Imagen microscopía SEM de nanotubos de carbono con aumento x15.000 86
Ilustración 44 Imagen microscopía SEM de nanotubos de carbono con aumento x25.000 87
Ilustración 45 Imagen microscopía SEM de nanotubos de carbono con aumento x27.000 88
Ilustración 46 Imagen microscopía SEM de nanotubos de carbono con aumento x50.000 89

Ilustración 47 Imagen microscopía TEM de nanotubos de carbono a escala 0.5µm..... 90
Ilustración 48 Imagen microscopía TEM de nanotubos de carbono a escala 200nm.... 91
Ilustración 49 Imagen microscopía TEM de nanotubos de carbono a escala 200nm.... 92
Ilustración 50 Esfuerzo cortante frente a Gradiente de velocidad en muestra 5W30 con 0.25% HGN-1 de 20ºC a 80ºC 93
Ilustración 51 Esfuerzo cortante frente a Gradiente de velocidad en muestra 5W30 con 0.25% HGN-1 de 100ºC a 160ºC 93
Ilustración 52 Viscosidad dinámica frente a Gradiente de velocidad en muestra 5W30 con 0.25% HGN-1 de 20ºC a 80ºC 94
Ilustración 53 Viscosidad dinámica frente a Gradiente de velocidad en muestra 5W30 con 0.25% HGN-1 de 100ºC a 160ºC 94
Ilustración 54 Esfuerzo cortante frente a Gradiente de velocidad en muestra 5W30 con 0.5% HGN-1 de 20ºC a 80ºC 95
Ilustración 55 Esfuerzo cortante frente a Gradiente de velocidad en muestra 5W30 con 0.5% HGN-1 de 100ºC a 160ºC 95
Ilustración 56 Viscosidad dinámica frente a Gradiente de velocidad en muestra 5W30 con 0.5% HGN-1 de 20ºC a 80ºC 96
Ilustración 57 Viscosidad dinámica frente a Gradiente de velocidad en muestra 5W30 con 0.5% HGN-1 de 100ºC a 160ºC 96
Ilustración 58 Esfuerzo cortante frente a Gradiente de velocidad en muestra 20W50 con 0.25% HGN-1 de 20ºC a 80ºC 97
Ilustración 59 Esfuerzo cortante frente a Gradiente de velocidad en muestra 20W50 con 0.25% HGN-1 de 100ºC a 160ºC 97
Ilustración 60 Viscosidad dinámica frente a Gradiente de velocidad en muestra 20W50 con 0.25% HGN-1 de 20ºC a 80ºC 98
Ilustración 61 Viscosidad dinámica frente a Gradiente de velocidad en muestra 20W50 con 0.25% HGN-1 de 100ºC a 160ºC 98
Ilustración 62 Esfuerzo cortante frente a Gradiente de velocidad en muestra 20W50 con 0.5% HGN-1 de 20ºC a 80ºC 99
Ilustración 63 Esfuerzo cortante frente a Gradiente de velocidad en muestra 20W50 con 0.5% HGN-1 de 100ºC a 160ºC 99
Ilustración 64 Viscosidad dinámica frente a Gradiente de velocidad en muestra 20W50 con 0.5% HGN-1 de 20ºC a 80ºC 100
Ilustración 65 Viscosidad dinámica frente a Gradiente de velocidad en muestra 20W50 con 0.5% HGN-1 de 100ºC a 160ºC 100
Ilustración 66 Gráfica viscosidad cinemática frente a Temperatura en muestra 5W30 con 0.25% HGN-1..... 101
Ilustración 67 Gráfica viscosidad cinemática frente a Temperatura en muestra 5W30 con 0.5% HGN-1..... 101

Ilustración 68 Gráfica viscosidad cinemática frente a Temperatura en muestra 5W30 con 0.75% HGN-1 102
Ilustración 69 Gráfica viscosidad cinemática frente a Temperatura en muestra 20W50 con 0.25% HGN-1 102
Ilustración 70 Gráfica viscosidad cinemática frente a Temperatura en muestra 20W50 con 0.5% HGN-1 103
Ilustración 71 Gráfica viscosidad cinemática frente a Temperatura en muestra 20W50 con 0.75% HGN-1 103
Ilustración 72 Espectro de muestras 5W30 con concentraciones de 0%, 0.25%, 0.5% y 0.75% de HGN-1 Intensidad vs Longitud de Onda 104
Ilustración 73 Espectro de muestras 20W50 con concentraciones de 0%, 0.25%, 0.5% y 0.75% de HGN-1 Intensidad vs Longitud de Onda 105

Índice de Tablas

Tabla 1 Cálculo masa de nanopartículas necesaria 27
Tabla 2 Masa utilizada de nanopartículas 27
Tabla 3 Valores de viscosidad dinámica (mPa.s) de aceite 5W30 a las diferentes concentraciones y temperaturas estudiadas. 54
Tabla 4 Datos viscosidad dinámica (mPa.s) de aceite 20W50 en las diferentes concentraciones y temperaturas 55
Tabla 5 Coste aceites comerciales 63
Tabla 6 Coste nanotubos de carbono (HGN-1) 63
Tabla 7 Coste de amortización de equipos 64
Tabla 8 Coste de alquiler de equipos 65
Tabla 9 Coste de operario 66
Tabla 10 Presupuesto final 67
Tabla 11 Reactivos y cantidades sintetizados para obtener 5g de CNT 69
Tabla 12 Aceites y densidades utilizados 69
Tabla 13 Cantidad de materiales utilizados 70
Tabla 14 Cantidad equivalente de CO2 con una dispersión de 1.5% 70
Tabla 15 Cantidad equivalente de CO2 de cada material 71
Tabla 16 Cantidad total de CO2 72

Índice de Ecuaciones

Ecuación 1 Viscosidad dinámica 20
Ecuación 2 Viscosidad cinemática 20
Ecuación 3 Ley de Newton para fluidos Newtonianos 21
Ecuación 4 Ley de Newton para fluidos no newtonianos 21
Ecuación 5 Cálculo masa nanopartículas 26
Ecuación 6 Amortización económica de los equipos 64

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

1.1 CONTEXTUALIZACIÓN HISTÓRICA

La historia de la lubricación está estrechamente ligada al desarrollo de los mecanismos utilizados en todas las civilizaciones, desarrollándose conjuntamente y llevando la maquinaria a un mejor rendimiento (1). El auge de la maquinaria llegó con la revolución industrial, donde se creó la necesidad de desarrollar un tipo de lubricación estable a temperaturas superiores y con una gran disponibilidad (2). La necesidad quedaba cubierta ya que la aparición del petróleo durante el siglo XIX proporcionó diferentes aceites minerales que satisfacían las necesidades del momento (3).

Sin embargo, la necesidad de soportar una mayor exigencia en velocidad carga y temperatura en la maquinaria hizo que se mostrasen las limitaciones de los lubricantes que existían en aquel momento (4). Fue entonces, a finales del siglo XX, cuando comenzaron a introducir nuevas tecnologías para mejorar las propiedades y, conseguir el rendimiento necesario (5). Estas nuevas tecnologías, implicaban aditivos para diferentes aspectos como pueden ser la variación de viscosidad con temperatura, la generación de espuma, óxidos y corrosión entre otros (6). Para este tipo de aditivos se utilizan ciertas concentraciones de nanopartículas, las cuales son las responsables de mejorar el rendimiento de dichos aceites por su particular tamaño y forma, las cuales determinan un comportamiento muy característico en cada una de ellas (7).

El desarrollo de las nanopartículas viene desarrollándose desde finales del siglo XX, impulsado también por el avance de la microscopía electrónica y el avance de los diferentes tipos de síntesis (8). Sin embargo, su descubrimiento, en profundidad, se remonta hasta el año 1959, cuando Richard Feynman (9), quien es considerado como el padre de la nanotecnología, sentó las bases para poder manipular átomos a escala nanométrica (10).

1.2 INTRODUCCIÓN AL PROYECTO

El presente Trabajo Fin de Grado se ha llevado a cabo en el Departamento de Ingenierías de la Escuela STEAM en la Universidad Europea de Madrid y específicamente con el grupo de investigación NANO-UEM, el cual lleva años trabajando en el campo de la Reología de Nanofluidos. Este trabajo, además supone una continuación a otros desarrollados anteriormente: "*Estudio reológico de aceites lubricantes 5W40 y 10W40 con nanopartículas base grafeno*" (11), "*Estudio de lubricidad de aceites lubricantes dopados con nanopartículas*" (12) y "*Efecto de nanopartículas base carbono en el comportamiento reológico de aceites lubricantes*" (13).

Los aceites lubricantes sirven para minimizar el desgaste por fricción de las diferentes partes mecánicas que componen dicho mecanismo. En este trabajo se estudian los aceites 5W30 y 20W50, los cuales son aceites utilizados en motores de combustión interna en coches comunes (14). Es por ello por lo que los análisis realizados deben simular temperaturas de funcionamiento similares y, ver la evolución de su comportamiento con respecto a la temperatura, ya que los aceites en este tipo de ámbitos trabajan en un rango de temperatura muy amplio (4). Desde la temperatura ambiente, cuando se arranca el coche, hasta la temperatura de funcionamiento que suele encontrarse en torno a 90º. La introducción de la nanotecnología permite mantener las propiedades iniciales durante un rango más amplio, consiguiendo mejorar el trabajo, la vida útil, la eficiencia y las emisiones generadas (15-16).

Diferentes estudios recientes han empezado a demostrar las ventajas de utilizar estos aditivos. Algunos trabajos destacan una reducción eficaz del rozamiento, lo que ayuda a que las piezas se desgasten menos (2). Otros análisis realizados con partículas de distintos materiales demuestran que el aceite puede volverse más resistente y mejorar su capacidad para manejar el calor, lo que ayuda a que el motor no se caliente tanto (14). En el caso de las partículas basadas en carbono, los resultados van en la misma línea, señalando que estos aditivos ayudan a que el lubricante funcione mejor en condiciones exigentes (4-15). Todo esto sugiere que, si se elige la cantidad adecuada, se pueden mejorar las propiedades del aceite original y alargar su vida útil (3).

1.3 OBJETIVOS DEL PROYECTO

El objetivo principal de este proyecto consiste en evaluar el comportamiento termo-físico y de estabilidad de los nanofluidos basados en aceites lubricantes 5W30 y 20W50, con el fin de determinar su viabilidad técnica y potencial aplicación a escala industrial en sistemas de lubricación y transferencia de calor. Para ello analizaremos los aceites con diferentes concentraciones de nanopartículas y, posteriormente, analizar su comportamiento en un rango de temperatura de entre 20ºC y 160ºC.

Este tipo de análisis nos permite comparar los resultados con respecto al aceite puro y, así, crear diferentes curvas de funcionamiento y obtener las diferencias, tanto positivas como negativas que producen los diferentes aditivos utilizados. Teniendo esto en cuenta, los objetivos específicos de este proyecto se pueden definir como:

1. Formular nanofluidos a partir de aceites lubricantes 5W30 y 20W50 mediante la adición de nanopartículas seleccionadas (base grafeno y otras).

2. Establecer la estructura y morfología de las nanopartículas empleadas.

3. Analizar la influencia de la concentración de nanopartículas y temperatura en las propiedades reológicas (viscosidad, índice de viscosidad).

4. Identificar las limitaciones técnicas, económicas y ambientales para su implementación industrial.

5. Determinar la inversión económica necesaria para la realización de esta investigación

6. Establecer el impacto medioambiental emitido durante la investigación.

Capítulo 2. MARCO TEÓRICO

2.1 TRIBOLOGÍA

2.1.1 ACEITES LUBRICANTES

Un aceite lubricante es un fluido diseñado para minimizar la fricción entre las superficies de un mecanismo y, por ende, reducir su desgaste, fuerza de rozamiento y temperatura de los elementos, causada por la fricción, todos los factores anteriores favorecen la prolongación de la vida útil del mecanismo ([1]).

Los aceites lubricantes se componen de un aceite base y una serie de aditivos que aportan diferentes mejoras a dicha base. Se pueden clasificar en función de su procedencia, definiéndose como minerales, semisintéticos y sintéticos ([2]).

- Aceites lubricantes minerales: Proceden de la destilación del petróleo y están formados a de compuestos orgánicos formado únicamente por átomos de carbono e hidrógeno, conocidos como hidrocarburos. Los tres tipos de hidrocarburos que se usan para este proceso son parafínicos, nafténicos y aromáticos.

    - Hidrocarburos parafínicos: son conocidos como alcanos, se trata de una familia de hidrocarburos saturados, es decir, compuestos orgánicos que unen los átomos de carbono e hidrógeno mediante enlaces simples. Este tipo de unión otorga un comportamiento con una gran estabilidad química, baja reactividad y un comportamiento predecible frente a la oxidación, esto hace que el 70% de los aceites lubricantes estén conformados por hidrocarburos parafínicos ([10]).

- Hidrocarburos nafténicos: también llamados cicloalcanos, son una familia de hidrocarburos saturados, al igual que los hidrocarburos parafínicos, sin embargo, su estructura está formada por anillos cerrados de átomos de carbono presentando una configuración cíclica. Los puntos de ebullición relativamente altos, la buena dispersión de los aditivos y su menor tendencia a cristalizar, hacen de este tipo de hidrocarburos una buena opción para aceites industriales e hidráulicos ([8]).

- Hidrocarburos aromáticos: se caracterizan por poseer una estructura de enlaces cíclicos con electrones deslocalizados, esto es conocido como sistema aromático, lo que también le da nombre a esta familia. Este tipo de hidrocarburos son más densos y tienen una buena capacidad de dispersión, esto provoca que tengan una mayor capacidad de lubricación durante condiciones límite. Sin embargo, presentan inconvenientes como la formación de posos o la oxidación, lo que hace que su producción no sea tan atractiva ([3]).

- Aceites lubricantes sintéticos: se desarrollan en laboratorios a partir de materias primas naturales, con ellas se obtienen las condiciones deseadas creando la estructura deseada para optimizar el rendimiento. Este tipo de aceites son necesarios porque los aceites minerales tienen ciertas limitaciones, mejoradas en este tipo de aceites ([16]).

- Aceites lubricantes semisintéticos: Los aceites puramente sintéticos son inexistentes hoy en día, los aceites comerciales son una mezcla de aceites minerales y sintéticos, teniendo una relación de 70% - 30% respectivamente. La parte mineral se denomina la base del aceite, mientras el 30% restante se asocia a la parte sintética o también conocido como aditivos. La parte sintética es la encargada de mejorar las propiedades de la base, en función de la estructura obtenida en dicha parte el aceite obtendrá unas propiedades diferentes en determinados ámbitos ([14]).

2.1.2 CURVA DE STRIBECK

La curva de Stribeck es un diagrama que relaciona las condiciones de lubricación y fricción entre elementos. El desgaste de un material viene dado por condiciones como el coeficiente de fricción, la velocidad y fuerza a la que se encuentran las superficies en contacto y la viscosidad del lubricante utilizado ([2]). Con todos estos datos, se podrá estimar el desgaste del material y el espesor de la capa de lubricante entre superficies ([1]-[15]).

La curva de Stribeck se compone de cuatro zonas fundamentales:

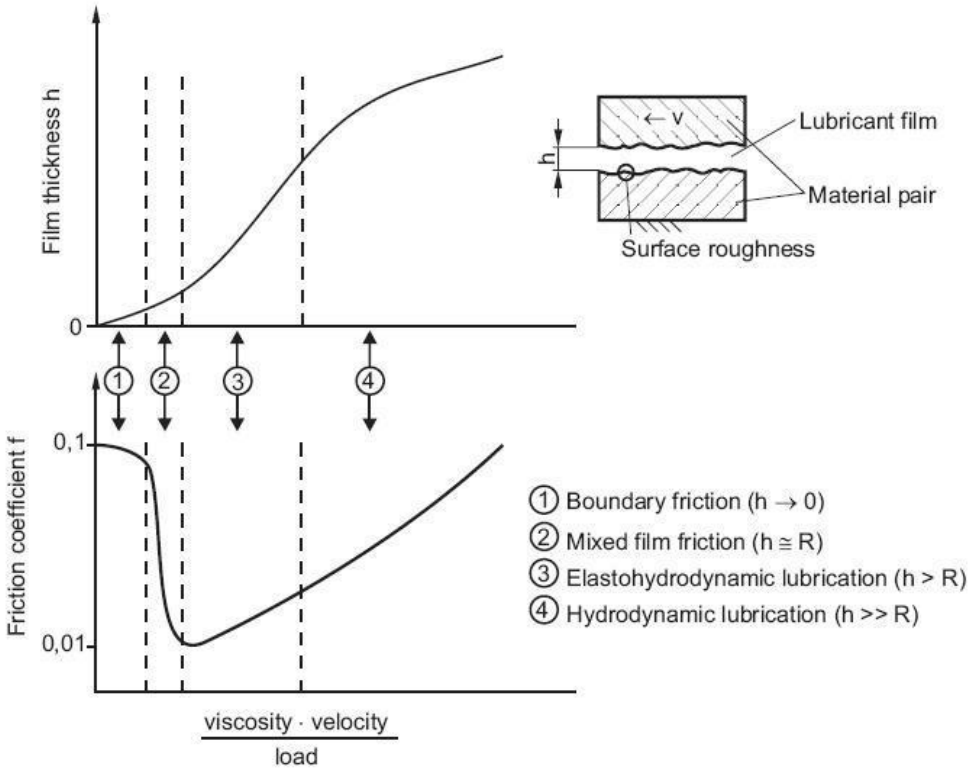


Ilustración 1 Curva de Stribeck ([17])

1. Lubricación límite: La película de lubricación es insuficiente para separar las superficies, haciendo que se encuentren en contacto y aumentando la fricción, siendo incapaz de generar una capa lo suficientemente gruesa como para dar lugar a una lubricación fluida. Esto se debe a una viscosidad del lubricante baja o una carga muy pesada.

2. Lubricación mixta: Durante este régimen la carga se distribuye entre la película lubricante y el contacto entre superficies, generando fricción, aunque menos que en el caso anterior. En esta zona de la curva nos encontramos fuera de la zona óptima, aunque existen puntos óptimos.

3. Lubricación elastohidrodinámica: Se da cuando las superficies se deforman elásticamente, provocando un aumento de la viscosidad en las zonas de contacto, esto facilita la distribución de la carga por su aumento de superficie gracias a dicha deformación. Sin embargo, este tipo de lubricación tiene el inconveniente de ser limitante a la hora de proteger el desgaste del material.

4. Lubricación hidrodinámica: La presión de la película de lubricante que separa ambos elementos se crea por la propia superficie en movimiento cuando alcanza cierta velocidad en relación con la otra superficie. Durante esta zona de la curva, no se separan las superficies únicamente por presión, sino que también se hace manteniendo un suministro de aceite constante. Se trata de la zona óptima de lubricación dentro de la curva.

2.2 REOLOGÍA

La reología es la rama de la física que estudia la deformación y el flujo del material cuando éste es sometido a diferentes esfuerzos externos. Para este estudio de aceites lubricantes es un aspecto fundamental, ya que define la capacidad que tiene un aceite de fluir y ofrecer la capacidad de lubricación necesaria en cada uno de los casos.

2.2.1 VISCOSIDAD

La viscosidad es una propiedad física fundamental de los aceites lubricantes. Establece la resistencia interna que ofrece el fluido al deformarse o fluir cuando se le aplica una fuerza (18). La viscosidad es determinada por el fabricante en función de las necesidades que necesita el motor a lubricar, ofreciendo más o menos viscosidad, variando la densidad. Las viscosidades se definen de dos formas, dinámica y cinemática, en función de los parámetros que relacionan.

- Viscosidad dinámica (μ) define como la relación entre el esfuerzo cortante (τ) y el gradiente de velocidad (γ), el cuál se define como un diferencial de velocidad (dv) con respecto a la altura (dy), estableciendo una medida entre el centro del recipiente y la pared. Expuesto en términos matemáticos, la viscosidad dinámica se expresa de la siguiente forma:

$$\tau = \mu \times \gamma = \mu \times \frac{dv}{dy}$$

Ecuación 1 Viscosidad dinámica

- Viscosidad cinemática (υ): se define como la conexión entre la viscosidad dinámica(μ), mencionada anteriormente, y la densidad del fluido (ρ), definida como la masa dividida por volumen del fluido. Expuesto en términos matemáticos se define como:

$$\upsilon = \frac{\mu}{\rho} = \frac{\mu}{\frac{m}{V}}$$

$$\upsilon = \frac{\mu \times V}{m}$$

Ecuación 2 Viscosidad cinemática

2.2.2 LÍQUIDOS NEWTONIANOS

Los líquidos Newtonianos son aquellos que muestran una relación lineal durante todo el rango de su viscosidad dinámica en unas condiciones que mantengan la temperatura y presión del fluido invariantes (19). La ecuación que describe esta ley, enunciada por Isaac Newton es la descrita anteriormente:

$$\tau = \mu \times \frac{dv}{dy}$$

Ecuación 3 Ley de Newton para fluidos Newtonianos

Al representar este comportamiento reológico gráficamente, se observa que la función de un fluido newtoniano es una recta que parte del origen de coordenadas. Esto indica que el fluido comienza a deformarse ante cualquier fuerza. Esta característica la diferencia de los plásticos, los cuales deben superar un valor crítico inicial para comenzar a fluir.

2.2.3 LÍQUIDOS NO NEWTONIANOS

Los líquidos no newtonianos son aquellos en los que la relación entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación no es lineal. A diferencia de los anteriores, su viscosidad no es un valor constante, sino que varía en función de la fuerza aplicada o del gradiente (15). La ecuación general que suele describir este comportamiento es:

$$\tau = K \times (\frac{dv}{dy})^n$$

Ecuación 4 Ley de Newton para fluidos no newtonianos

Donde K es el índice de consistencia y n es el índice de comportamiento de flujo. Dependiendo del valor de n, estos líquidos se pueden clasificar principalmente en (19):

Pseudoplásticos (n > 1): Su viscosidad disminuye al aumentar la velocidad de deformación. Gráficamente, aunque parten del origen de coordenadas como los newtonianos, su función es una curva cuya pendiente decrece.

Dilatantes (n > 1): Su viscosidad aumenta al incrementar la velocidad de deformación. En este caso, la curva presenta una pendiente creciente.

Al igual que ocurre con los líquidos newtonianos, estos fluidos se diferencian de los plásticos reales en que estos últimos no parten del origen, ya que requieren superar un esfuerzo umbral inicial (τ_0) para que el movimiento comience (15).

2.3 NANOTECNOLOGÍA

La nanotecnología es el campo científico dedicado al estudio y manipulación de materiales a escalas muy pequeñas, concretamente a escala nanométrica. Esto significa que se trata de las mil millonésimas parte de un metro o lo que es lo mismo 10^{-9} metros (18).

Trabajar con ella supone un gran reto a nivel ingenieril, ya que se trata de materiales extremadamente pequeños. Aunque no presenta inconvenientes a nivel de ingeniería únicamente ya que, integra principios de la física, la química y respecto a la ciencia de los materiales, cualquiera de los estudios mencionados anteriormente presenta diferentes retos a la hora de diseñar, crear y estudiar cualquiera de los materiales nanométricos en sus diferentes formas y con sus respectivas cualidades (20).

Su funcionalidad, catapulta a este tipo de estudios a una de las áreas más estudiadas a nivel científico y tecnológico debido a su alta demanda y necesidad de información en una gran variedad de sectores como la física, biología, química, electrónica y mecánica, la cual es en la que se centra este trabajo ([21]-[22]).

2.4 NANOPARTÍCULAS

Las nanopartículas son partículas con dimensiones entre 1 y 100 nanómetros. Desde el punto de vista estructural, las nanopartículas pueden adquirir diferentes como esféricas, tubulares o incluso irregulares, además, pueden estar compuestas por diferentes materiales como el carbono, polímeros y otros metales ([16]).

Su potencial es muy elevado, haciendo que una cantidad pequeña de aditivo modifique en gran medida características fundamentales de un aceite como la viscosidad, conductividad térmica o incluso la resistencia al desgaste ([5]).

En el caso de los aditivos, se utilizan diferentes tipos de nanopartículas las cuales aportan unas características diferentes en la lubricación de cada uno de los aceites. Los nanotubos de carbono son una de las estructuras utilizadas para la caracterización de nuestros aceites, sus características principales son: la estructura cilíndrica, la cual determina el nombre de este, su geometría es fundamental a la hora de ofrecer características destacables como la resistencia mecánica y la conductividad eléctrica – ([3]), ([15]).

Capítulo 3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El procedimiento experimental forma parte de la base metodológica sobre la que se apoya el estudio reológico realizado. Durante este capítulo se exponen los aceites y aditivos utilizados para las muestras, así como los equipos empleados para la realización de las dispersiones y su posterior caracterización. Además, se expone el procedimiento utilizado para poder repetir el método garantizando que los resultados obtenidos sean comparables con los ya existentes.

3.1 MATERIALES

3.1.1 ACEITES

Los ensayos se realizaron utilizando dos tipos de aceites lubricantes diferentes, según su clasificación SAE. Se trata de dos aceites comerciales multigrado, enfocados a diferentes aplicaciones. El 5W30 está enfocado a un rendimiento en condiciones moderadas, mientras que el 20W50 se encuentra en un rango óptimo durante operaciones más exigentes, trabajando a mayor temperatura. Ambos aceites se han analizado puros, como salen de fábrica, para posteriormente, analizar las diferencias que aportan los diferentes aditivos.



Ilustración 2 Aceites analizados

3.1.2 NANOTUBOS DE CARBONO DE PARED MÚLTIPLE.

En el caso de los aditivos, se utilizan diferentes tipos de nanopartículas las cuales aportan unas características diferentes en la lubricación de cada uno de los aceites, entre las cuales se encuentran los nanotubos de carbono (HGN-1).

Para obtener unos resultados fiables y veraces, se debe analizar las dispersiones con diferentes concentraciones de aditivos, para ello utilizaremos el mismo porcentaje de análisis, independientemente del tipo de aditivo que estemos utilizando. Este cálculo debe realizarse previamente a la realización del cronograma para poder conocer la cantidad de producto necesario.

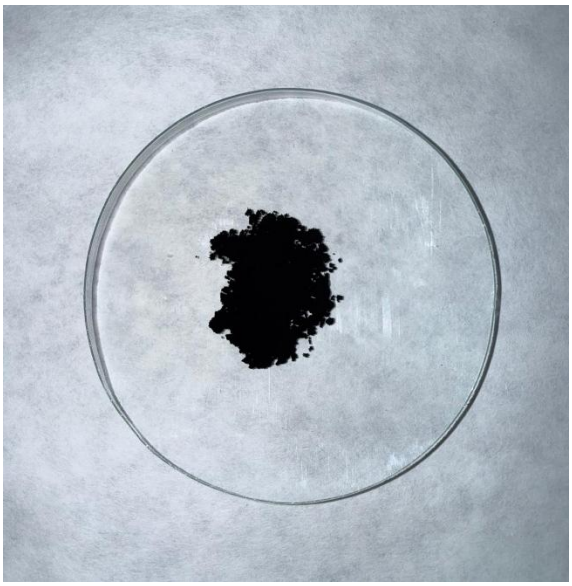


Ilustración 3 Nanotubos de carbono de pared múltiple (HGN-1)

$$wt_{nanop} = \frac{m_{nanop}}{m_{total}} = \frac{m_{nanop}}{m_{nanop} + m_{total}}$$

$$m_{nanop} = wt_{nanop} \times \left(m_{nanop+m_{aceite}}\right)$$

$$\rho_{aceite} = \frac{m_{aceite}}{V_{aceite}} \; ; \; m_{aceite} = \rho_{aceite} \times V_{aceite}$$

$$m_{nanop} = wt_{nanop} \times m_{nanop} + wt_{nanop} \times \rho_{aceite} \times V_{aceite}$$

$$m_{nanop} \times \left(1 - wt_{nanop}\right) = wt_{nanop} \times \rho_{aceite} \times V_{aceite}$$

$$m_{nanop} = \frac{wt_{nanop} \times \rho_{aceite} \times V_{aceite}}{1 - wt_{nanop}}$$

Ecuación 5 Cálculo masa nanopartículas

Tabla 1 Cálculo masa de nanopartículas necesaria

Nº MUESTRA	% DE CONCENTRACIÓN	MASA NANOPARTÍCULA (g)	TIPO DE ACEITE	DENSIDAD DEL ACEITE (g/mL)
1	0,25	0,044	20W50	0,88
2	0,5	0,088		
3	0,75	0,133		
4	0,25	0,043	5W30	0,85
5	0,5	0,085		
6	0,75	0,128		

Tabla 2 Masa utilizada de nanopartículas

Nanotubos de Carbono de pared múltiple (HGN-1) (g)	**0,521**

3.2 EQUIPOS

3.2.1 REÓMETRO

La viscosidad de un aceite es una de las características más determinantes, para medirla, utilizaremos un reómetro, el cual aplica una fuerza sobre el lubricante para evaluar tanto la viscosidad como el esfuerzo. En él realizaremos diferentes medidas con las dispersiones especificadas, medidas a diferente temperatura, llegando hasta un máximo de 160º C. El modelo del reómetro utilizado es el "*Haake Rheostress* 6000" de compañía alemana, el cual permite alcanzar temperaturas de hasta 500º C.



Ilustración 4 Reómetro Haake Rheostress 6000

Su funcionamiento consiste en un motor de arrastre electromagnético el cual regula la velocidad y fuerza aplicadas sobre el fluido. El sistema que utiliza para medir el aceite es el CP, también denominado Cone-Plate por el software RheoWin. El sistema consiste en un recipiente, plato, por su superficie plana y pulida, se mantiene estático sin girar y contiene el líquido a medir, además es a través del plato donde se realiza la transferencia de calor al líquido. Por otro lado, el cono, adquiere su nombre por la forma inclinada de la parte superior, dándole forma de cono, es la parte giratoria, encargada de regular la fuerza y velocidad que aplica el equipo.



Ilustración 5 Reometro con sistema de medida Cono-Plato

La importancia de medir los fluidos a altas temperaturas viene dada por el funcionamiento de los motores de combustión interna, los cuales condicionan las circunstancias en las que trabajan los aceites lubricantes. Para alcanzar las temperaturas establecidas es necesario utilizar un termostato de circulación, en nuestro caso el utilizado funciona con silicona. Este equipo calienta la silicona y la transporta hasta la base del reómetro, donde calienta por transferencia de calor el plato.



Ilustración 6 Termostato del reómetro

3.2.2 BÁSCULA

La báscula "*Ohaus Pioneer PX*" es una balanza de alta precisión diseñada para la medición de masas. Cuenta con una resolución de 0,1 miligramos, lo que la hace especialmente útil en mediciones experimentales que requieren una cantidad muy pequeña de material, tal como es necesario en nuestro caso. Este tipo de medición utiliza un sistema de pesaje electromagnético para garantizar cierta estabilidad en el pesaje, su cámara de protección minimiza las perturbaciones externas que puedan ser producidas por el aire o ciertas vibraciones externas. Durante este estudio, la báscula se ha empleado para medir con precisión la masa de nanopartículas necesarias para cada una de las dispersiones, previamente calculada en función de la concentración deseada. La exactitud durante esta práctica es fundamental a la hora de obtener unos resultados válidos, es por ello por lo que la poca variación de masa que exista deberá ser anotada para una posterior corrección.

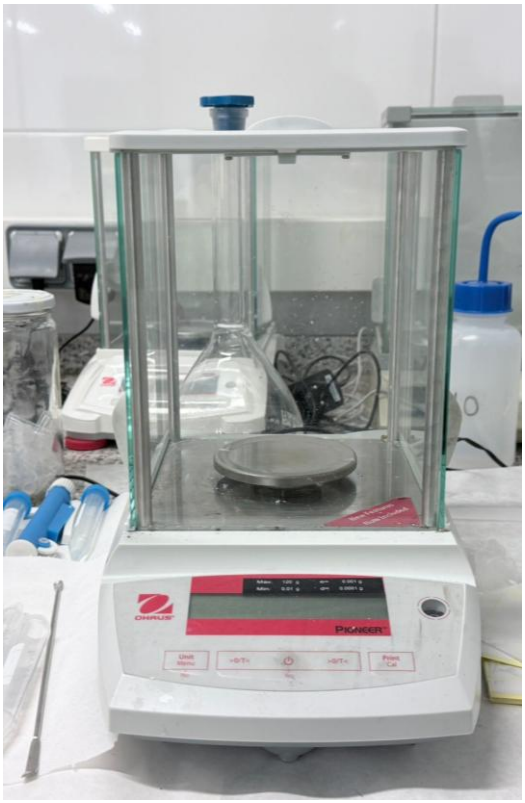


Ilustración 7 Báscula Ohaus Pioneer PX

3.2.3 ESPECTRÓMETRO

El Anton Paar Lyza 7000 es un espectrómetro de infrarrojo cercano diseñado para la caracterización precisa de líquidos y diferentes materiales en función de su reacción ante la luz. El equipo funciona iluminando la muestra con distintas longitudes de onda, analizando la cantidad de luz que absorbe, esto permite caracterizar los diferentes aceites o materiales que debemos analizar.

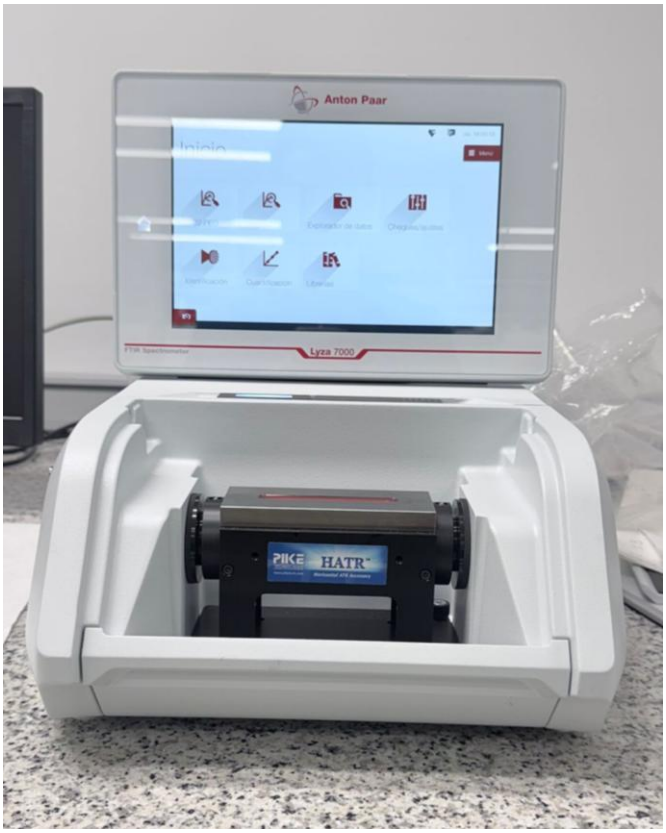


Ilustración 8 Espectrómetro Antoon Paar Lyza 7000

Este dispositivo ofrece una gran cantidad de ventajas, destacando la sencillez de trabajo, introduciendo una pequeña cantidad de aceite en la celda, el propio equipo se encarga de realizar el análisis de la muestra tras unos pequeños ajustes. Esto permite obtener

una amplia cantidad de información sobre el material analizado sin necesidad de procedimientos excesivos y complejos. Además, el propio dispositivo almacena los datos obtenidos y permite realizar comparaciones con los datos de otras muestras realizadas con anterioridad.

En este trabajo, el espectrómetro se utilizó tanto para la caracterización de los aceites puros como para la medición de las diferentes suspensiones preparadas con la presencia de nanopartículas. Este análisis previo permitió conocer con precisión las propiedades iniciales de cada componente antes de preparar las dispersiones, fijando de esta manera una base con la que comparar los cambios observados en las dispersiones.

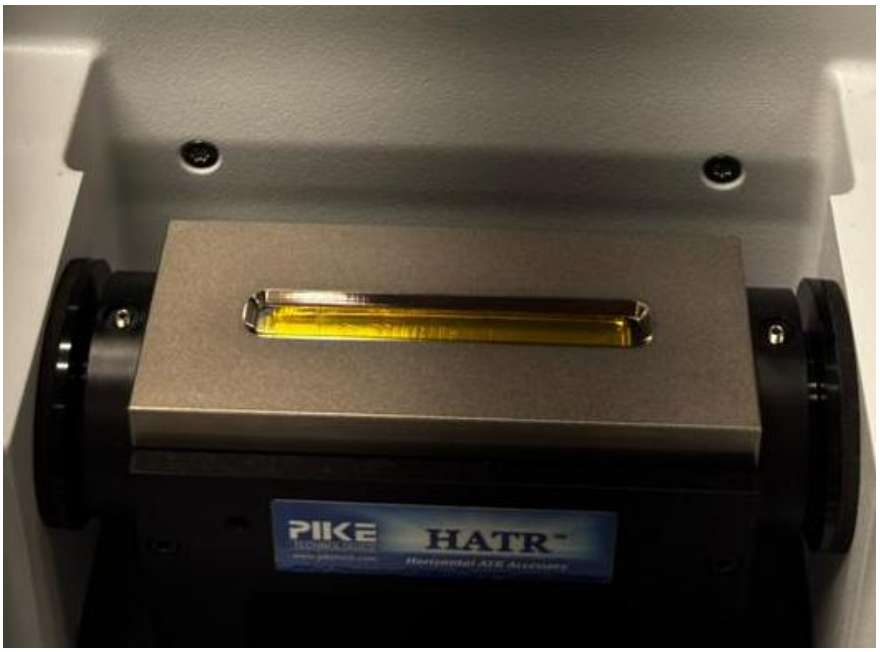


Ilustración 9 Placa ZnSe de valle para líquidos. Espectrómetro Anton Paar Lyza 7000

Para realizar estas mediciones con precisión, el equipo utiliza el principio de reflexión total atenuada (ATR). Este sistema funciona proyectando un haz de luz infrarroja que rebota en un cristal de alta refracción en contacto con la muestra; al producirse este rebote, la luz penetra mínimamente en el material, lo que permite obtener su huella química de forma rápida y no destructiva. El espectrómetro cuenta con dos accesorios intercambiables según el estado de la muestra: la celda HATR, diseñada con una superficie plana para contener los aceites líquidos y asegurar un análisis homogéneo, y el accesorio IRIS, que incorpora una prensa de alta precisión para comprimir las nanopartículas sólidas contra el cristal, garantizando así un contacto óptimo y una lectura fiable de los aditivos.



Ilustración 10 Accesorio para medir sólidos. Espectrómetro Anton Paar Lyza 7000

3.2.4 AGITADOR MAGNÉTICO

Para la etapa inicial en la cual homogeneizamos la muestra hemos utilizado un agitador magnético, más concretamente un "*JP Selecta Multimatic-5N*" magnético multipuesto que permite agitar diferentes muestras a la vez, regulando de forma individual cada una de ellas.

El proceso de mezcla se lleva a cabo mediante la generación de un campo magnético rotatorio, el cual interactúa con un imán introducido previamente en el recipiente con la muestra. Gracias a este equipo conseguimos una mezcla uniforme previa a otros tratamientos, cabe destacar que el equipo consta de regulación de temperatura, sin embargo, durante este experimento no haremos uso de esta regulación, manteniendo la muestra a temperatura ambiente constante.

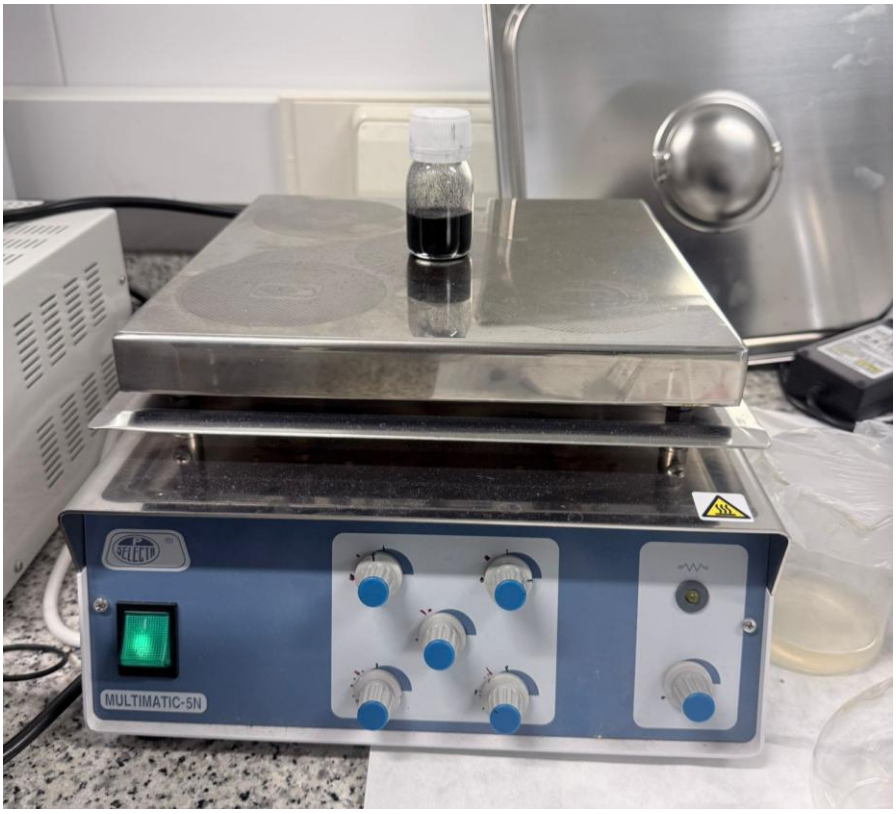


Ilustración 11 Agitador magnético JP Selecta Multimatic-5N

3.2.5 SONICADOR DE PUNTA

La homogeneización de la mezcla se llevó a cabo con el sonicador de punta de la marca “Bandelin”. Para este tipo de dispersiones es fundamental utilizar un equipo de alta intensidad como éste en vez de los baños de ultrasonidos convencionales, los cuales tienen una potencia insuficiente. El ajuste de este equipo se determina con una amplitud del 50% para evitar la degradación térmica de los aceites y opera mediante ciclos de pulsos intercalados, en los cuales emite durante 20 segundos y se asienta durante los próximos 5 segundos. Este proceso se repite durante 6 minutos, consiguiendo una mezcla homogénea y uniforme lista para su análisis.



Ilustración 12 Sonicador de punta Bandelin

3.2.6 MICROSCÓPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO (SEM)

El microscopio de electrónico de barrido (Scanning Electron Microscopy, SEM) define la morfología y la superficie de los materiales. En este caso fue utilizado para analizar los nanotubos de carbono que fueron utilizados como aditivos para su caracterización, permitiendo observar a escala nanométrica el material utilizado, el cual se encuentra en la misma escala.

Su funcionamiento consiste en emitir un haz de electrones con una carga elevada los cuales se concentran gracias a una potente lente en diferentes puntos. La superposición de los puntos analizados permite la obtención de una imagen definida.



Ilustración 13 microscopio electrónico de barrido del CNME (23)

3.2.7 MICROSCÓPIO ELECTRÓNICO DE TRANSMISIÓN (TEM)

La microscopía electrónica de transmisión (Transmission Electron Microscopy, TEM) permite analizar la estructura interna de los materiales. Al igual que con el SEM, se ha empleado para estudiar, comprender y caracterizar los nanotubos de carbono. Con este equipo se permite estudiar diferentes aspectos como la morfología superior interna, el número de paredes y su respectivo diámetro, fundamentales para la caracterización de las nanopartículas.

El funcionamiento del TEM es el mismo que el utilizado en el SEM, sin embargo, en este caso los electrones son capaces de atravesar las paredes del material y forman una imagen que describe el material en sus diferentes aspectos.



Ilustración 14 microscopio electrónico de transmisión del CNME (24)

3.3 PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS

Para la preparación de los nanolubricantes se emplearon aceites base 5W30 y 20W50, los cuales se mezclaron con nanotubos de carbono de pared múltiple (HGN-1) mediante un proceso cuidadosamente controlado para garantizar la estabilidad de la suspensión.

El procedimiento comienza vertiendo 20 mL de aceite en un vaso de precipitado y pesando con precisión la cantidad de nanopartículas necesaria, calculada previamente según la densidad del lubricante y la concentración deseada. Tras transferir el aditivo al aceite con precaución para evitar pérdidas en las paredes del recipiente, se inicia una primera fase de dispersión mecánica utilizando un agitador magnético a alta velocidad durante una hora.

A continuación, se aplica un tratamiento de sonicación utilizando un sonicador de punta, cuya elección es fundamental a diferencia de los baños convencionales debido a su mayor capacidad para romper aglomerados utilizando los ultrasonidos y conseguir la homogeneidad de la mezcla durante los ensayos, evitando la sedimentación durante los ensayos. Este proceso de sonicación con punta se extiende durante seis minutos, operando en ciclos de 20 segundos de pulsación y 5 de descanso para controlar la temperatura de la mezcla. Se recomienda preparar cada muestra justo antes de su caracterización para asegurar condiciones de envejecimiento idénticas en todas las medidas.

Durante el análisis en el reómetro se realiza mediante un barrido que incluye una rampa ascendente de 100 puntos en un rango de gradiente de velocidad de 0 hasta 1000 s^{-1}, una fase intermedia, manteniendo la velocidad de giro durante la toma de otras 100 muestras por un minuto y, finalmente una rampa descendente de regreso al reposo en la que toma las últimas 100 medidas reduciendo la velocidad de giro de 1000 s^{-1} a 0 s^{-1} durante un tiempo de cinco minutos por etapa. Estas mediciones se repiten en intervalos térmicos de 20 ºC, cubriendo un espectro completo desde los 20 ºC hasta los

160 ºC, permitiendo así obtener las curvas de esfuerzo y viscosidad necesarias para evaluar el comportamiento reológico de los nuevos lubricantes o nanofluidos preparados para el estudio.

Para completar la caracterización de los nanolubricantes, las muestras se someten también a un análisis de espectroscopía infrarroja utilizando un espectrómetro equipado con una placa de seleniuro de zinc (ZnSe). Durante este proceso, es fundamental asegurar que la placa esté correctamente calibrada antes de depositar el fluido.

Para obtener una lectura precisa, se debe cubrir la superficie de la placa con la mayor cantidad de muestra posible, garantizando un contacto óptimo que permita captar la reflexión interna de la señal de manera eficiente. Este procedimiento facilita la obtención del espectro de cada mezcla, proporcionando información detallada sobre la interacción molecular de los nanotubos con el aceite y permitiendo verificar la composición y estabilidad química de los nuevos lubricantes preparados.

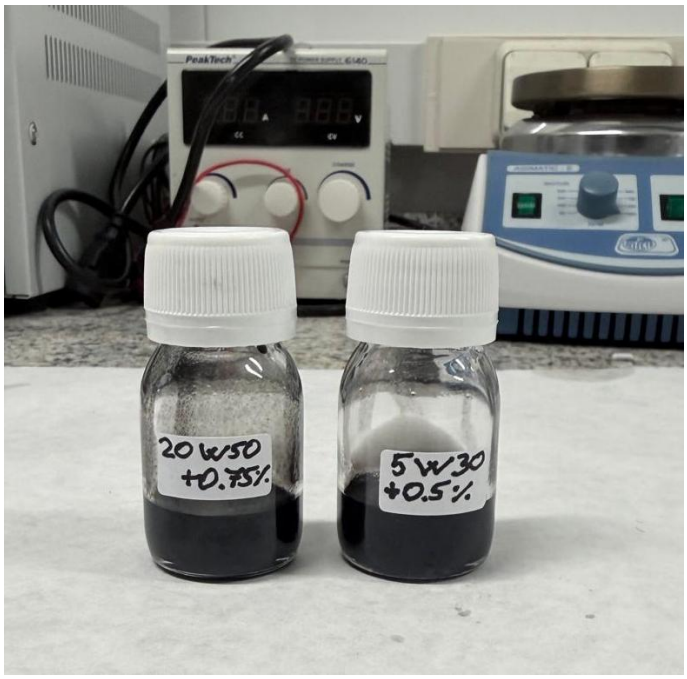


Ilustración 15 Muestras de aceite 20W50 con 0.75% de aditivo (HGN-1) y aceite 5W30 con 0.5% de aditiva (HGN-1)

Capítulo 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 MICROSCOPÍA SEM

El estudio de la morfología de las nanopartículas se ha definido gracias al estudio de microscopía electrónica de barrido (SEM). Gracias al equipo utilizado, se han obtenido las diferentes imágenes mostradas en las Ilustraciones, este tipo de imágenes nos permiten analizar su forma y tamaño, así como la estructura superficial de los nanotubos de carbono, y su grado de agregación.

El estudio SEM proporciona información detallada sobre la estructura externa de los nanotubos como sus dimensiones, este tipo de información es fundamental para evaluar su interacción con el sistema y poder comprender su comportamiento durante las dispersiones.

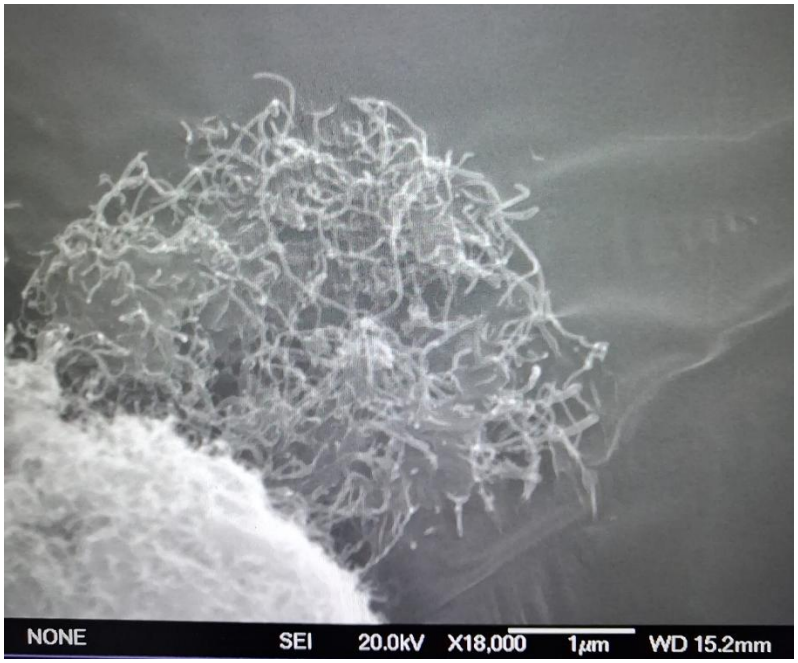


Ilustración 16 Imagen microscopía SEM de nanotubos de carbono HGN-1 con aumento x18.000

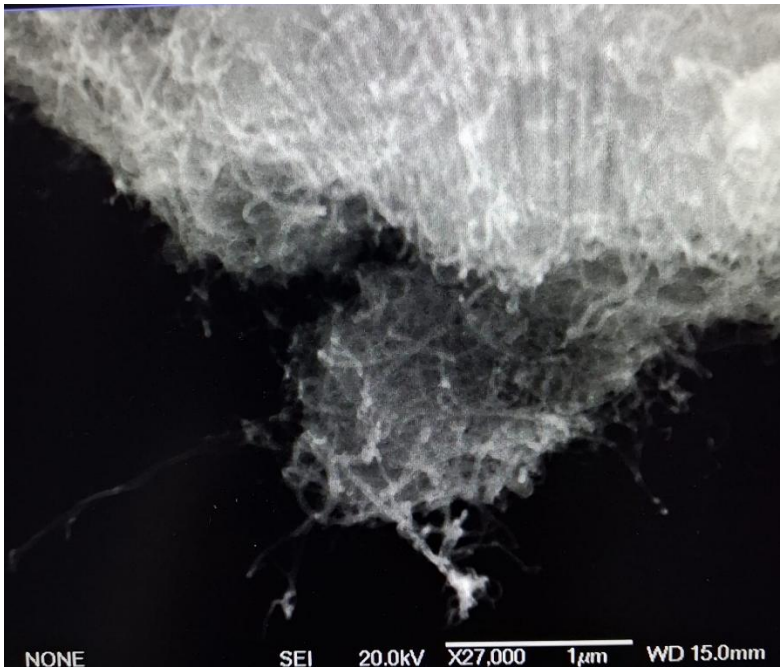


Ilustración 17 Imagen microscopía SEM de nanotubos de carbono HGN-1 con aumento x27.000

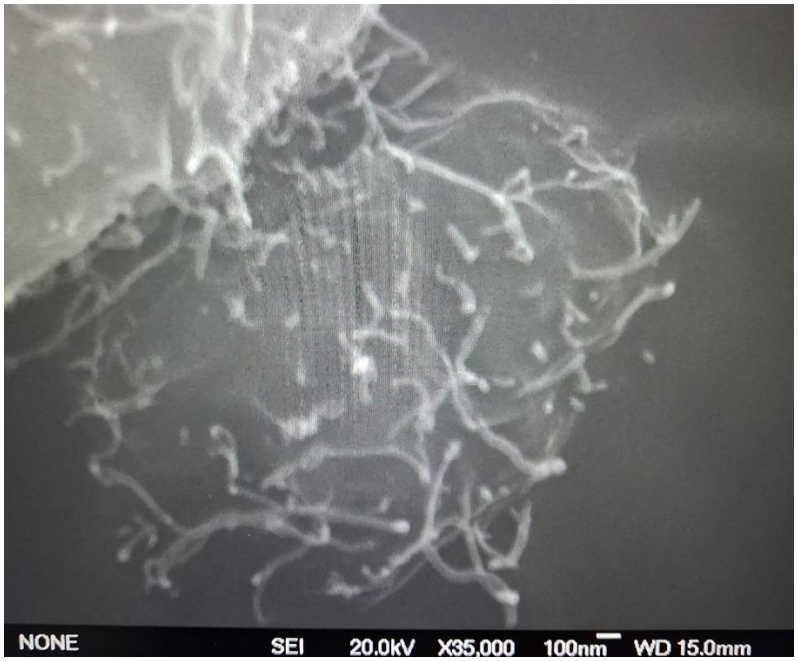


Ilustración 18 Imagen microscopía SEM de nanotubos de carbono con aumento x35.000

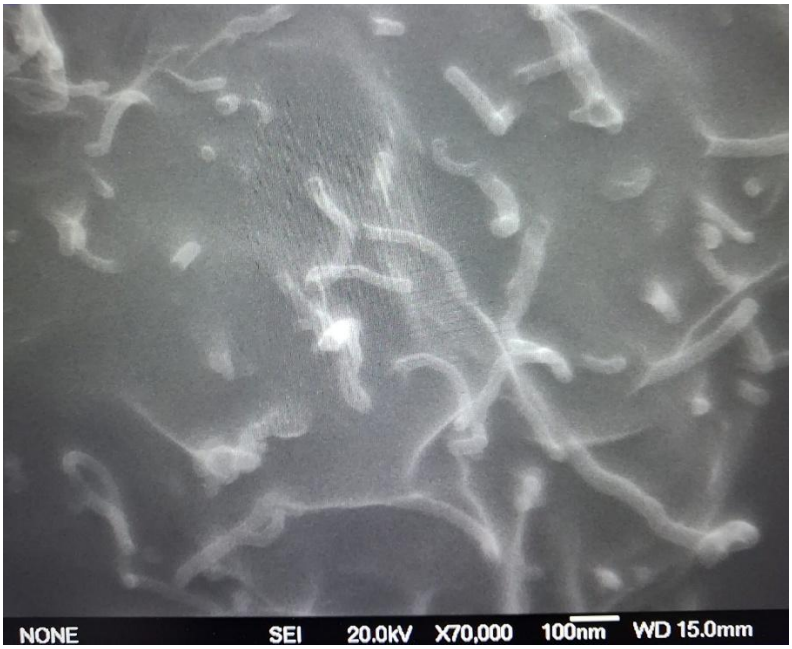


Ilustración 19 Imagen microscopía SEM de nanotubos de carbono con aumento x70.000

El estudio de caracterización mediante la microscopía Electrónica de Barrido (SEM), se ha llevado a cabo con el microscopio de alta resolución JEOL JSM-6335F y se ha centrado en el análisis morfológico, estructural y geométrico de los nanotubos de carbono (HGN-1) en estado puro.

Las imágenes obtenidas en el estudio SEM se caracterizan por una resolución de alta definición, esto ha permitido realizar un análisis morfológico de precisión a escala nanométrica. En las fotografías, se puede apreciar la estructura tubular (Ilustración 18-19) que da nombre a este tipo de nanopartícula. Dicha geometría permite mantener una estructura más organizada dentro de la dispersión. Gracias a estas imágenes, se ha podido determinar un diámetro exterior de entre 15 y 35 nm.

Entendiendo su estructura desde un punto mecánico, su estructura hueca permite adquirir una gran capacidad de resistencia mecánica gracias a su gran superficie exterior (Ilustración 19), permitiendo soportar presiones y esfuerzos sin fracturar ni dañar su estructura, esto permite mantener las superficies que deben lubricar separadas, protegiéndolas de un desgaste prematuro.

4.2 MICROSCOPÍA TEM

La estructura y la morfología se han estudiado mediante microscopía de transmisión (TEM), la cual nos permite analizar la geometría, tamaño y el grado de interacción entre ellas con una gran resolución. Este método complementario al método SEM, favorece el entendimiento completo del material.

Las Ilustraciones permiten realizar la caracterización del material definiendo su microestructura, lo cual resulta fundamental a la hora de analizar las dispersiones completas debido a la relación entre este análisis y la reología, así como la tribología.

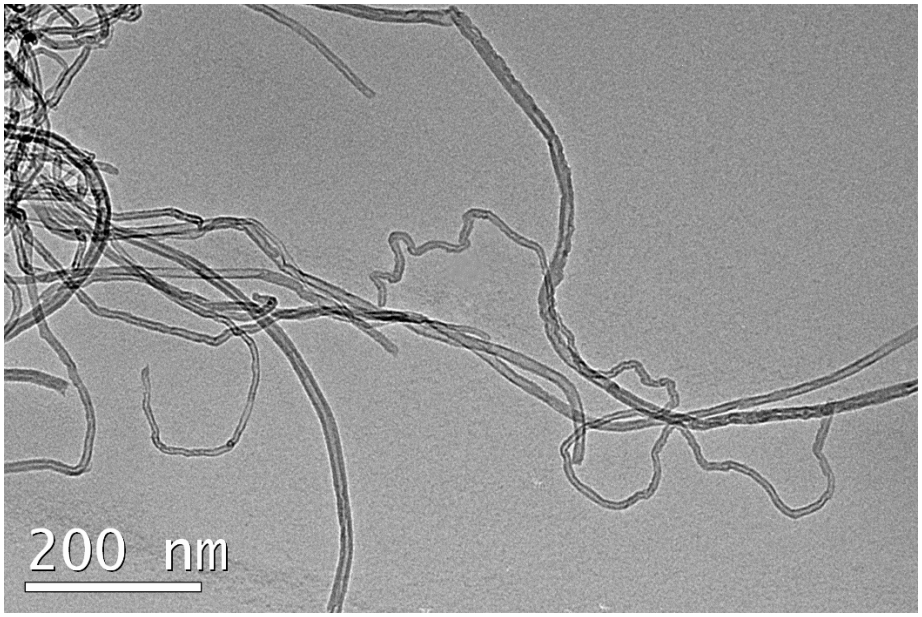


Ilustración 20 Imagen microscopía TEM de nanotubos de carbono a escala 200nm

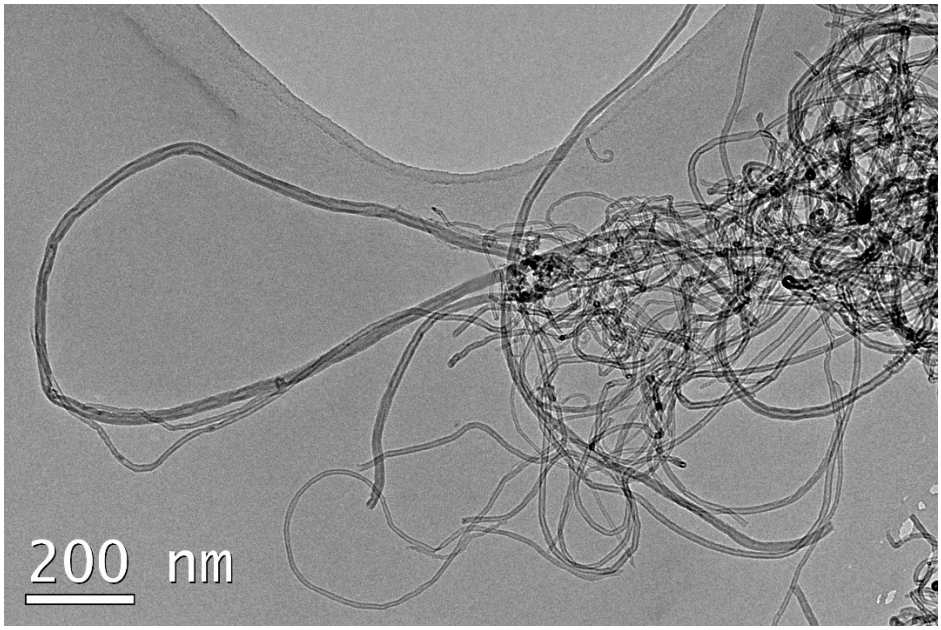


Ilustración 21 Imagen microscopía TEM de nanotubos de carbono a escala 200nm

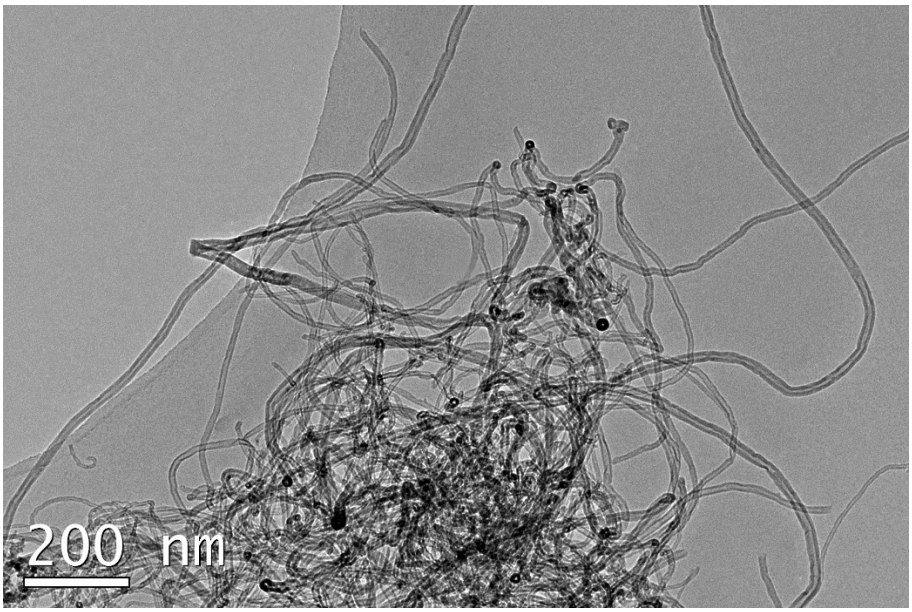


Ilustración 22 Imagen microscopía TEM de nanotubos de carbono a escala 200nm

El estudio de caracterización mediante la microscopía Electrónica de Transmisión (TEM), se ha llevado a cabo con el microscopio de alta resolución JEOL JEM-2100 y se ha centrado en el análisis morfológico, estructural y geométrico interno de los nanotubos de carbono (HGN-1) en estado puro.

Las imágenes obtenidas en el estudio TEM se caracterizan por una resolución de alta definición, esto ha permitido realizar un análisis morfológico de precisión a escala nanométrica. En las fotografías, se puede apreciar la estructura tubular interna, las paredes concéntricas tienen unas dimensiones de entre 8 y 12 nm y el canal hueco interior (Ilustración 19) se sitúa en un rango de entre 4 y 8nm, el cual da nombre a este tipo de nanopartícula. Dicha geometría y el alto grado de pureza estructural permiten mantener una estructura más organizada dentro de la dispersión.

En cuanto a la nanoestructura, se observa en las secciones transversales de los nanotubos una estructura de multipared concéntrica que tienen una disposición ordenada (Ilustración 20). Esta configuración de capas múltiples ofrece una gran inercia mecánica cuando se encuentra en compresión, ofreciendo una gran rigidez radial.

Las fotografías realizadas en el microscopio muestran la existencia de un túnel interno (Ilustración 21), rodeado por un espesor de pared uniforme. En cuanto a sus propiedades mecánicas, este tipo de arquitectura reduce la densidad del aditivo sin perjudicar su resistencia. Por otro lado, el estilo de pared que se muestra favorece la alineación de los nanotubos en la dirección del flujo, favoreciendo la lubricación en el ámbito reológico gracias a ese ordenamiento estructural.

4.3 GRÁFICAS REOLÓGICAS

El análisis de las propiedades reológicas de las dispersiones formadas a partir de los aceites lubricantes comerciales 5W30 y 20W50 permite realizar una discusión acerca del impacto reológico derivado de la adición de los nanotubos de carbono (HGN-1). La evaluación de las curvas de flujo se realiza mediante diferentes análisis comparativos como las curvas de flujo, las cuales enfrentan el esfuerzo cortante (medido en Pascales, Pa) y el gradiente de velocidad (medido en segundos^{-1}), o las curvas de viscosidad, que enfrentan la viscosidad dinámica (medida en milipascales multiplicado por segundo, mPa.s) frente al gradiente de velocidad (s-1).

Al estudiar el esfuerzo cortante en función del gradiente de velocidad, se expone la relación directa entre la fuerza interna por unidad de área que experimenta el fluido y la velocidad a la que es deformado por el reómetro. Este tipo de gráfica muestra la naturaleza de la dispersión a nivel reológico, permitiendo observar si se producen desviaciones de pendiente a medida que se acelera el cizallamiento. Una vez superponemos las dispersiones con los aceites puros se obtienen resultados claros para comprender las diferencias que aportan las nanopartículas añadidas.

Analizando la viscosidad dinámica en función del gradiente de velocidad, se muestra la resistencia interna del fluido a fluir frente al incremento continuo de la tasa de deformación. A diferencia de la gráfica que explicábamos anteriormente, este análisis permite evaluar la estabilidad de la película lubricante bajo condiciones variables. Este tipo de gráfica permite observar si el comportamiento se mantiene lineal, fluido newtoniano o si se producen desviaciones en la pendiente, fluido no newtoniano. Al igual que en el anterior caso, al superponer las dispersiones con los aceites puros se obtienen las diferencias que aportan las nanopartículas, permitiendo analizar la variación en los comportamientos de una forma sencilla.

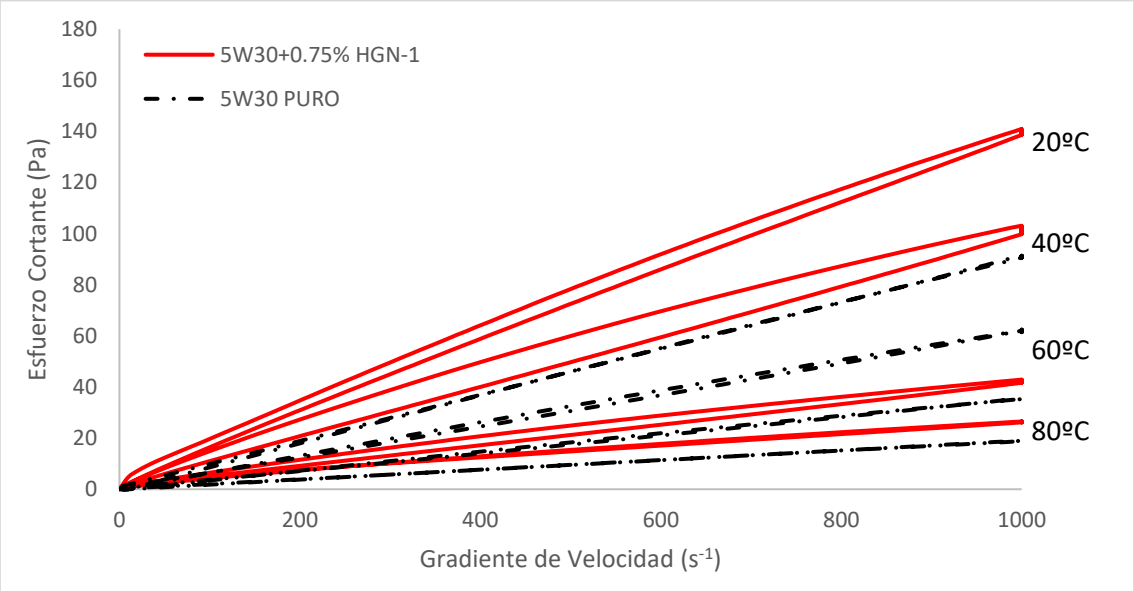


Ilustración 23 Esfuerzo cortante frente a Gradiente de velocidad en muestra 5W30 con 0.75% HGN-1 de 20ºC a 80ºC

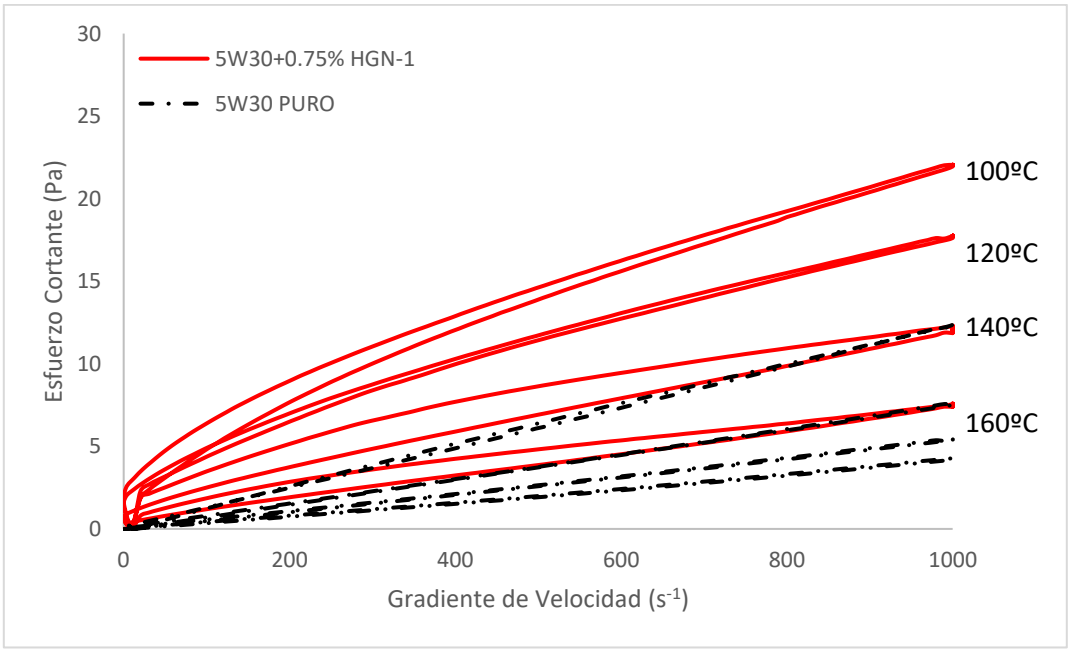


Ilustración 24 Esfuerzo cortante frente a Gradiente de velocidad en muestra 5W30 con 0.75% HGN-1 de 100ºC a 160ºC

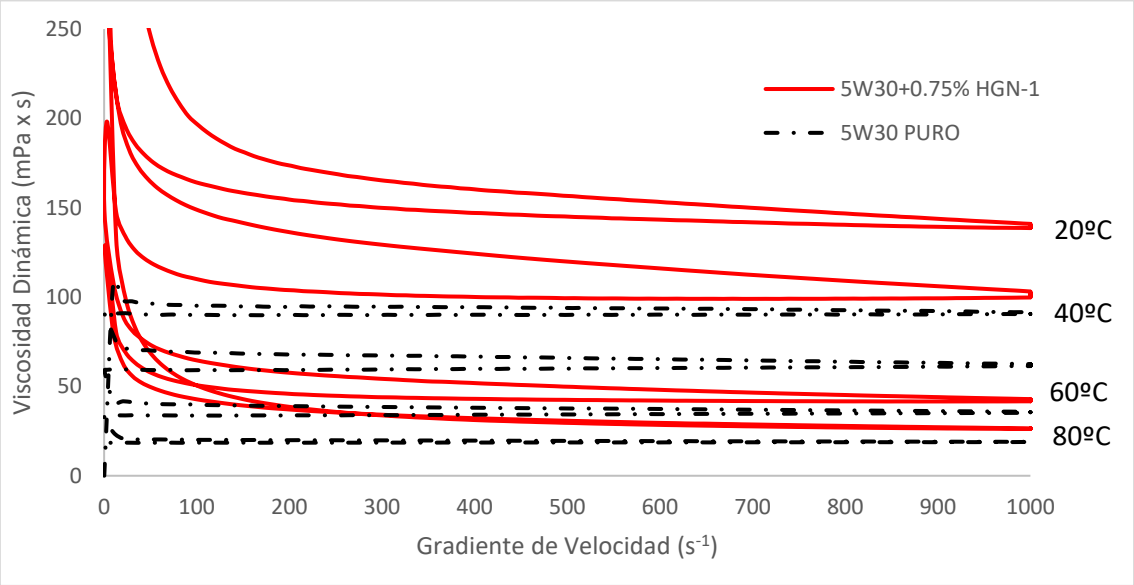


Ilustración 25Viscosidad dinámica frente a Gradiente de velocidad en muestra 5W30 con 0.75% HGN-1 de 20ºC a 80ºC

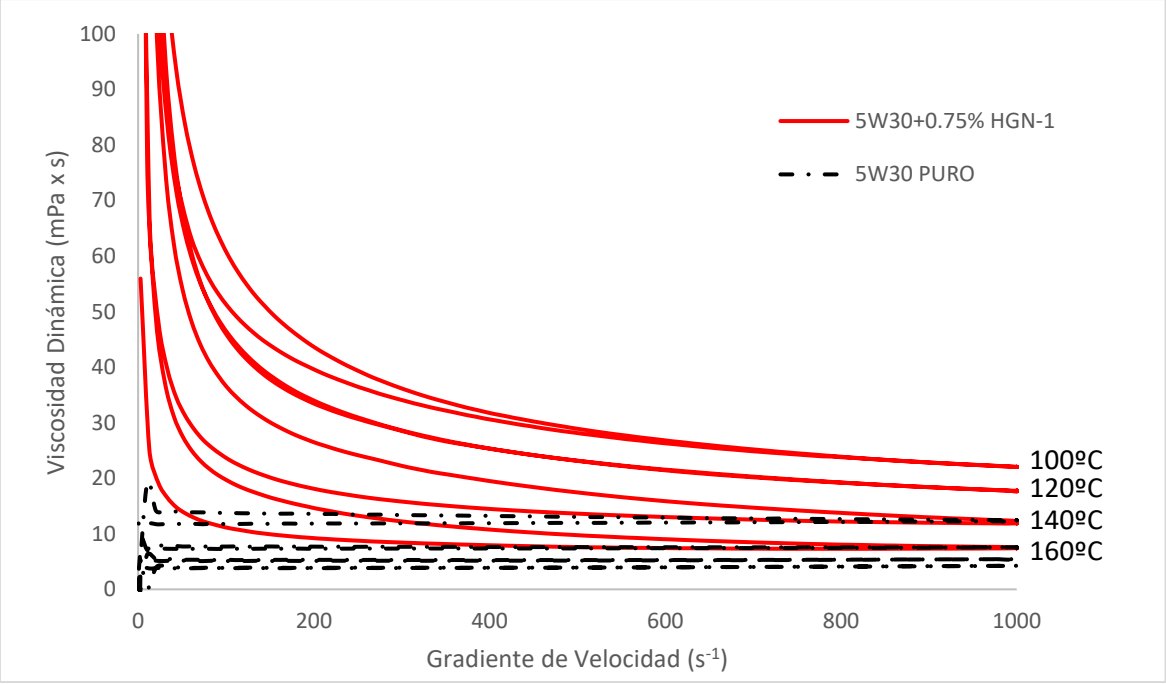


Ilustración 26 Viscosidad dinámica frente a Gradiente de velocidad en muestra 5W30 con 0.75% HGN-1 de 100ºC a 160ºC

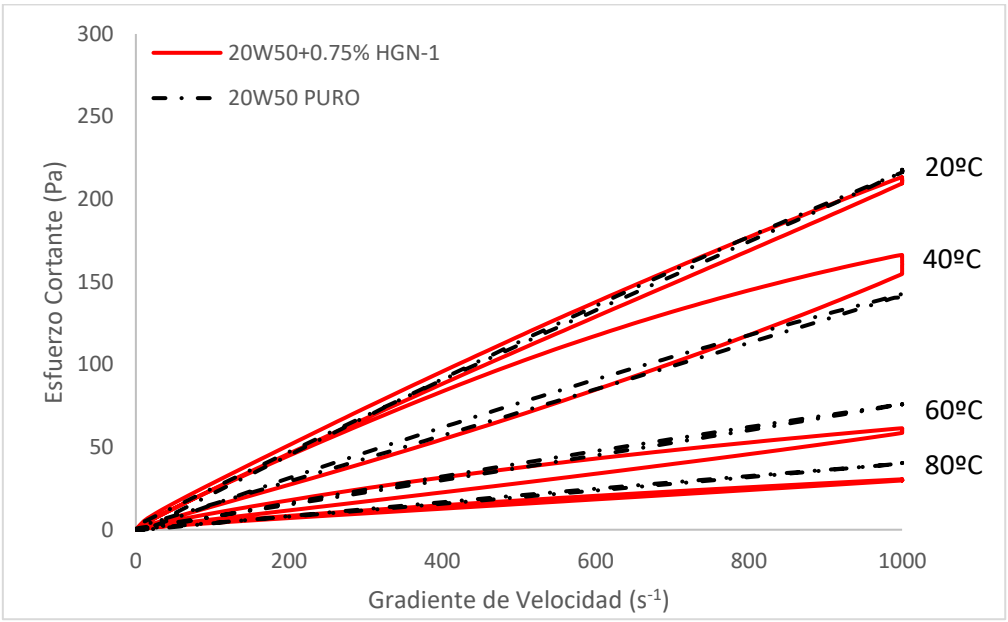


Ilustración 27 Esfuerzo cortante frente a Gradiente de velocidad en muestra 20W50 con 0.75% HGN-1 de 20ºC a 80ºC

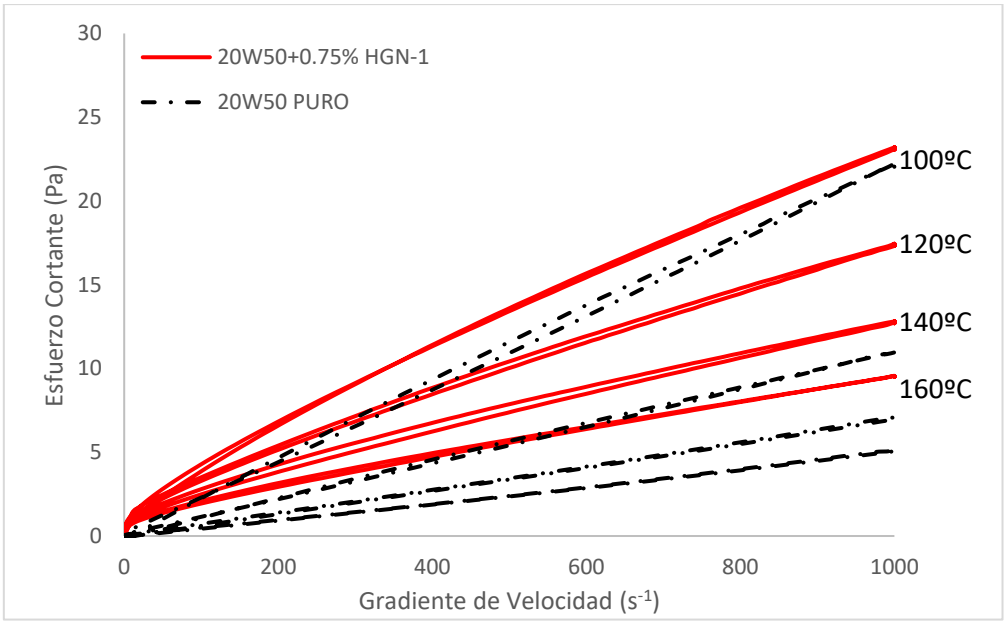


Ilustración 28 Esfuerzo cortante frente a Gradiente de velocidad en muestra 20W50 con 0.75% HGN-1 de 100ºC a 160ºC

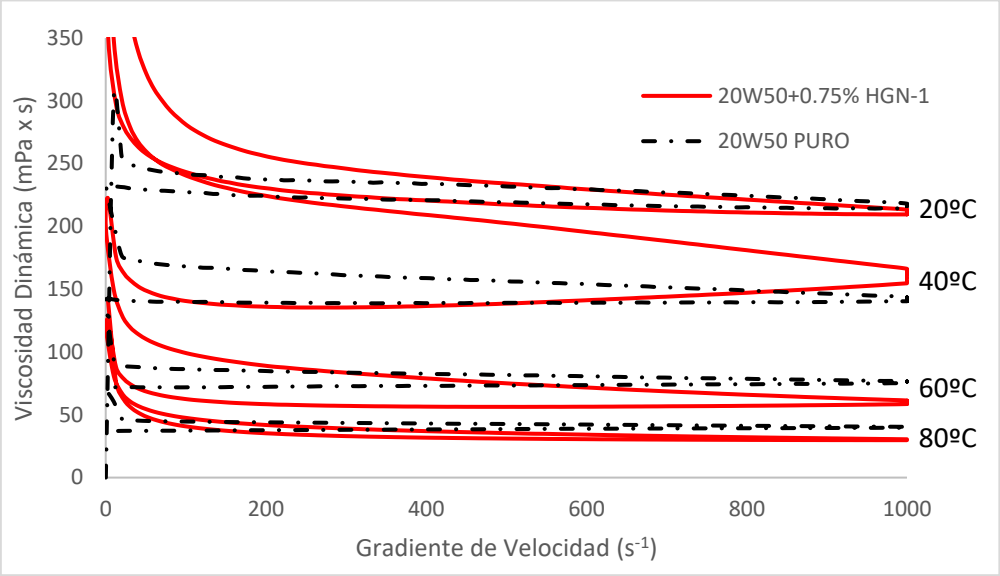


Ilustración 29 Viscosidad dinámica frente a Gradiente de velocidad en muestra 20W50 con 0.75% HGN-1 de 20ºC a 80ºC

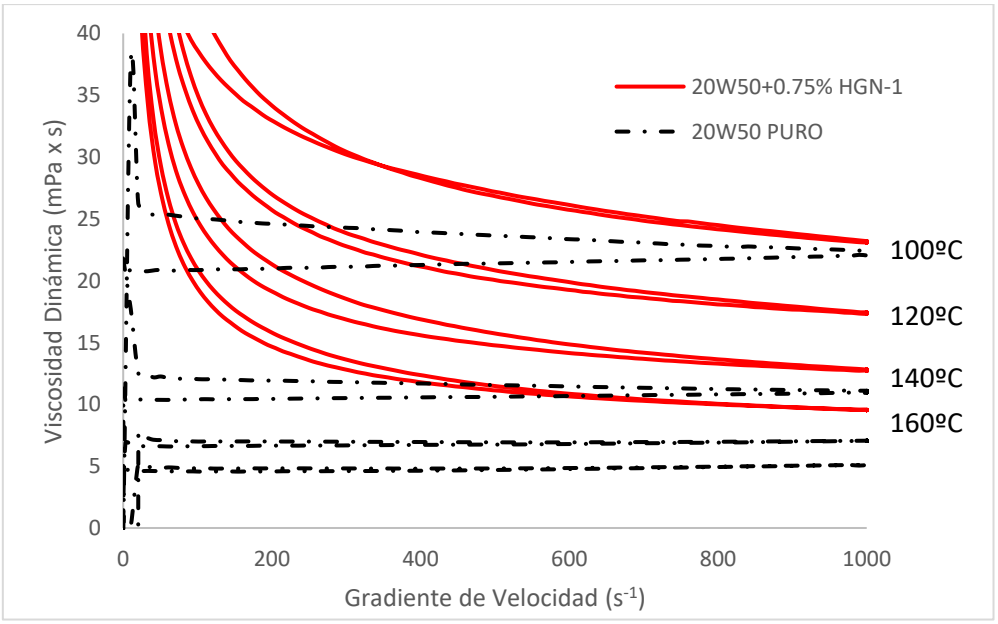


Ilustración 30 Viscosidad dinámica frente a Gradiente de velocidad en muestra 20W50 con 0.75% HGN-1 de 100ºC a 160ºC

El análisis del comportamiento reológico de las dispersiones permite establecer las conclusiones reológicas de este proyecto, aportando una gran validez científica a la viabilidad del uso de los nanotubos de carbono en los aceites lubricantes para su posterior comercialización.

La primera conclusión que podemos sacar de las gráficas anteriores es la alteración de la naturaleza reológica de los aceites base. Mientras que los aceites comerciales puros 5W30 y 20W50 muestran un comportamiento newtoniano, totalmente independiente de las condiciones de cizallamiento. Las dispersiones aditivas experimentan una variación completa en la reología, mostrando un comportamiento que se atribuye a un fluido no newtoniano, más concretamente un pseudoplástico en las zonas de gradiente menor.

En el caso del segundo tipo de gráfica, muestra la viscosidad dinámica frente al gradiente de velocidad. En el caso de los aceites puros, la viscosidad permanece constante e independiente de la tasa de deformación, mientras que las dispersiones que utilizan los nanotubos de carbono (HGN-1) muestran una caída progresiva a medida que incrementa el gradiente de velocidad.

La razón física que justifica el carácter no newtoniano, pseudoplástico, se basa en la morfología de los nanotubos de carbono, los cuales se encuentran orientados de forma aleatoria en reposo o tasas de cizallamiento bajas, mientras que conforme aumentan, el movimiento y las fuerzas hidrodinámicas hacen que se formen redes de nanotubos que construyen estructuras en las direcciones de las líneas de flujo. Este ordenamiento provoca una reducción del rozamiento interno, provocando la disminución del esfuerzo cortante y, por ende, la reducción de la viscosidad total de las dispersiones.

4.4 VISCOSIDAD CINEMATICA

El análisis de viscosidad es un ámbito necesario para poder obtener un resultado coherente y completo. Para ello realizaremos una comparativa de los datos obtenidos con la viscosidad cinemática (cSt), extraídos de los datos obtenidos en las pruebas realizadas en el reómetro. Para obtener un estudio coherente, debemos tomar un dato en el que la viscosidad se haya estabilizado, es por ello por lo que tomaremos los datos de viscosidad a gradiente de velocidad de 500 s^{-1}, para después enfrentarlo en función de la temperatura y así poder realizar las comparaciones de viscosidad con las diferentes concentraciones y el aceite puro.

Los resultados esperados son curvas descendentes conforme aumenta la temperatura, además de una disminución de la viscosidad a medida que la concentración de nanomaterial es menos, siendo el aceite puro el fluido con menor viscosidad.

Las temperaturas, al igual que en el análisis de viscosidad dinámica y esfuerzo cortante, se encuentra en un rango de temperatura de entre 20ºC y 160ºC, dividido en intervalos de 20ºC en todas las muestras. Las gráficas no muestran una progresión constante, sino que muestran los diferentes datos en cada uno de los puntos límite de cada intervalo, esto se debe al análisis realizado, ya que no se estudia el análisis constante durante el aumento de temperatura, sino que se analiza en dichos límites de intervalo.

Tabla 3 Valores de viscosidad cinemática (cSt) de aceite 5W30 a las diferentes concentraciones y temperaturas estudiadas.

Temperaturas	5W30 PURO	5W30+0,25% HGN-1	5W30+0,5% HGN-1	5W30+0,75% HGN-1
20	110,56	115,93	111,57	132,79
40	77,53	82,53	82,91	94,21
60	44,31	42,62	46,01	53,13
80	22,94	22,09	25,3	35,81
100	15,31	13,64	16,24	21,65
120	8,94	8,23	10,78	13,18
140	6,2	6,34	7,41	9,31
160	4,61	4,59	5,15	7,8

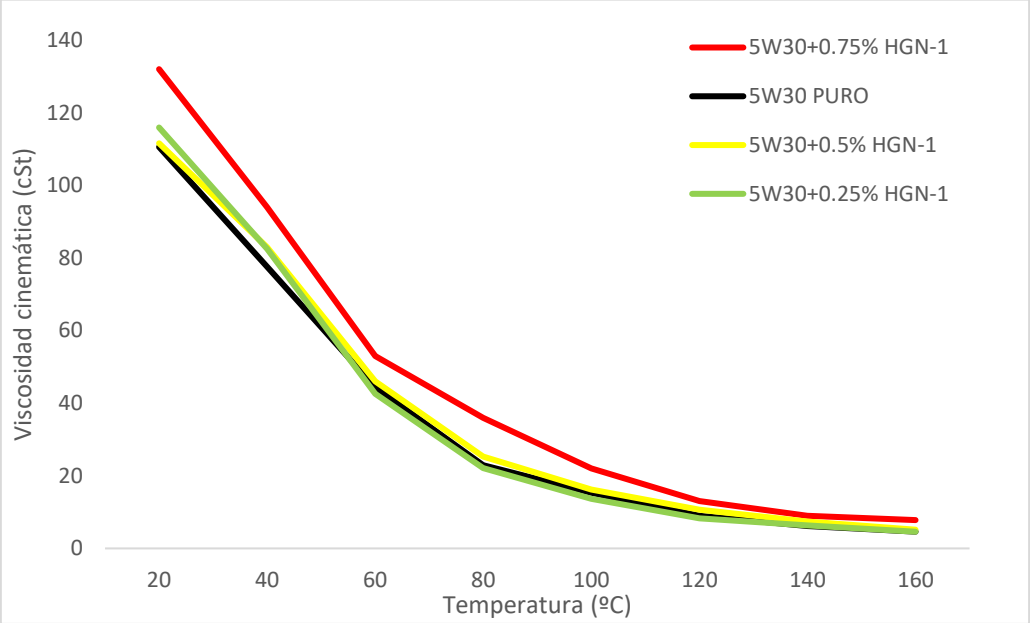


Ilustración 31 Gráfica viscosidad cinemática frente a Temperatura en dispersiones 5W30 con concentraciones 0%, 0.25%, 0.5%, 0.75%

Tabla 4 Datos viscosidad cinemática (cSt) de aceite 20W50 en las diferentes concentraciones y temperaturas

Temperaturas	20W50 PURO	20W50+0,25% HGN-1	20W50+0,5% HGN-1	20W50+0,75% HGN-1
20	264,17	269,66	281,45	293,23
40	177,84	192,31	205,36	215,56
60	93,34	111,24	120,23	136,48
80	48,68	58,14	71,17	84,35
100	26,82	35,97	39,88	56,64
120	13,11	21,85	20,94	38,12
140	9,87	10,12	11,82	21,01
160	8,11	8,09	8,06	16,38

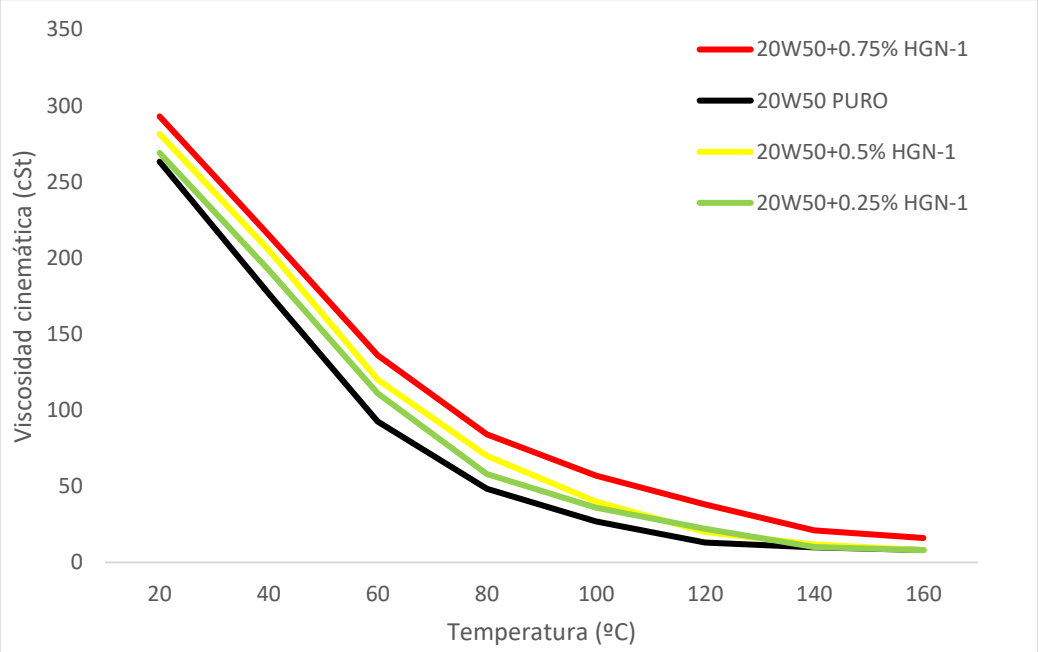


Ilustración 32 Gráfica viscosidad cinemática frente a Temperatura en dispersiones 20W50 con concentraciones 0%, 0.25%, 0.5%, 0.75%

Los perfiles obtenidos en el rango de temperatura de 20ºC a 160ºC permiten evaluar la respuesta real de los nanofluidos y establecer cuál es el impacto preciso de los nanotubos de carbono sobre ambos aceites base. En primer lugar, los datos experimentales muestran un comportamiento muy similar en cuanto a las tendencias en ambos aceites, donde las curvas muestran una progresión muy similar. El análisis comparativo muestra que el incremento de la viscosidad se encuentra directamente relacionado con la cantidad de aditivo incluida en la muestra.

Un aspecto a tener en cuenta sobre las gráficas es la disminución de la viscosidad conforme aumenta la temperatura. En los casos en los que la temperatura se encuentra cercana a la temperatura de trabajo (90ºC), la separación entre las diferentes curvas es máxima, lo que indica un aspecto favorable para la investigación, haciendo que el nanofluido mantenga una mayor viscosidad en condiciones de trabajo.

4.5 CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES Y MUESTRAS

Una fase crucial para comprender y analizar la naturaleza de los nanofluidos creados en este proyecto se trata de la caracterización estructural de los materiales y las diferentes muestras. Para llevar a cabo esta caracterización, se ha utilizado el método de Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR), esta técnica se basa en la interacción de radiación infrarroja con el material medido. Para convertir los datos obtenidos, se utiliza un algoritmo matemático, integrado directamente en el equipo empleado y permite convertir los datos crudos de absorción en un espectro óptico definido.

En esta parte de la investigación se analizarán y compararán mediante FTIR los diferentes materiales empleados, los aceites lubricantes comerciales 5W30 y 20W50 utilizados como base, los nanotubos de carbono (HGN-1) utilizados como aditivos y, finalmente, las muestras generadas con las diferentes concentraciones, siendo estas muestras el propósito fundamental de análisis del presente proyecto.

La intención de emplear esta metodología es establecer una comparación de las diferentes caracterizaciones, obteniendo resultados comparativos que permiten analizar las bandas de absorción, identificar los diferentes grupos funcionales, analizar si se crean enlaces químicos tanto deseados como no deseados y determinar la degradación estructural y su respectiva oxidación.

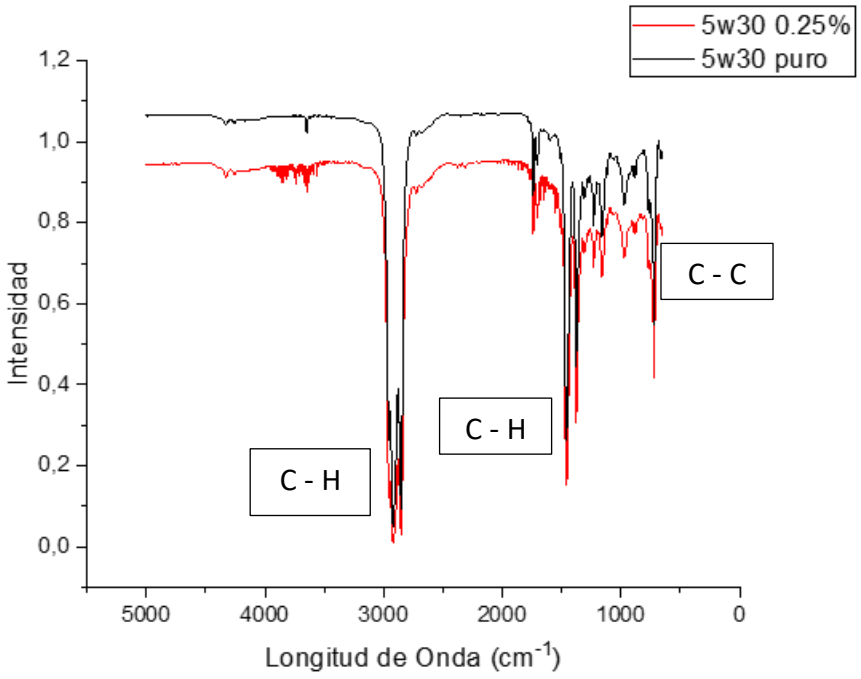


Ilustración 33 Espectro de muestra 5W30+0.25% HGN-1 y 5W30 PURO Intensidad vs Longitud de Onda

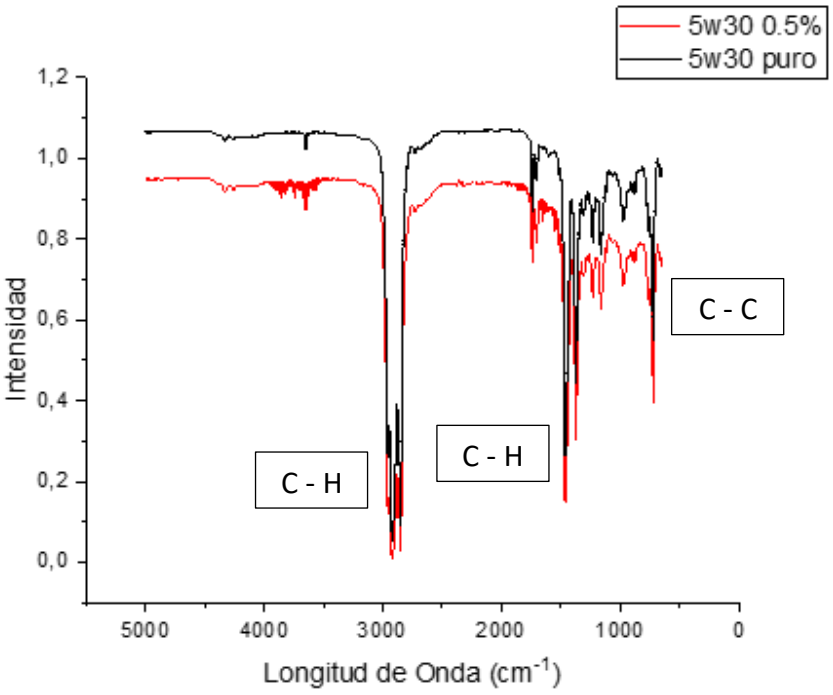


Ilustración 34 Espectro de muestra 5W30+0.5% HGN-1 y 5W30 PURO Intensidad vs Longitud de Onda

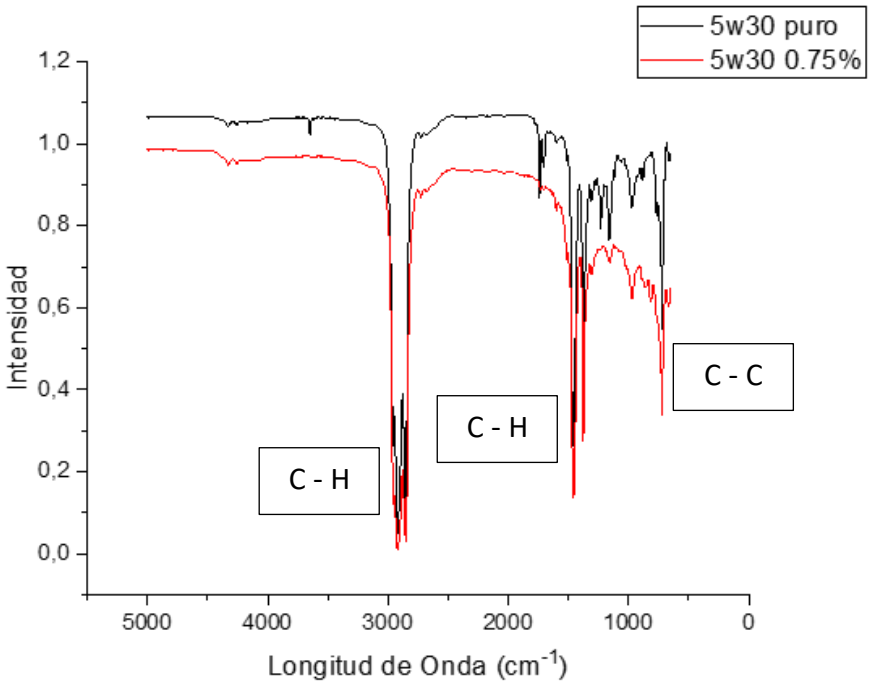


Ilustración 35 Espectro de muestra 5W30+0.75% HGN-1 y 5W30 PURO Intensidad vs Longitud de Onda

Los análisis comparativos mostrados anteriormente que muestran los resultados FTIR de las muestras obtenidos del aceite base 5W30 y sus respectivas dispersiones, formadas por nanotubos de carbono (HGN-1) en concentraciones 0.25%, 0.5% y 0.75% permite extraer conclusiones sobre la estructura de las moléculas existentes.

El resultado más evidente al superponer las curvas espectrales es la similitud entre las dispersiones y el aceite base, esto se debe a las bajas concentraciones utilizadas durante nuestro análisis. Los gráficos muestran una morfología, número de bandas de absorción y picos característicos muy similares. Descartando así la aparición de nuevas señales espectrales en las muestras, así como tampoco la desaparición de los picos originales de los aceites base, aunque modificando en algunos casos su amplitud. Con respecto a los picos moleculares, destacan dos máximos de absorbancia ubicados en la región de alta energía comprendida entre las longitudes de onda 2850 y 2950 cm^{-1}, este tipo de señales se definen por enlaces de carbono-hidrógeno (C – H), los cuales forman la estructura principal del aceite 5W30. Dicha caracterización orgánica se complementa en la zona media de longitud de onda, más concretamente en las bandas localizadas entre los 1370 y 1460 cm^{-1}, estas bandas corresponden a los mismos enlaces (C – H), confirmando así la naturaleza molecular característica de este tipo de aceites.

Por otra parte, la caracterización espectral, observa que conforme se incrementa el porcentaje de concentración de las dispersiones, pone de manifiesto la inercia infrarroja de las estructuras de carbono. La simetría atómica de los enlaces carbono-carbono (C = C), ofrece situación en la cual no se crean bandas de absorción determinantes, verificando la pureza de los aditivos utilizados, y confirmando la ausencia de grupos funcionales oxidados en la superficie, los cuales alterarían el espectro con bandas anchas en la región de 3400 cm^{-1} de longitud de onda, también asociados a picos agudos en la zona de 1700 cm^{-1}. La última zona determinante de la caracterización de estos nanofluidos es la ventana de los 1700 y 1740 cm^{-1}, la cual es un indicador del grupo carboxílico (C = O), determinando una zona de degradación u oxidación prematura de los aceites ocasionados por el calor generado durante el proceso de ultrasonidos, ya que esta prueba se ha llevado a cabo únicamente a temperatura ambiente.

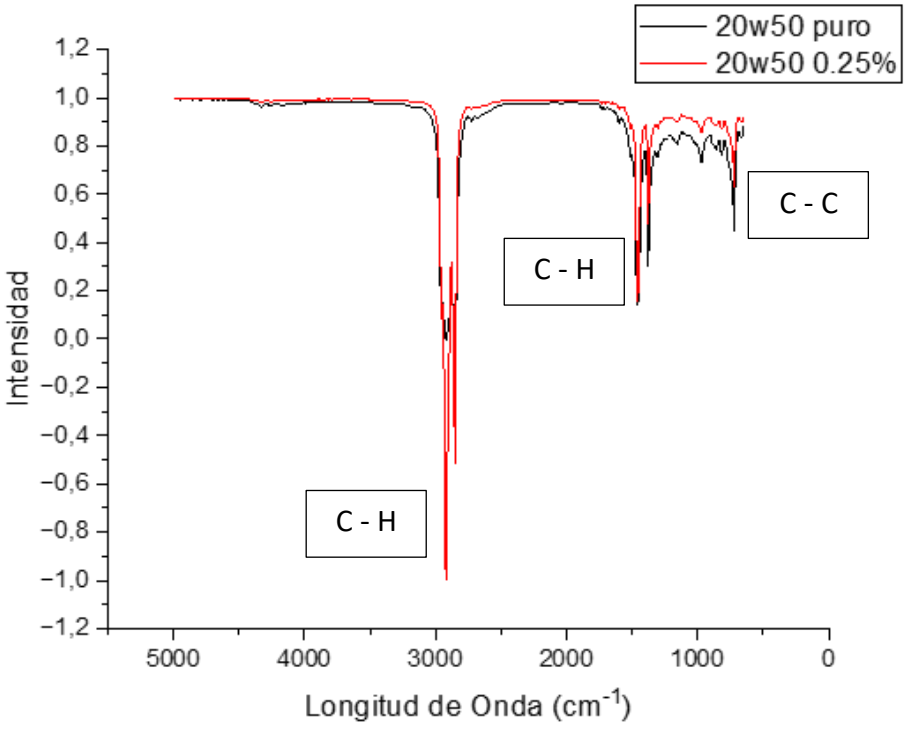


Ilustración 36 Espectro de muestra 20W50+0.25% HGN-1 y 5W30 PURO Intensidad vs Longitud de Onda

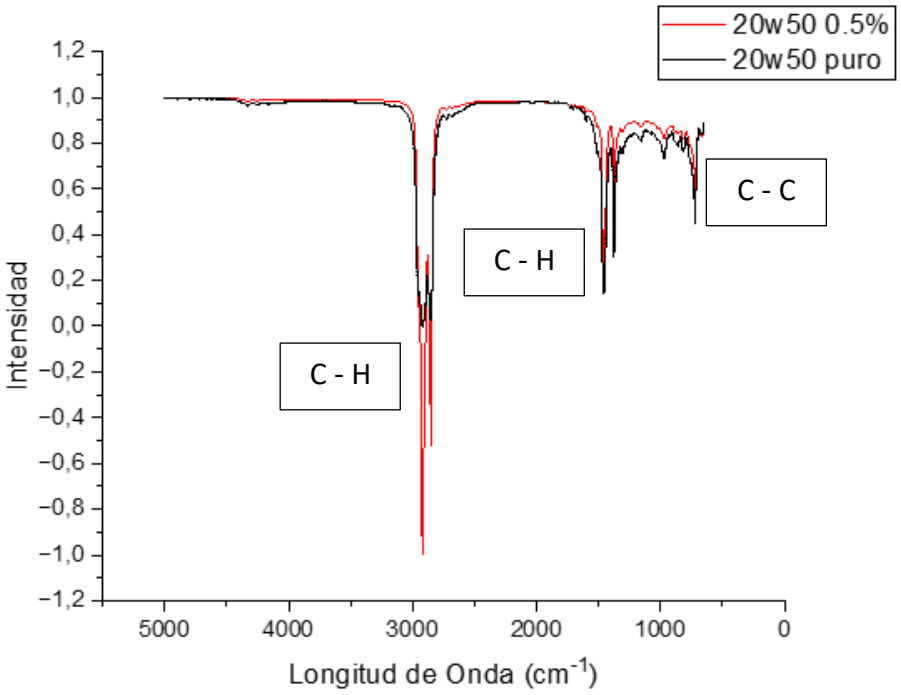


Ilustración 37 Espectro de muestra 20W50+0.5% HGN-1 y 5W30 PURO Intensidad vs Longitud de Onda

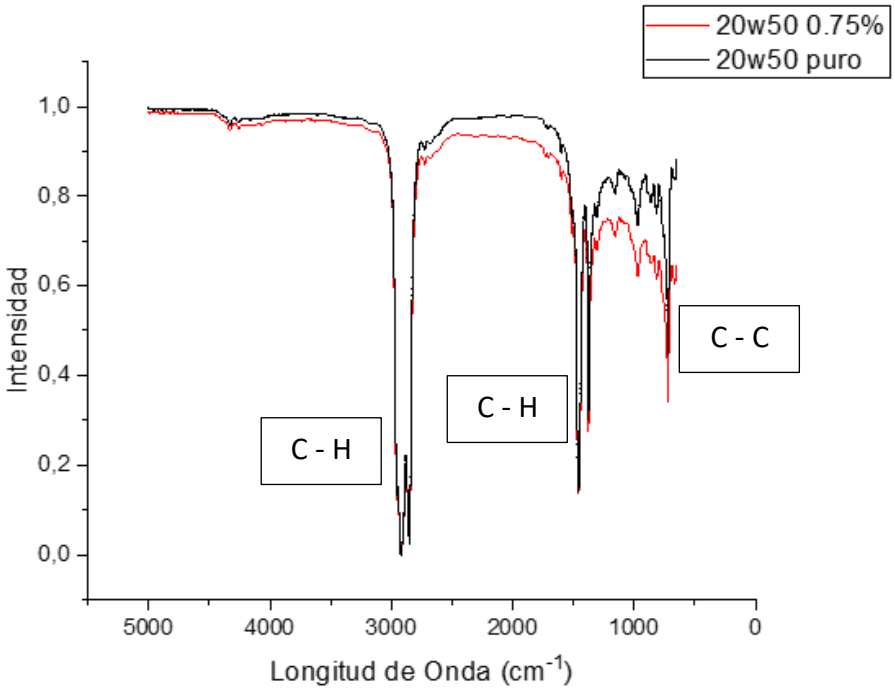


Ilustración 38 Espectro de muestra 20W50+0.75% HGN-1 y 5W30 PURO Intensidad vs Longitud de Onda

Al igual que el estudio comparativo realizado para las dispersiones desarrolladas con el aceite lubricante 5W30, en este caso utilizaremos la misma metodología para los nanofluidos generados con aceite 20W50 y concentraciones iguales, 0.25%, 0.5% y 0.75% de nanotubos de carbono, permitiendo obtener conclusiones sobre la estructura interna de estos nanofluidos.

Los espectros del sistema 20W50 vuelven a manifestar picos de gran intensidad en la región de los 2850 y 2950 cm^{-1}, asociados a enlaces carbono-hidrógeno (C – H). No obstante, al comparar estas señales con las obtenidas en las muestras de 5W30, se observa una definición y estabilidad en la banda de balanceo molecular, situada en los 720 cm^{-1}, Esta diferencia determina una cadena de enlaces más larga y compleja, coincidiendo con las propiedades reológicas asociadas a este aceite.

Las gráficas correspondientes a las diferentes concentraciones de nanotubos de carbono en base 20W50 confirman la pureza estructural de los nanotubos de carbono. El hecho de que el incremento de aditivo no distorsione el espectro, excluyendo los picos parásitos, confirma el correcto estado del nanomaterial. Como se comentaba en el análisis espectral del aceite 5W30, la señal ofrecida entre los 1700 y 1740 cm^{-1}, la cual hace referencia al grupo carbonilo (C = O), indicativo de degradación u oxidación se mantiene ausente al igual que en el anterior estudio, confirmando de esta manera la gran calidad de la muestra, la cual se ha mantenido sin sobrecalentamientos que deterioren y perjudiquen el análisis de las dispersiones.

Capítulo 5. ANÁLISIS ECONÓMICO

El desarrollo de los nuevos aceites lubricantes conlleva un desarrollo tanto experimental y técnico como un estudio de viabilidad económica, es decir, el coste que ha de adoptarse para poder investigar el desarrollo de los nuevos compuestos. En este capítulo se presenta el análisis económico del proyecto, teniendo en cuenta costes como materias primas, sueldos, maquinaria y amortización.

5.1 COSTES DE MATERIAS PRIMAS

Las materias primas utilizadas para este proyecto se dividen en aceites base y los aditivos nanométricos. Los lubricantes utilizados son, como se mencionaba anteriormente, 5W30 y 20W50 los cuales han sido adquiridos a través de proveedores externos de las marcas "*Castrol*" y "*Andel*" respectivamente. Por otra parte, los nanotubos de carbono han sido proporcionados por la Universidad de Castilla-La Mancha (UCLM), institución con la cual se está desarrollando conjuntamente esta investigación.

Es importante destacar que los volúmenes de adquisición de estos materiales son superiores a las cantidades necesarias para realizar los ensayos. Es por ello que este análisis económico se ha adaptado a los volúmenes reales utilizados en el laboratorio, permitiendo mostrar de una forma precisa el coste del proyecto.

Para cada una de las muestras se han utilizado 20 mililitros, siendo necesarias hacer mediciones de tres suspensiones de cada uno de los aceites y, además, otra medición del aceite puro es por ello que el desglose de costes de los aceites quedaría de la siguiente forma:

Tabla 5 Coste aceites comerciales

TIPO DE ACEITE	VOLUMEN GARRAFA (Litros)	PRECIO GARRAFA (€)
20W50	5	16,84 (25)
5W30	5	46,17 (26)

Por otra parte, en lo que respecta a los nanotubos de carbono, su distribución como materia prima depende directamente del diseño de las muestras, gestionadas con los lubricantes seleccionados. Es por ello que la cantidad necesaria para cubrir todos los ensayos se encuentra detallada en el procedimiento experimental (CAPÍTULO 3) donde se ha ajustado la masa de nanopartículas en función del aceite base utilizado, por lo que el desglose de costes quedaría de la siguiente forma:

Tabla 6 Coste nanotubos de carbono (HGN-1)

NANOPARTÍCULA	MASA TOTAL ADQUIRIDA (Gramos)	PRECIO (€)
NANOTUBOS DE CARBONO	5	500

5.2 AMORTIZACIÓN DE EQUIPOS

Para la ejecución de este proyecto se ha empleado una amplia gama de equipos de diferentes procedencias. Con el fin de realizar un análisis económico exhaustivo, se han diferenciado los diferentes equipos en función del tipo de utilización que se ha hecho de ellos. Por un lado, se encuentran los equipos que son propiedad de la Universidad Europea, tales como el reómetro, el espectrómetro o el sonicador de punta, este tipo de equipos se ha establecido una amortización de cada uno de ellos para obtener el coste relacionado con el presente proyecto en función de las horas utilizadas, horas de uso efectivo anuales y su vida útil estimada. Dicho cálculo económico se expresa de la siguiente forma:

$$Amortización = \frac{Coste}{hora} \times Horas\ de\ uso$$

$$Amortización = \frac{Precio\ de\ compra}{Vida\ útil\ \times Horas\ de\ uso\ total} \times Horas\ de\ uso$$

Ecuación 6 Amortización económica de los equipos

Tabla 7 Coste de amortización de equipos

EQUIPO	VALOR DEL EQUIPO (€)	VIDA ESTIMADA (Años)	TIEMPO DE USO ANUAL (Horas)	USO DE PROYECTO (Horas)	COSTE/HORA	AMORTIZACIÓN (€)
REÓMETRO	50000	15	1300	70	2,56	179,49
ESPECTRÓMETRO	40000	15	700	20	3,81	76,19
SONICADOR DE PUNTA	7000	15	200	2	2,33	4,67
TOTAL						260,34

Es importante justificar la ausencia de diferentes equipos utilizados durante la parte experimental, tales como la báscula, el agitador magnético o el pequeño material, los cuales no están incluidos en el desglose previo, esto se debe a un coste de material bajo y a su uso intensivo de forma recurrente, provocando que su amortización en este proyecto sea despreciable. No obstante, otros equipos no son propiedad de la Universidad Europea, sin embargo, han sido necesarios y empleados en esta investigación, para ello se han alquilado en la Universidad Complutense de Madrid, donde el precio de alquiler es fijo para los equipos de barrido y transmisión, quedando de la siguiente manera:

Tabla 8 Coste de alquiler de equipos

EQUIPO	ALQUILER (€/hora)	HORAS	COSTE (€)
JSM 6335-F	180 (27)	2	360,00
JEM 2100 HT	192 (27)	2	384,00

5.3 COSTE DE OPERARIO

Uno de los costes más altos del presente estudio es la mano de obra, la cual está regulada por los organismos y convenios de trabajadores. Las tablas salariales en las que nos hemos basado son las del "*Convenio Colectivo General de la Industria Química*" (28). Dentro de este convenio, existen diferentes grupos de los que dependen las funciones y competencias que desarrolla cada uno de los operarios, en nuestro caso las tareas de investigación y caracterización se encuentran incluidos en el Grupo 6, dentro de él no solo se encuentran las tareas mencionadas, sino que se encuentran otro tipo de competencias como control de calidad, servicios científicos de asesoramiento y apoyo.

De acuerdo con las actualizaciones salariales vigentes para este grupo, el convenio establece un salario bruto mínimo anual de 30.548,60€ (29). Esto tomando como base la jornada laboral máxima anual establecida en este convenio y, que se encuentra estandarizada en la mayoría de ellos de 1.696 horas, es por ello por lo que el coste resultante por hora es de 18,01€/h. Cabe destacar que este es el salario mínimo a percibir por este tipo de actividades, además, este salario se va actualizando con el tiempo por lo que no es algo fijo.

Este coste es el que debemos aplicar para todas las funciones desarrolladas preparando muestras, dispersiones, realizando los ensayos y analizando resultados. Todo ello hace un total de 130 horas que se detallan de la siguiente forma:

Tabla 9 Coste de operario

OPERACIÓN	HORAS	COSTE/HORA	COSTE
PREPARACIÓN DE MUESTRAS	12	18,01	216,12
REÓMETRO	70	18,01	1260,70
ESPECTRÓMETRO	20	18,01	360,20
SEM	2	18,01	36,02
TEM	2	18,01	36,02
ANÁLISIS DE RESULTADOS	24	18,01	432,24
TOTAL	130		2341,30

5.4 PRESUPUESTO FINAL

Teniendo en cuenta los desgloses previos, el presupuesto de investigación final ha sido de 3407,91€ ajustado a los materiales utilizados y los precios fijados durante el presente año.

Tabla 10 Presupuesto final

DESGLOSE	COSTE (€)
ACEITES	63.01
NANOPARTÍCULAS	500
AMORTIZACIÓN DE EQUIPOS	260,34
ALQUILER DE EQUIPOS	744,00
MANO DE OBRA	2341,30
TOTAL	3908,65

Capítulo 6. ESTUDIO MEDIOAMBIENTAL

La evaluación de un nuevo desarrollo tecnológico como es nuestro caso conlleva un impacto sobre el medioambiente que debe ser estudiado. A lo largo de este capítulo se presentará el análisis medioambiental del proyecto, enfocado a determinar la huella de carbono asociada a los materiales empleados tanto los aceites lubricantes como las nanopartículas empleadas. Para poder realizar este estudio se han tenido en cuenta las síntesis de cada uno de estos materiales para poder analizar el proceso completo hasta llegar al producto final, las dispersiones.

Para poder cuantificar el impacto completo se ha utilizado el software SimaPro, el cual está especializado en este tipo de análisis, dentro del propio programa existen una gran cantidad de opciones de estudio, entre las cuales hemos elegido el método IPCC con un horizonte temporal a 20 años, perfecto para estudiar el calentamiento global provocado por la producción de nuestros materiales en el periodo definido de 20 años, por otro lado, el método ReCiPe, permite obtener un perfil ambiental diverso a través de las diferentes categorías utilizadas.

6.1 ANÁLISIS DE INVENTARIO

El punto de partida para el estudio medioambiental consiste en definir las cantidades y materiales empleados en esta investigación. Los datos obtenidos han sido obtenidos de los procesos de síntesis aportados en la literatura científica, la cual establece cuales son los reactivos y sus respectivas cantidades, necesarias para el desarrollo de los nanotubos de carbono, definidos en por la Universidad de Castilla-La Mancha.

Por otro lado, no ha sido necesaria la obtención de las síntesis de cada uno de los aceites utilizados, utilizando la información ya incluida en las bibliotecas del programa SimaPro, siendo ajustado en base a la densidad de cada uno de los aceites.

Cabe destacar que esta información sólo incorpora los aceites como esencia pura, excluyendo los diferentes tipos de aditivos que aportan las diferentes marcas comerciales y, las cuales no ofrecen dicha información para mantener su información aparte de sus competidores comerciales.

Síntesis Nanotubos de Carbono (CNT):

Tabla 11 Reactivos y cantidades sintetizados para obtener 5g de CNT

Reactivo	Cantidad (g)
$NiSiO_2$	0.28
H_2	0.13
C_2H_4	6.7
He	0.25
H_2O	570
HF	0.79

Aceites:

Tabla 12 Aceites y densidades utilizados

Aceite	Densidad (g/mL)
5W30	0.85
20W50	0.88

Cantidad empleada:

Tabla 13 Cantidad de materiales utilizados

Material	Cantidad
CNP	0.522 g
5W30	100 mL
20W50	100 mL

6.2 EVALUACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL

Para obtener los datos del estudio ambiental hemos utilizado el programa SimaPro, el cual nos aporta los datos necesarios para desarrollar esta evaluación. Los análisis utilizados, como se ha mencionado anteriormente, es el método IPCC, el cual nos permite conocer los kilogramos de CO_2 equivalente emitido durante la investigación para cada uno de los aceites con un 1.5% de CNT. Durante este estudio también se obtendrá una comparativa porcentual de los materiales sobre la huella de carbono. Esto nos permite analizar de una forma más específica los materiales más y menos contaminantes.

Tabla 14 Cantidad equivalente de CO2 con una dispersión de 1.5%

Muestra	Aceite Base	% CNT	Impacto (kg CO_2)	Impacto (%)
1	5W30	1.5	0.332	92
2	20W50	1.5	0.361	100

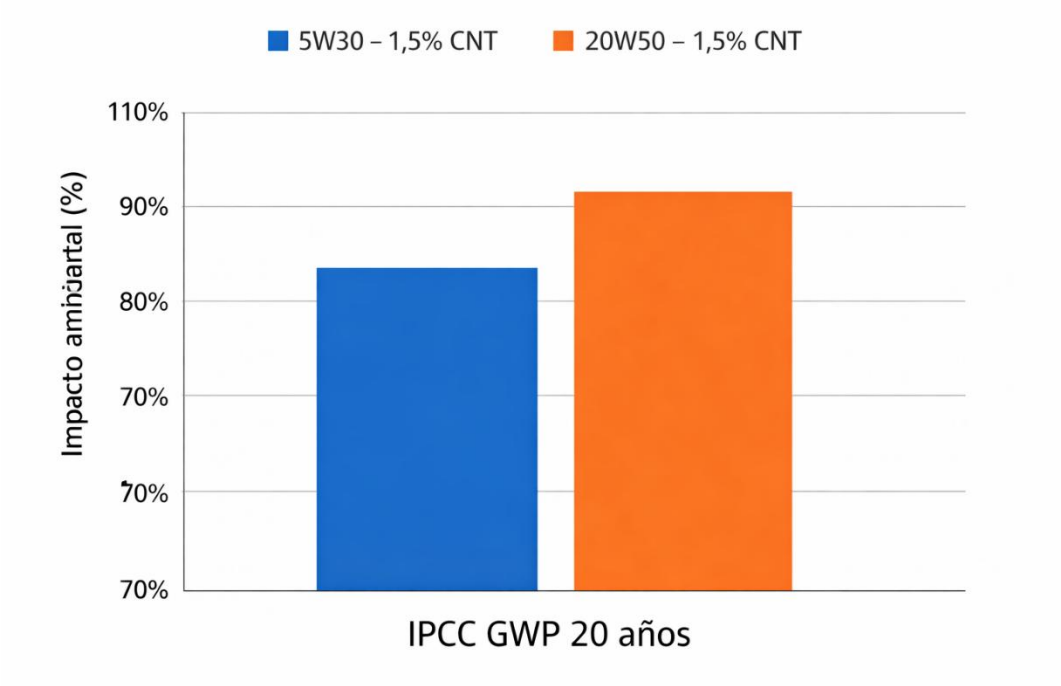


Ilustración 39 Comparación de CO_2 equivalente emitido por cada aceite con una dispersión de 1.5%

Como se puede observar tanto en la gráfica como en la tabla que se muestra anteriormente, en las mismas condiciones, el aceite 20W50 es más contaminante en comparación con el 5W30. Es cierto que existe cierta relación entre la densidad y la contaminación aportada, por lo que los resultados obtenidos confirman la teoría principal.

Tabla 15 Cantidad equivalente de CO2 de cada material

Categoría de impacto	Aceite 50W30 (Kg CO_2 equivalente)	Aceite 20W50 (Kg CO_2 equivalente)	CNT Nanotubos de carbono (Kg CO_2 equivalente)
IPCC GWP a 20 años	0.322	0.351	0.010

Tabla 16 Cantidad total de CO2

Categoría de impacto	Total
IPCC GWP a 20 años	0.683

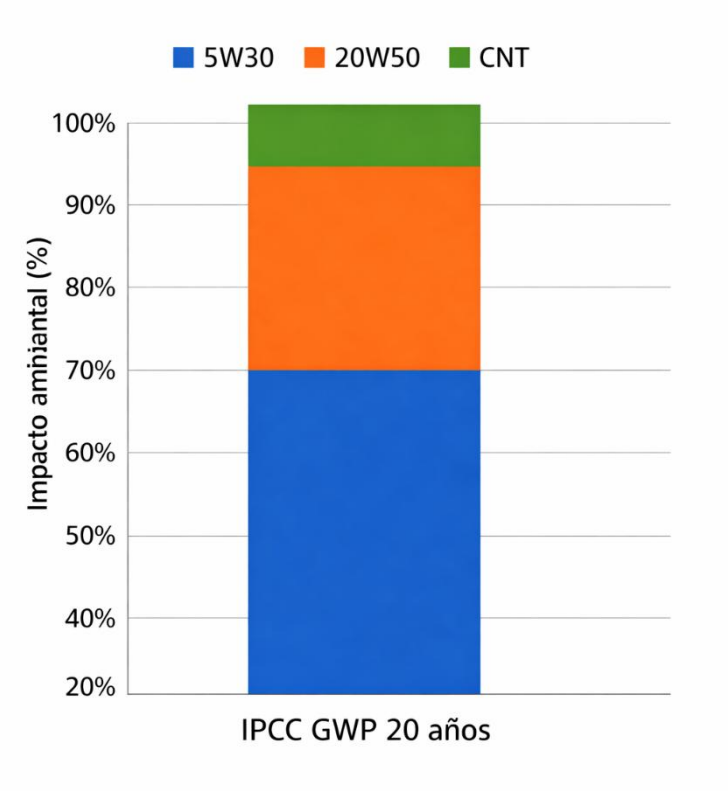


Ilustración 40 Gráfico porcentual de contaminación de cada material

La gráfica anterior muestra una comparativa a nivel porcentual acerca de la contaminación aportada por los diferentes materiales, más concretamente la huella de carbono emitida. En la gráfica se puede observar cómo los aceites tienen una emisión de CO_2 similar, esto se debe a que tienen una densidad muy similar y se ha utilizado la misma masa durante la investigación. Por otro lado, el porcentaje que ofrece los nanotubos de carbono (CNT) es mucho menor, esto no indica que sean menos contaminantes, sino que durante esta investigación su emisión de CO_2 ha sido mucho menor debido a una masa utilizada mucho menor en comparación con los aceites utilizados.

El siguiente método de análisis utilizado para este estudio es el ReCiPe, el cual se trata de una evaluación de la afectación a cada uno de los grupos principales del medioambiente, entre los cuales se encuentra la salud humana, el ecosistema y los recursos. Dentro de estos grandes grupos existen diferentes subcategorías necesarias para hacer una evaluación más exhaustiva. Ambos estudios se muestran en milipuntos (mPt), siendo esta medida la carga ambiental anual media de un ciudadano europeo, el cual emite 100 puntos anuales de media, por lo que esta comparación se utiliza para comprender la emisión causada en comparación con la equivalente a un ciudadano europeo medio.

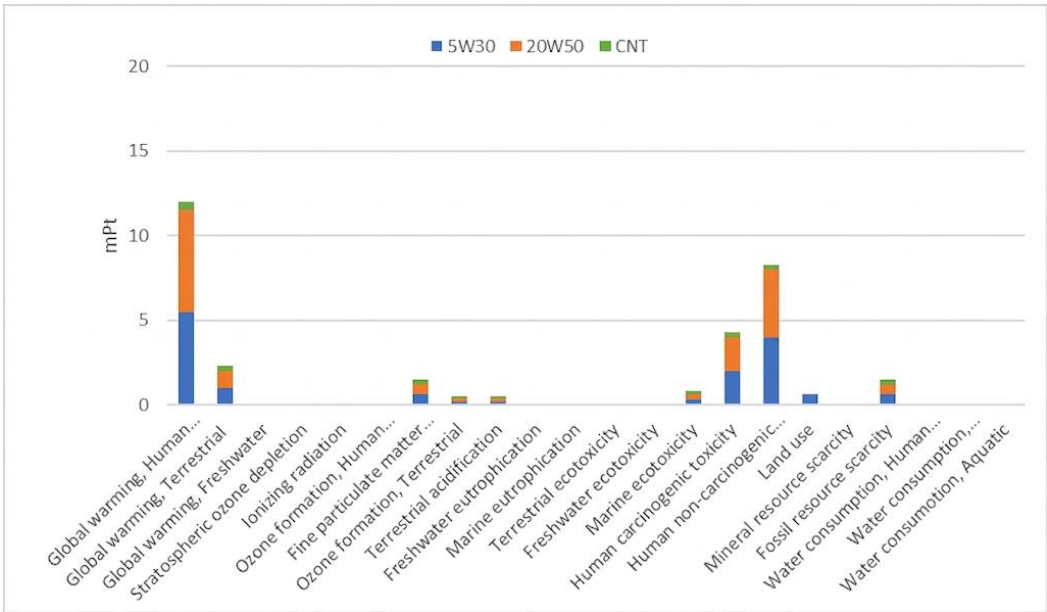


Ilustración 41 Carga ambiental en mPt en subcategorías de impacto

En la gráfica se puede observar gracias al análisis ReCiPe como las subcategorías mayormente afectadas son la salud humana por calentamiento global, con 12.5 mPt; la toxicidad humana no carcinogénica, con 8 mPt y la toxicidad humana carcinogénica, con 4.5 puntos. El estudio muestra como son los aceites la parte más contaminante debido a su masa empleada, mientras que las nanopartículas ocupan una parte despreciable dentro del estudio. Esto reafirma los datos obtenidos en el método anterior, los cuales ofrecen los mismos resultados. El resto de subcategorías no ofrecen una gran relevancia en este estudio por su baja puntuación.

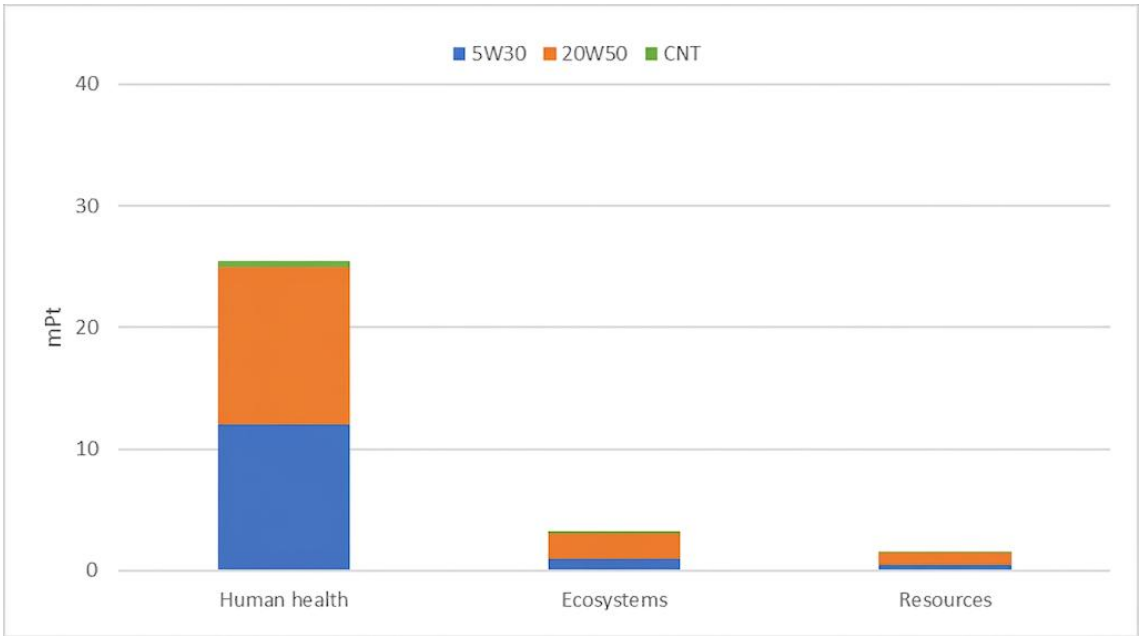


Ilustración 42 Carga ambiental en mPt en las categorías principales de impacto

La figura anterior muestra el análisis ReCiPe aplicado a las categorías principales de impacto en las cuales se agrupan las subcategorías previas. En la gráfica se observa como la mayor afectación del estudio es aplicado a la salud humana, llegando hasta los 36 mPt diferenciándolo de los ecosistemas y los recursos, los cuales se encuentran por debajo de 5mPt.

6.3 INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

Los resultados obtenidos acerca de la huella de carbono, gracias al método IPCC a 20 años muestra claramente como el aceite 20W50 es más contaminante respecto al aceite 5W30, aunque los valores en kilogramos de CO_2 son muy similares, esto hace que el impacto ambiental de ambos aceites sea prácticamente igual. Con respecto a los nanotubos de carbono, en este estudio se muestra que tiene una gran diferencia con respecto a los aceites debido a la masa empleada en esta investigación.

Si analizamos los resultados obtenidos con el método ReCiPe, se determina que la categoría principal que engloban los diferentes subgrupos, el principal componente afectado es el grupo que afecta a la salud humana. Aunque es cierto que el límite se encuentra muy alejado de ser realmente perjudicial, esto se debe a las pequeñas cantidades que se han utilizado tanto de aceites como de nanopartículas, esto hace que no suponga nunca un riesgo real para la salud humana.

Finalmente, dentro del método ReCiPe también se han analizado las diferentes subcategorías que más impacto reciben, entre las cuales se encuentran la salud humana por calentamiento global, la toxicidad humana no carcinogénica y la toxicidad humana carcinogénica. Gracias a este método, se pudo observar cómo los aceites son mucho más contaminantes en comparación con las nanopartículas analizadas (CNT), los datos obtenidos con este método muestran unos datos similares a los obtenidos con el método IPCC a 20 años.

6.4 COMPROMISO CON LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE (ODS)

El compromiso científico y tecnológico para alcanzar un desarrollo industrial más sostenible, eficiente y respetuoso con el medio ambiente. Esta investigación y desarrollo de los diferentes nanofluidos impacta directamente en el cumplimiento de varios ODS de la agenda 2030, destacando algunos aspectos como el objetivo 7, objetivo 9 y el objetivo 13 (30).

El objetivo número 7 abarca la energía asequible y no contaminante, el cual es uno de los mayores retos energéticos actuales es la pérdida de energía útil por fricción en sistemas mecánicos y de automoción ([31]). Este trabajo contribuye directamente a la eficiencia energética mediante el diseño de los diferentes nanofluidos para optimizar las propiedades reológicas y tribológicas de los aceites lubricantes convencionales. Gracias a la adición de los nanotubos de carbono (HGN-1) se logra una reducción del coeficiente de fricción de los motores de combustión interna, minimizando las pérdidas mecánicas consiguiendo un mejor rendimiento térmico y un menor consumo ([20]).

El objetivo relacionado con la industria, innovación e infraestructura destacada en el apartado 9 se encuentra presente en esta investigación al promover el desarrollo de nuevas tecnologías como la aplicación de la nanotecnología a los diferentes aceites lubricantes comerciales. El desarrollo de estas dispersiones permite la modernización de los transportes conocidos y las infraestructuras en las que se puede emplear, consiguiendo una mayor durabilidad y vida útil de los componentes mecánicos, reduciendo la necesidad de renovación de materiales y maquinarias y ayudando a un desarrollo sostenible favorable ([32]).

Finalmente, la acción por el clima destacada en el objetivo número 13 indican diferentes objetivos con respecto a la emisión de gases de efecto invernadero (GEI), en este aspecto los motores de combustión interna de los diferentes medios de transporte y maquinaria pesada son algunos de los elementos que más destacan estadísticamente a nivel global de emisiones ([33]). A través de la optimización del rendimiento de los motores se consigue un menor consumo de combustible, provocando una menor emisión de Dióxido de Carbono (CO_2) y otros gases contaminantes liberados a la atmósfera.

Capítulo 7. CONCLUSIONES, FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN Y POSIBLES APLICACIONES

7.1 CONCLUSIONES

Una vez finalizado los diferentes procesos de análisis y sus propios resultados, el proyecto queda pendiente de una validación global del estudio. Los resultados y descubrimientos obtenidos permiten reflejar la deducción obtenida en los diferentes ensayos. Teniendo en cuenta todos los capítulos anteriores, las conclusiones obtenidas sobre esta línea de investigación son las siguientes:

- El presente estudio demuestra que los nanofluidos analizados presentan una gran estabilidad estructural y térmica durante todo su rango operativo, siendo viable su introducción como producto industrial, aunque no sería conveniente debido a su aplicación.

- En cuanto al diseño de los diferentes nanofluidos se completó con éxito, el proceso de homogeneización desarrollado es óptimo para estas bajas concentraciones, aunque limitándose en ciertos aspectos para una masa de aditivo mayor.

- Las técnicas de microscopía SEM y TEM, confirmaron la morfología tubular y una microestructura interna compuesta de varias capas concéntricas, permitiendo extraer conclusiones como la alta rigidez que ofrecen debido a su alineamiento molecular, su facilidad para alinear la estructura en el sentido del flujo y su gran capacidad resistente en cuanto a corte se refiere.

- Los ensayos reológicos determinaron una modificación en el comportamiento reológico de los aceites comerciales puros. Las suspensiones preparadas de los diferentes aceites con nanopartículas muestran un comportamiento típico de un fluido no newtoniano, más concretamente un pseudoplástico.

- El estudio espectroscópico (FTIR) confirmó la estabilidad y la composición de la estructura generada en las muestras, destacando las interacciones entre las nanopartículas y los aceites base, observadas en las bandas de absorción (C – H) destacando la ausencia de oxidación y deterioro de las concentraciones (C = O).

- El desglose económico refleja el coste de cada una de las pruebas realizadas teniendo en cuenta amortizaciones, alquileres de equipos y el coste del operario, así como el coste de las materias utilizadas. Sumando todo el desglose de costes el valor final del proyecto es de 3407.91€.

- A través de los diferentes datos obtenidos en el software SimaPro utilizando los métodos IPCC y ReCiPe, se cuantificaron las diferentes emisiones asociadas al proyecto. El estudio determinó que la etapa de producción de los aceites representa el mayor impacto ambiental del proyecto debido a su volumen.

7.2 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

A partir de los resultados obtenidos y las conclusiones mostradas a lo largo de este proyecto, aparecen diferentes vías de investigación para profundizar en el análisis del comportamiento de los diferentes nanofluidos.

- Análisis de concentraciones en masa más elevadas: realizar dispersiones con cargas superiores al 2% para estudiar los diferentes puntos de saturación y cambios de comportamiento.

- Diseño de nanofluidos en aceites Low Ass (LA) y Ultra Low Ass (ULA): incorporación de nanotubos en aceites de bajo y ultra bajo contenido en cenizas para verificar su compatibilidad.

- Estudio de estabilidad temporal y envejecimiento: evaluación de la estabilidad y aglomeración de las muestras en periodos largos de reposo.

- Uso de aditivos tensioactivos y funcionalización molecular: incorporación de aditivos que favorezcan la dispersión y mejoren la fluidez en condiciones térmicas menores.

- Ensayos tribológicos y caracterización de desgaste: medición de calor y conductividad de las dispersiones.

7.3 POSIBLES APLICACIONES

El desarrollo de los nanofluidos compuestos por aceites lubricantes y nanotubos de carbono tiene un horizonte de aplicaciones muy diverso. El incremento de la eficiencia en motores de combustión interna es la aplicación más directa en el sector automovilístico. En los motores de combustión, una gran parte de la energía generada se pierde por las pérdidas por fricción entre diferentes conjuntos, el pistón-camisa, cojinetes, rodamientos y engranajes. La integración de nanotubos de carbono proporciona un refuerzo en las zonas de contacto entre superficies metálicas gracias a su mayor viscosidad cinemática, sobre todo en condiciones de temperaturas elevadas como las que se dan durante el funcionamiento óptimo de este tipo de motores. Teniendo como consecuencia directa un menor coeficiente de rozamiento y un menor desgaste de las diferentes piezas repercutiendo positivamente en la eficiencia del motor y su mantenimiento.

En el contexto de la transición hacia la automoción de propulsión eléctrica, este tipo de nanofluidos pueden tomar un papel determinante actuando como disipadores de calor para las altas temperaturas generadas en los diferentes componentes. Especialmente en baterías, condensadores y los diferentes componentes mecánicos mencionados anteriormente, los cuales permiten tener una refrigeración y lubricación mayor gracias a las nuevas fórmulas representadas.

Otra gran aplicación posible de los nuevos aceites lubricantes creados es la industria de la maquinaria pesada, donde los aceites alcanzan unas presiones de trabajo muy elevadas, haciendo que las diferentes superficies sean sometidas a cargas de compresión y cizallamiento extremas. La estructura que presentan estos aceites aporta una rigidez mecánica excepcional ante esfuerzos de compresión. Este comportamiento previene fenómenos como las roturas por fatiga, sobrecalentamiento y, desde un punto de vista ecológico dificulta la evacuación del aceite, esto se debe a la mayor densidad del aceite, provocando que las pérdidas hidráulicas disminuyan, manteniendo las zonas de trabajo limpias y reduciendo el impacto que puede provocar este vertido al medio ambiente.

BIBLIOGRAFÍA

1. Duan, L., Li, J., & Duan, H. (2023). Nanomaterials for lubricating oil application: A review. *Friction*, 11(5), 647-684.

2. Korkmaz, M. E., & Gupta, M. K. (2024). Nano lubricants in machining and tribology applications: A state of the art review on challenges and future trend. *Journal of Molecular Liquids*, 407, 125261.

3. Rahman, M. A., Hasnain, S. M. M., Pandey, S., Tapalova, A., Akylbekov, N., & Zairov, R. (2024). Review on Nanofluids: Preparation, Properties, Stability, and Thermal Performance Augmentation in Heat Transfer Applications. *ACS Omega*, 9(31), 32328-32349.

4. Bakak, A., Ahmadi, S., & Shokrollahi, A. (2021). Viscosity and Rheological Properties of Graphene Nanopowders Nanofluid: An Experimental Study. *Entropy*, 23(8), 979.

5. Bian, Y., Ilyas, S. U., Ahmed, A., & Abdulrahman, A. (2021). Investigating the rheological properties of oil-based nanofluids: A review. *Journal of Physics: Conference Series*, 1901(1), 012013.

6. Mei, X., Liang, G., & Zhang, J. (2022). Research on the Rheological Behavior and Stability of Graphene Oxide Nanofluids. *Applied Sciences*, 12(11), 5489.

7. Harish, S., Ishikawa, K., Einarsson, E., Aikawa, S., Chiashi, S., Shiomi, J., & Maruyama, S. (2012). Enhanced Thermal Conductivity of Ethylene Glycol with Single-Walled Carbon Nanotube Inclusions. *Materials Express*, 2(3), 213-223.

8. Zhu, Y., et al. (2024). Recent advances in the synthesis and applications of functionalized nanomaterials. *Nanoscale Research Letters*, 19(1), 45-62.

9. Feynman, R. P. (1960). There's plenty of room at the bottom. *Engineering and Science*, 23(5), 22-36.

10. Suleiman, M., et al. (2023). Historical perspective and future trends in nanotechnology: From Feynman to nanofluids. *Journal of Nanoparticle Research*, 25(4), 112.

11. Gómez González, A., Cerpa Naranjo, A., & Rodríguez Mayo, L. (2019). Estudio reológico de aceites lubricantes 5W40 y 10W40 con nanopartículas base grafeno. Universidad Europea.

12. Nejjari, H., & Lapuerta Amigo, M. (2020). Estudio de lubricidad de aceites lubricantes dopados con nanopartículas. Universidad de Castilla-La Mancha.

13. López Fraile, A., Cerpa Naranjo, A., & Pérez Piñeiro, J. (2022). Efecto de nanopartículas base carbono en el comportamiento reológico de aceites lubricantes. Trabajo Fin de Grado. Universidad Europea de Madrid.

14. Abdolahi, F., et al. (2025). Rheological and thermal conductivity properties of engine oil-based nanofluids containing nitrides. *Scientific Reports*, 15(1), 112-128.

15. Ahmed, A., et al. (2025). Non-Newtonian behavior and rheological profiling of MWCNT-doped commercial lubricants. *ACS Omega*, 10(2), 450-465.

16. Markandan, K., et al. (2025). Sustainability and efficiency of nano-additivated biolubricants: A review of future trends. *Emergent Materials*, 8(1), 15-32.

17. AlterEvo Ingenieros. (2013, abril). *Viscosidad*. AlterEvo: Ingeniería y Eficiencia Energética. [Fotografía]. https://alterevoingenieros.blogspot.com/2013/04/viscosidad.html

18. Sajid, M. U., & Ali, H. M. (2019). *Recent advances in applications of nanofluids in heat transfer devices: A review*. International Journal of Heat and Mass Transfer.

19. White, F. M. (2021). *Mecánica de fluidos* (9ª ed.). McGraw-Hill Education.

20. Ali, N., et al. (2018). *A review on thermal conductivity enhancement of nanofluids*. Renewable and Sustainable Energy Reviews.

21. Nabwey, H. A., et al. (2023). Numerical Study of Heat Transfer Enhancement in Nanofluids. Symmetry.

22. Suleiman, S. M., et al. (2023). Synthesis and Characterization of Nanomaterials for Engineering Applications. Journal of Nanotechnology.

23. Centro Nacional de Microscopía Electrónica (CNME). (s. f.). *Microscopio Electrónico de Barrido por Emisión de Campo JEOL JSM-6335F*. Universidad Complutense de Madrid. [Fotografía] https://cnme.es/index.php/microscopios/microscopios-2/microscopios-sem/jeol-jsm-6335f

24. Centro Nacional de Microscopía Electrónica (CNME). (s. f.). *Microscopio Electrónico de Transmisión JEOL JEM-2100*. Universidad Complutense de Madrid. [Fotografía]. https://cnme.es/index.php/microscopios/microscopios-2/tem/jeol-jem-2100

25. DARASL. (s. f.). *Aceite ANDEL 20W50*. https://darasl.es/lubricantes/25-aceite-andel-20w50.html

26. Endado. (s. f.). *Castrol Edge 5W30 LL 5L*. https://www.endado.com/p/castrol-edge-titanium-fst-5w30-ll-5-litros

27. Centro Nacional de Microscopía Electrónica (CNME). (s. f.). *Tarifas de los servicios de microscopía*. Universidad Complutense de Madrid. https://cnme.es/index.php/microscopios/tarifas

28. Ministerio de Trabajo y Economía Social. (2021, 7 de julio). Resolución de 24 de junio de 2021, de la Dirección General de Trabajo, por la que se registra y publica el 20º Convenio colectivo general de la industria química. *Boletín Oficial del Estado*, (161), 80862-81014. https://www.boe.es/eli/es/res/2021/06/24/(3)

29. Federación de Industria, Construcción y Agro de UGT (UGT-FICA). (2025). *Tablas salariales definitivas 2025 y revisión salarial del Convenio General de la Industria Química*. https://www.ugtfica.org/

30. Naciones Unidas. (2015). *Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*. Resolución aprobada por la Asamblea General el 25 de septiembre de 2015 (A/RES/70/1).

31. Holmberg, K., y Erdemir, A. (2017). Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions. *Friction*, 5(3), 263-284. https://doi.org/10.1007/s40544-017-0183-5

32. Spikes, H. (2015). Friction modifier additives. *Tribology Letters*, 60(1), 5. https://doi.org/10.1007/s11249-015-0570-7

33. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [IPCC]. (2023). *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC.

34. Google. (2026). *Gemini: Modelo de lenguaje grande basado en inteligencia artificial*. https://gemini.google.com/. *"Herramienta utilizada como soporte para la asistencia en la redacción, reformulación de frases y corrección de estilo técnico del documento".*

ANEXOS

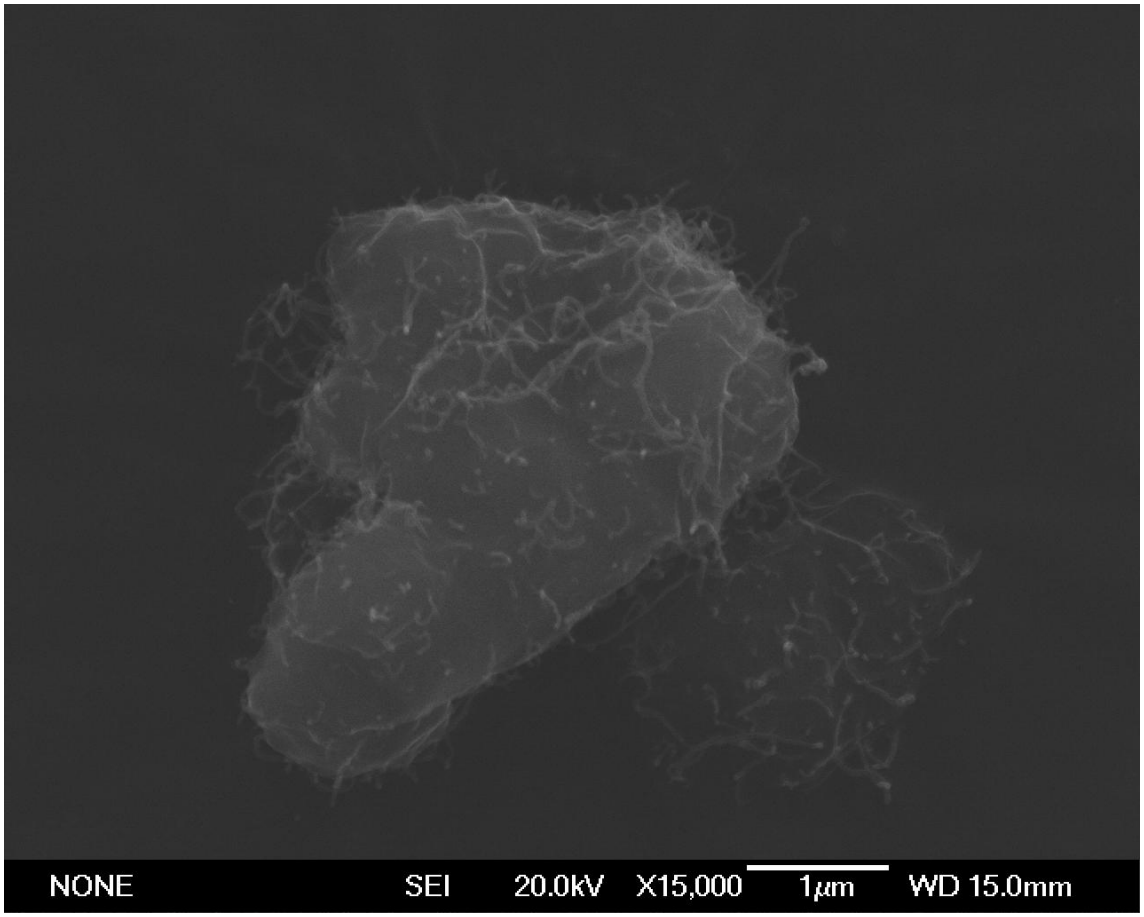


Ilustración 43 Imagen microscopía SEM de nanotubos de carbono con aumento x15.000

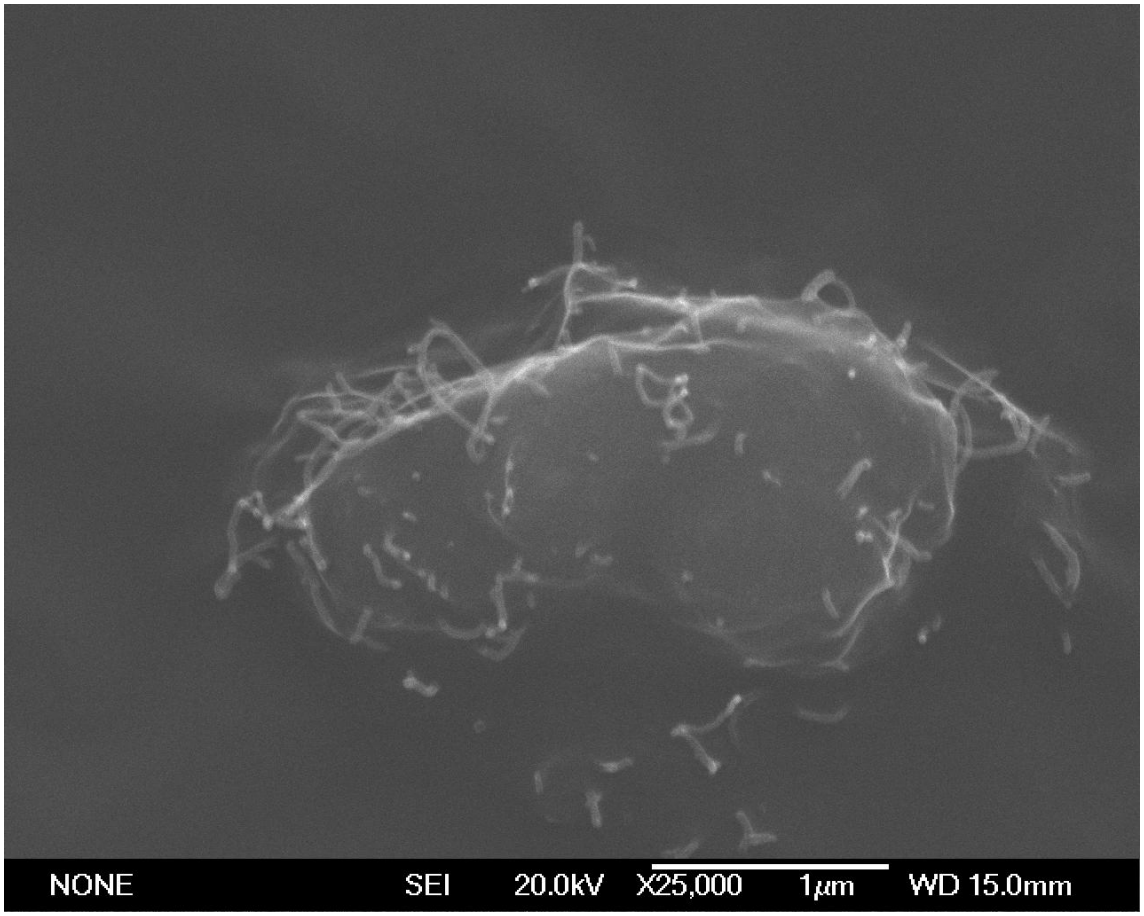


Ilustración 44 Imagen microscopía SEM de nanotubos de carbono con aumento x25.000

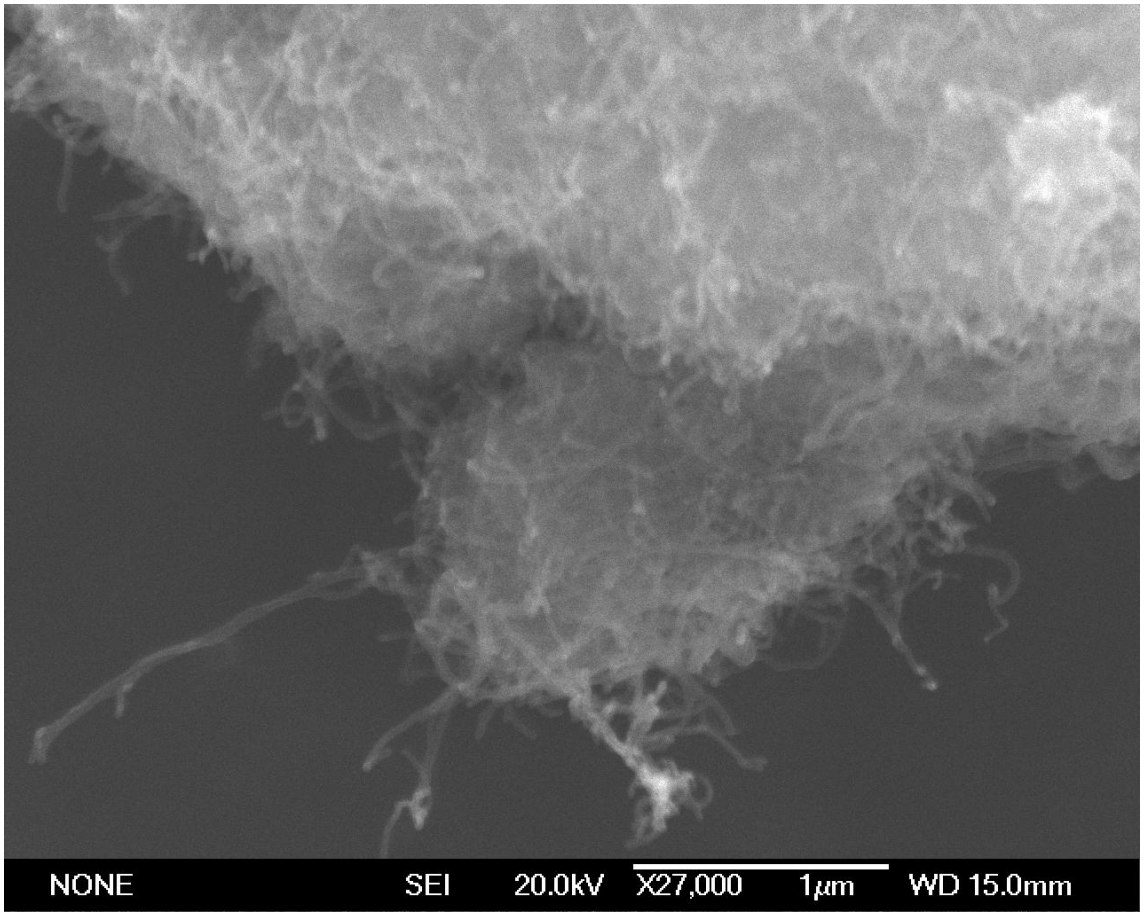


Ilustración 45 Imagen microscopía SEM de nanotubos de carbono con aumento x27.000

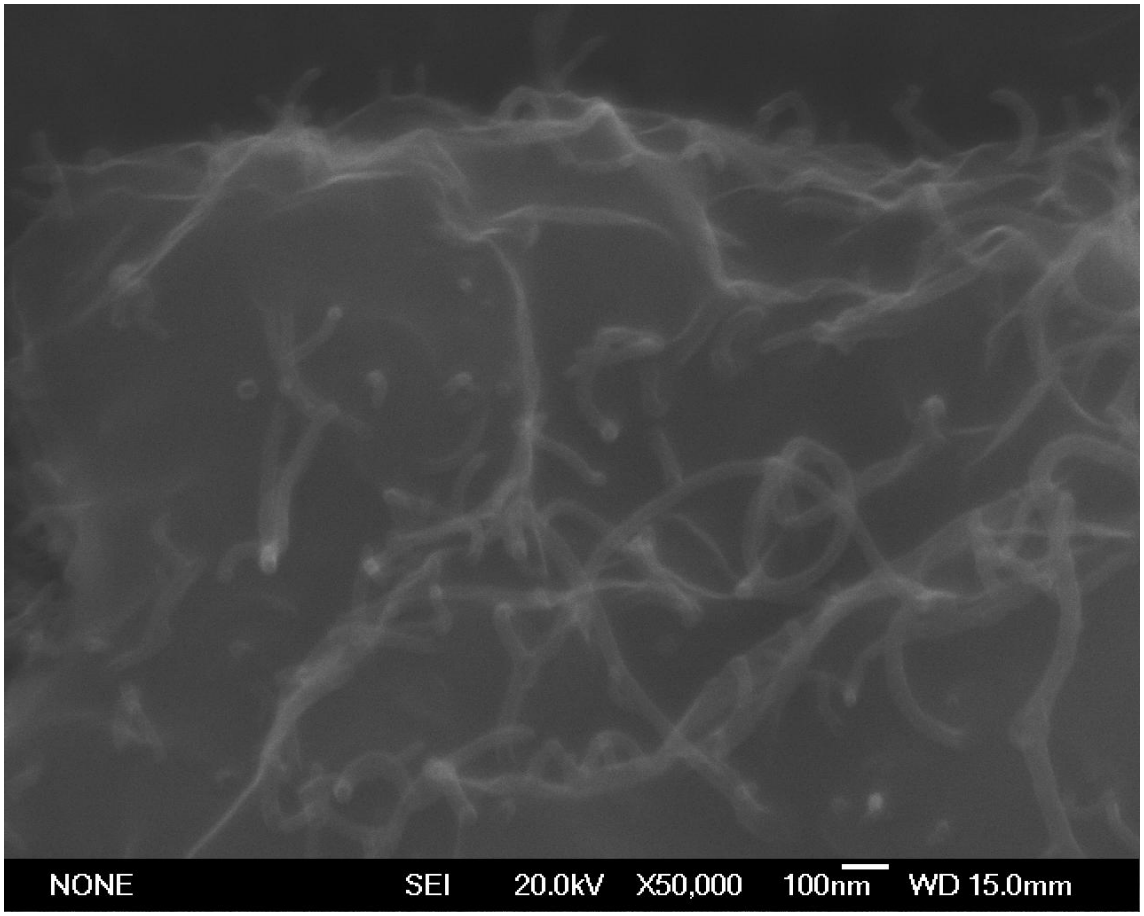


Ilustración 46 Imagen microscopía SEM de nanotubos de carbono con aumento x50.000

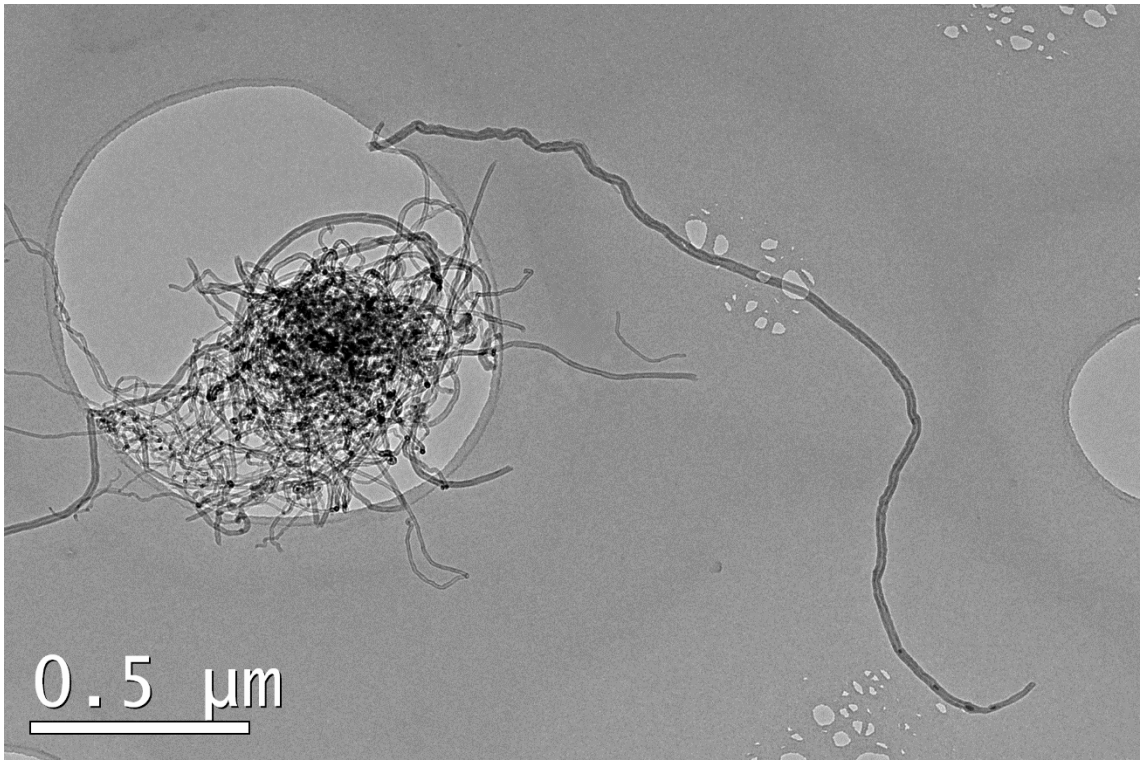


Ilustración 47 Imagen microscopía TEM de nanotubos de carbono a escala 0.5µm

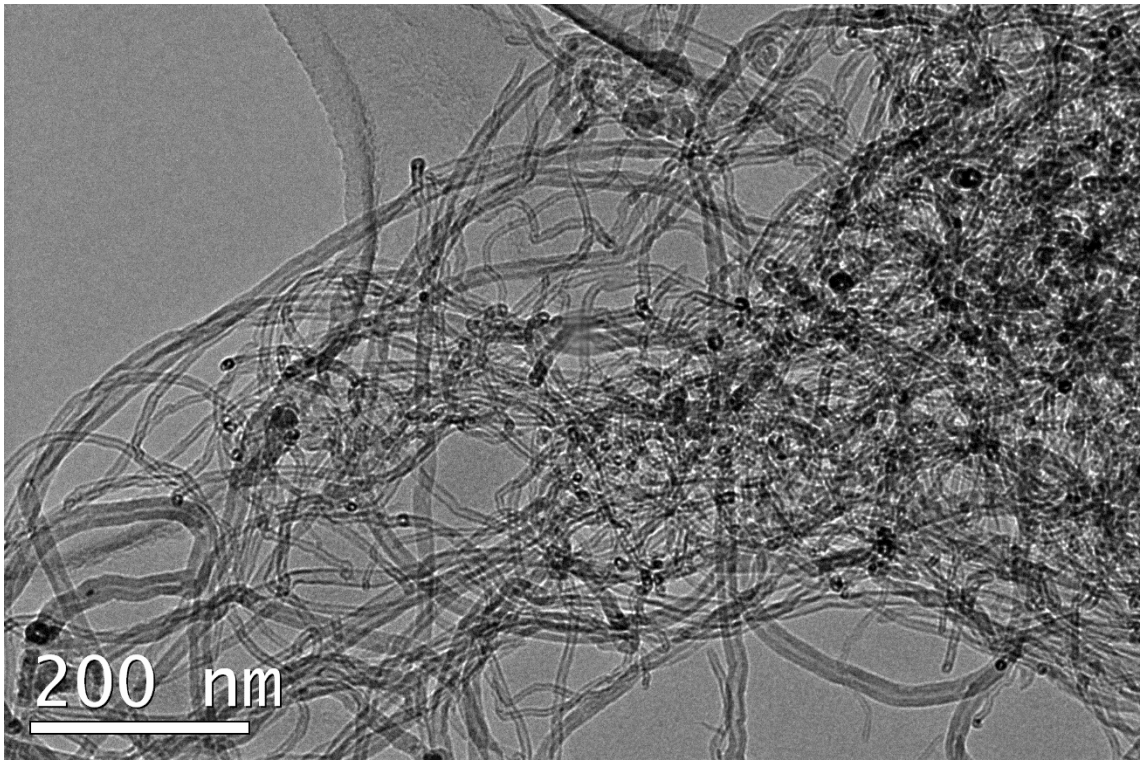


Ilustración 48 Imagen microscopía TEM de nanotubos de carbono a escala 200nm

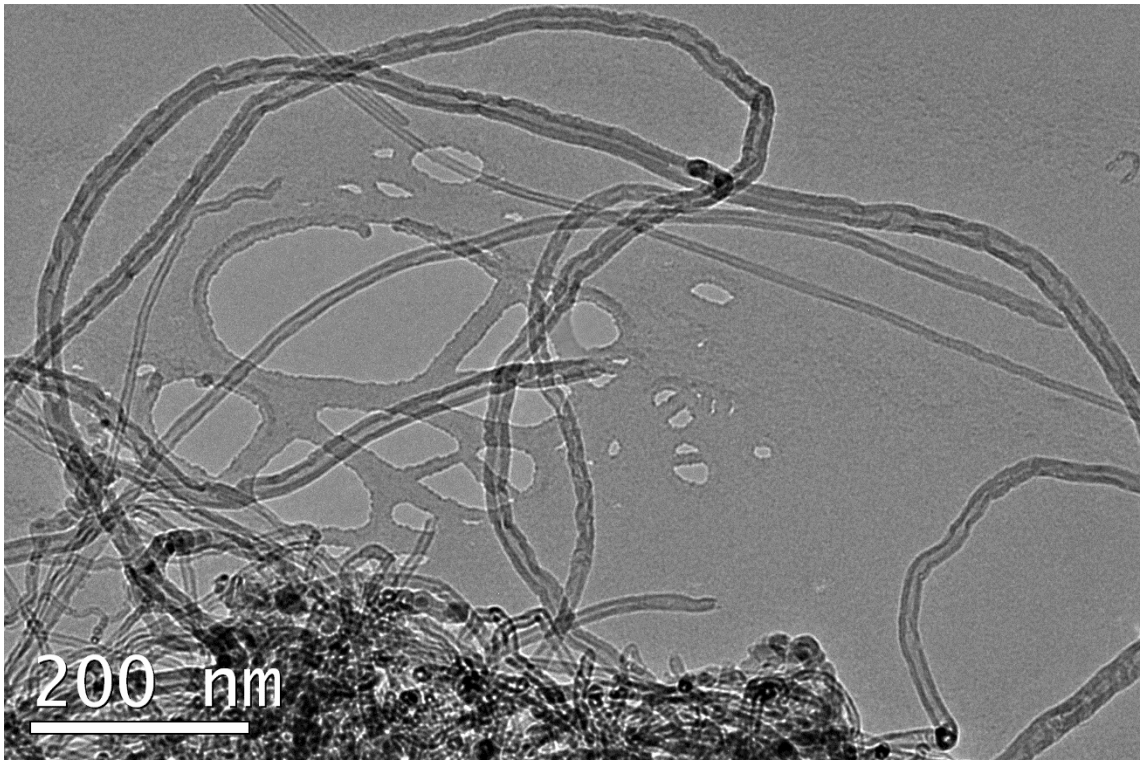


Ilustración 49 Imagen microscopía TEM de nanotubos de carbono a escala 200nm

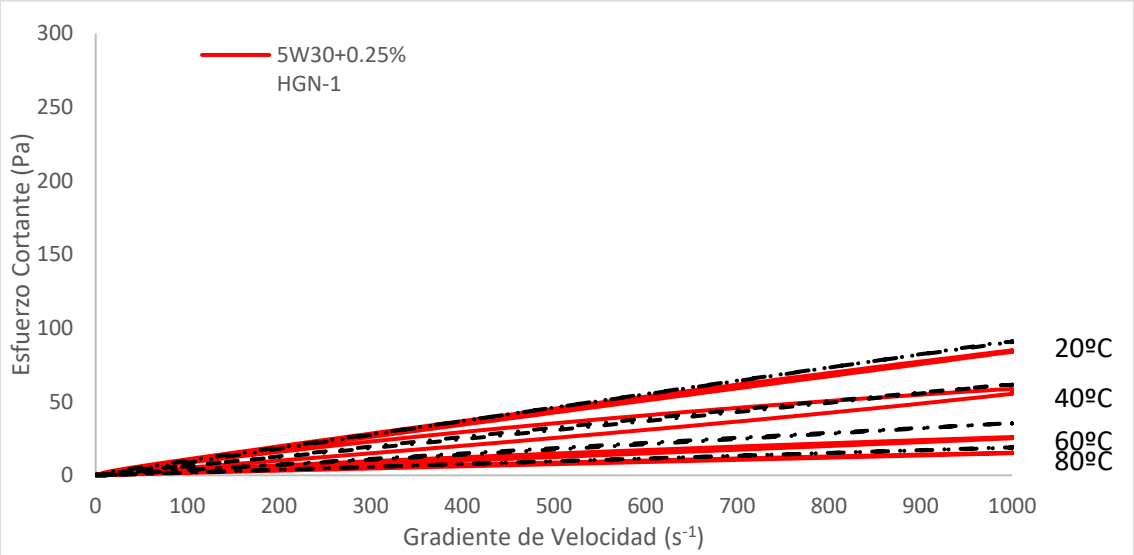


Ilustración 50 Esfuerzo cortante frente a Gradiente de velocidad en muestra 5W30 con 0.25% HGN-1 de 20ºC a 80ºC

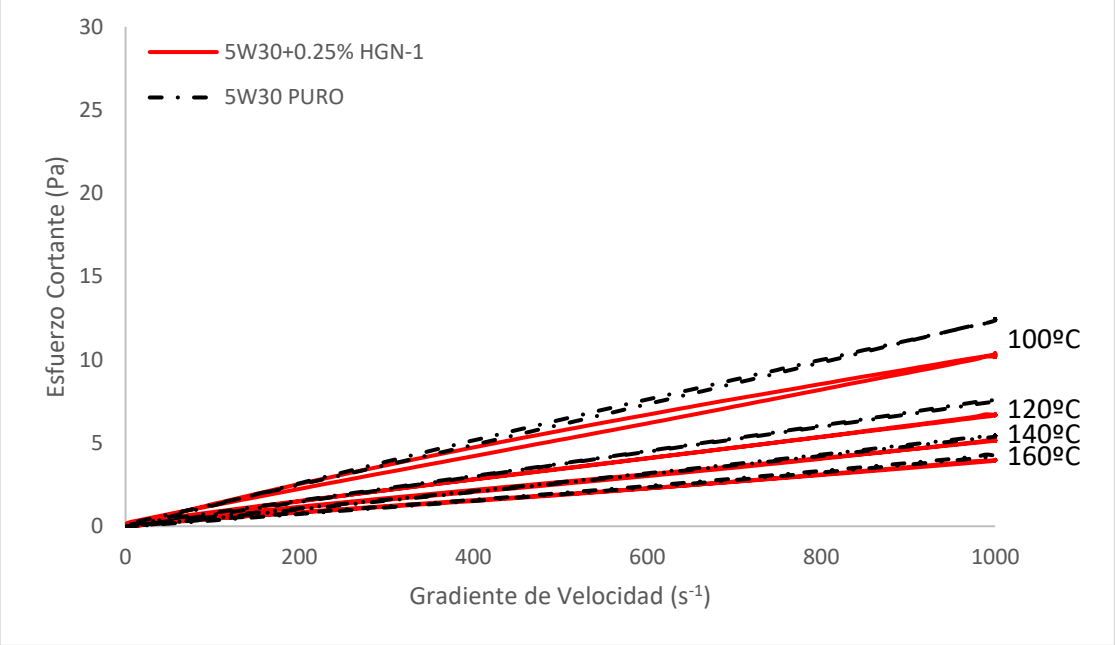


Ilustración 51 Esfuerzo cortante frente a Gradiente de velocidad en muestra 5W30 con 0.25% HGN-1 de 100ºC a 160ºC

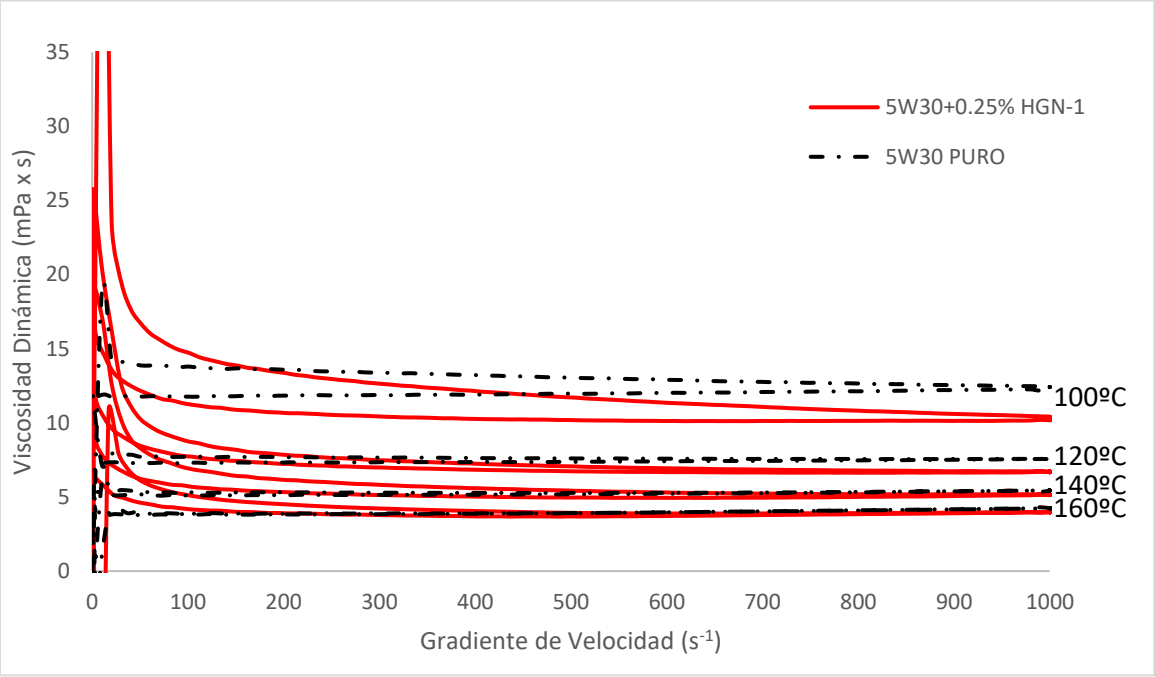


Ilustración 52 Viscosidad dinámica frente a Gradiente de velocidad en muestra 5W30 con 0.25% HGN-1 de 20ºC a 80ºC

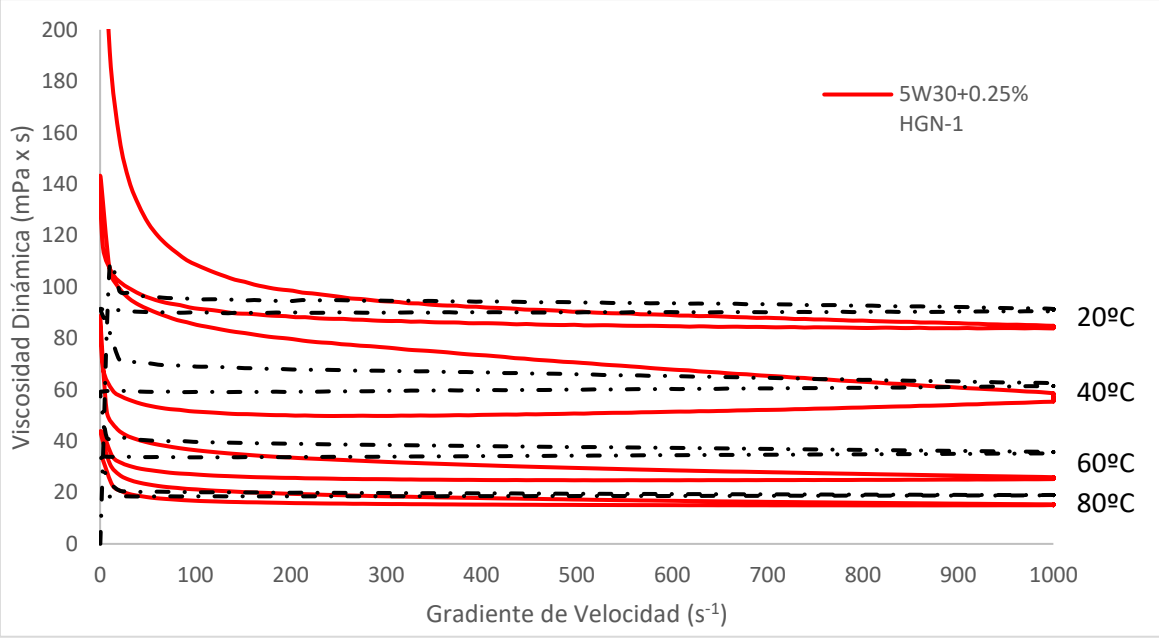


Ilustración 53 Viscosidad dinámica frente a Gradiente de velocidad en muestra 5W30 con 0.25% HGN-1 de 100ºC a 160ºC

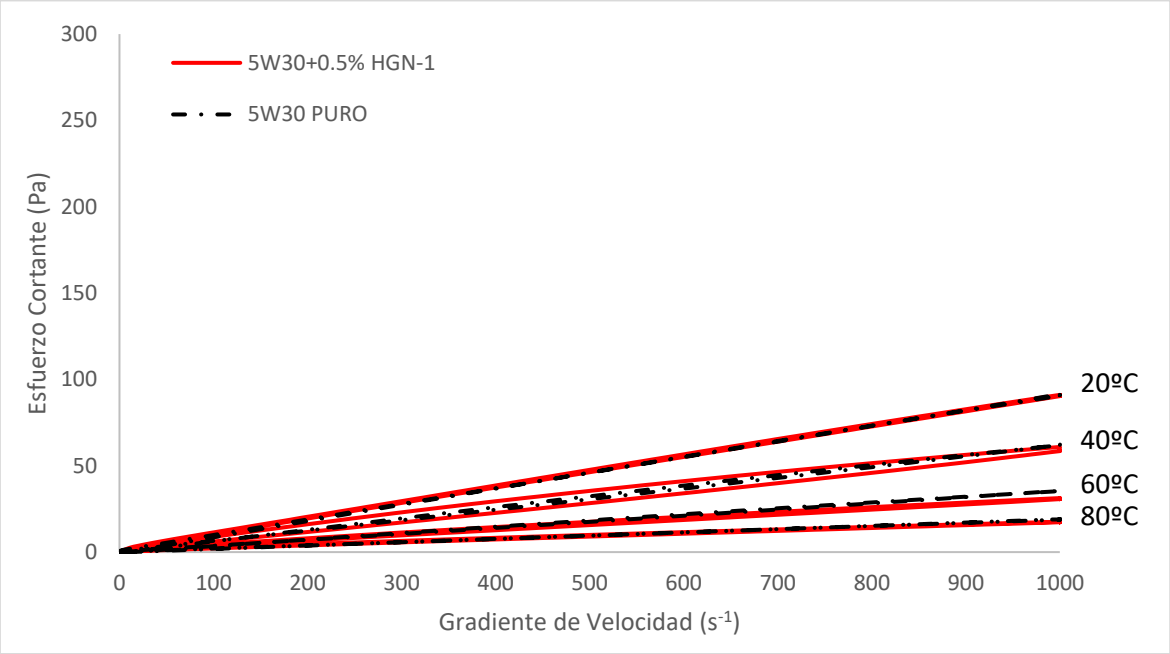


Ilustración 54 Esfuerzo cortante frente a Gradiente de velocidad en muestra 5W30 con 0.5% HGN-1 de 20ºC a 80ºC

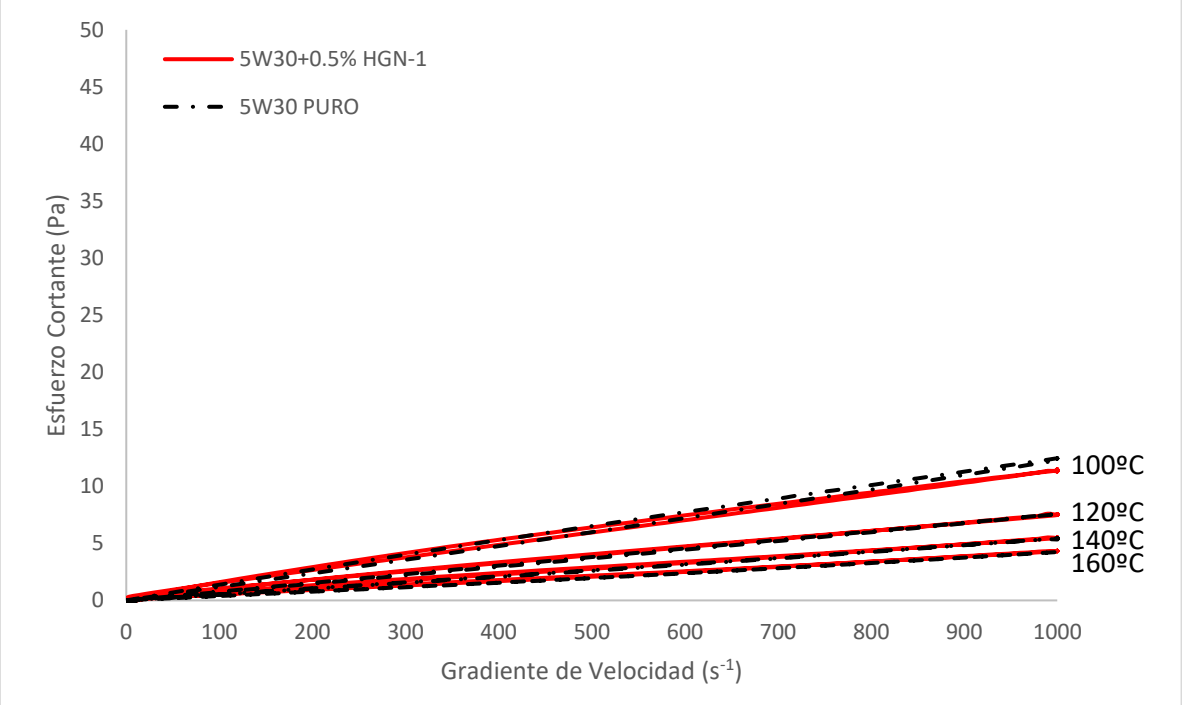


Ilustración 55 Esfuerzo cortante frente a Gradiente de velocidad en muestra 5W30 con 0.5% HGN-1 de 100ºC a 160ºC

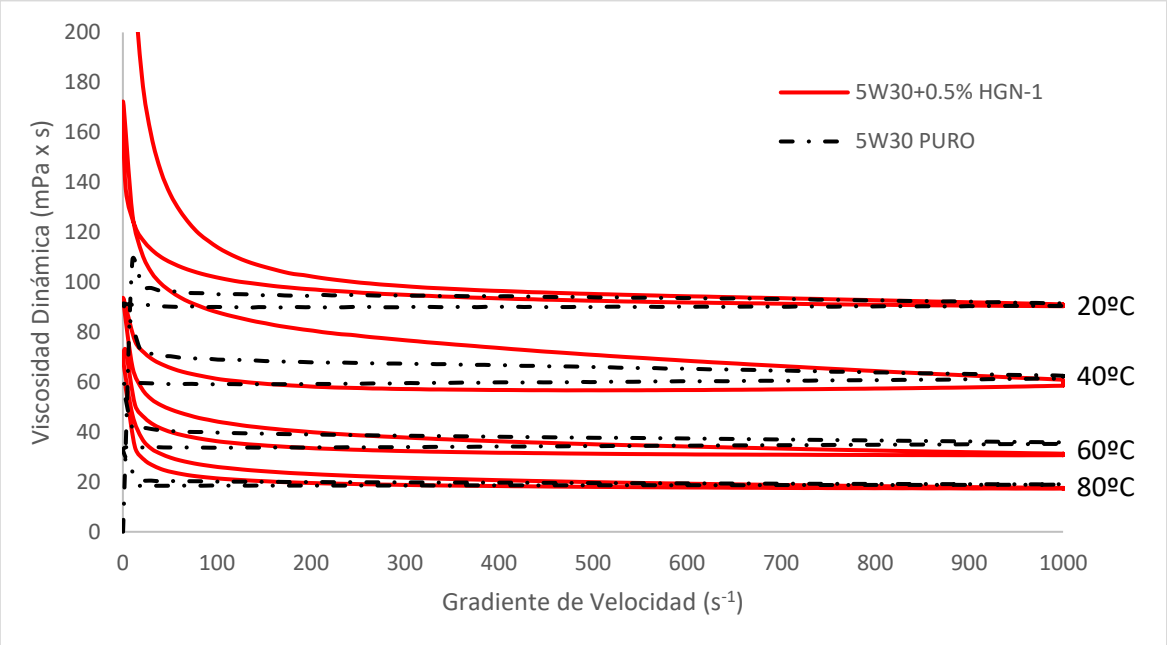


Ilustración 56 Viscosidad dinámica frente a Gradiente de velocidad en muestra 5W30 con 0.5% HGN-1 de 20ºC a 80ºC

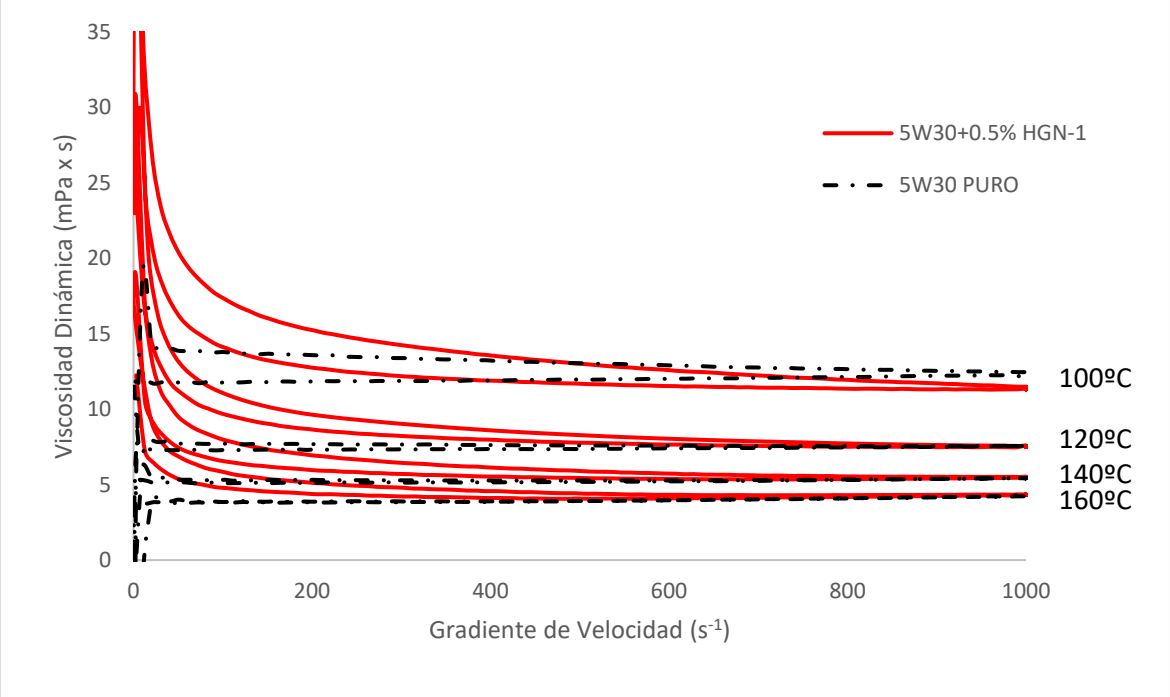


Ilustración 57 Viscosidad dinámica frente a Gradiente de velocidad en muestra 5W30 con 0.5% HGN-1 de 100ºC a 160ºC

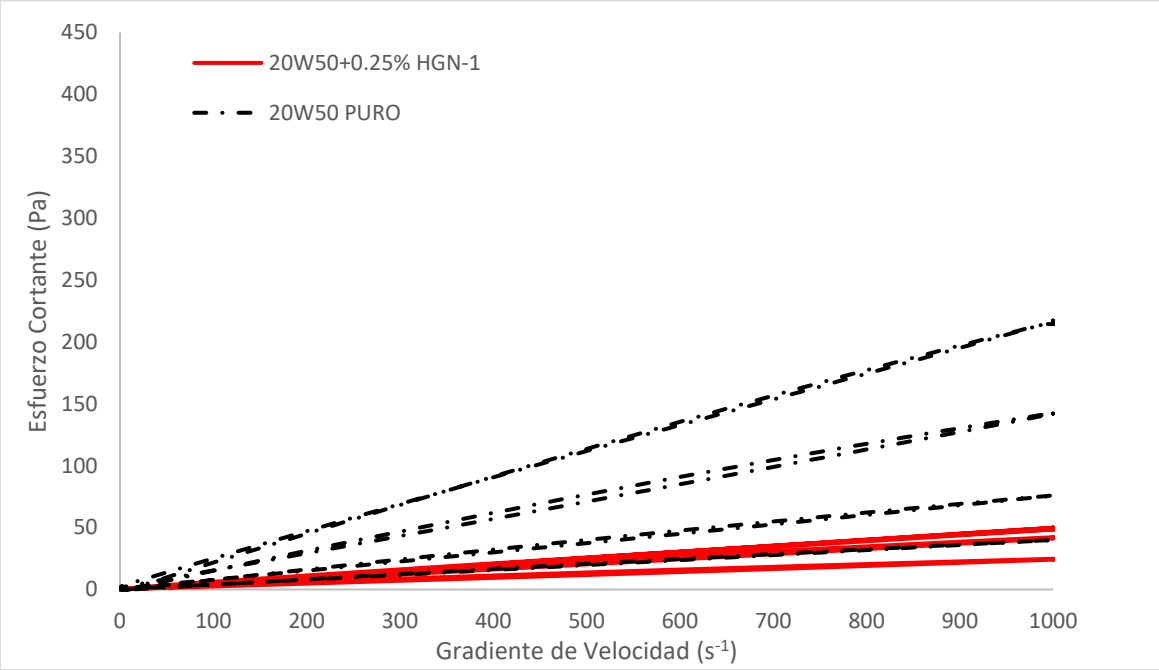


Ilustración 58 Esfuerzo cortante frente a Gradiente de velocidad en muestra 20W50 con 0.25% HGN-1 de 20ºC a 80ºC

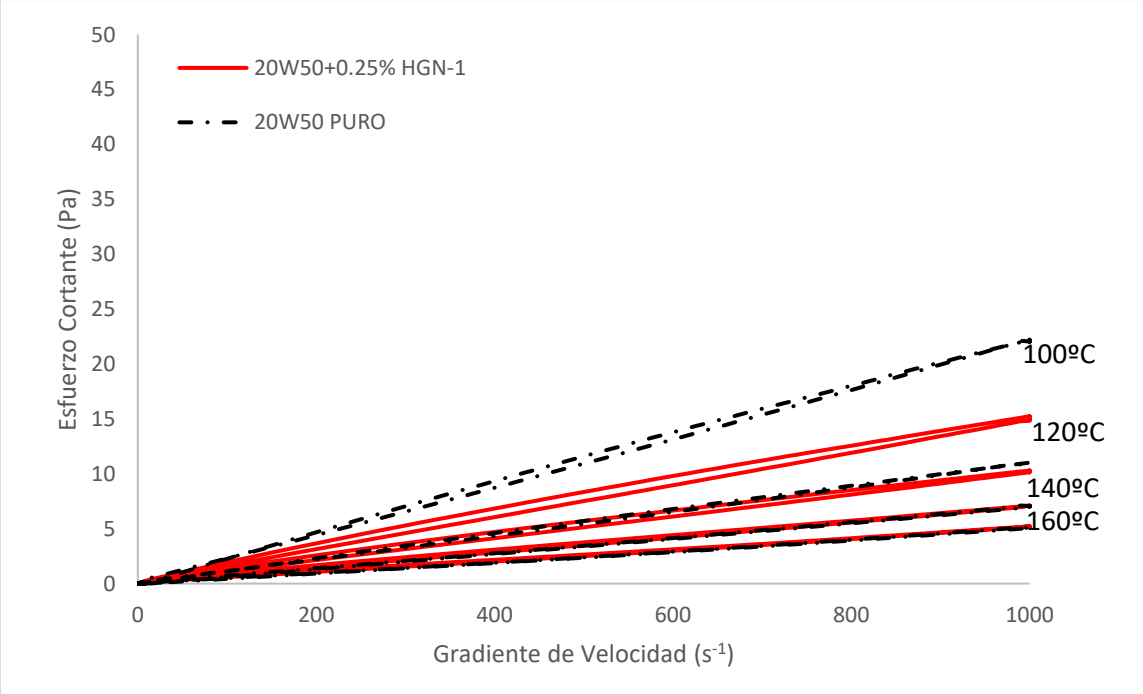


Ilustración 59 Esfuerzo cortante frente a Gradiente de velocidad en muestra 20W50 con 0.25% HGN-1 de 100ºC a 160ºC

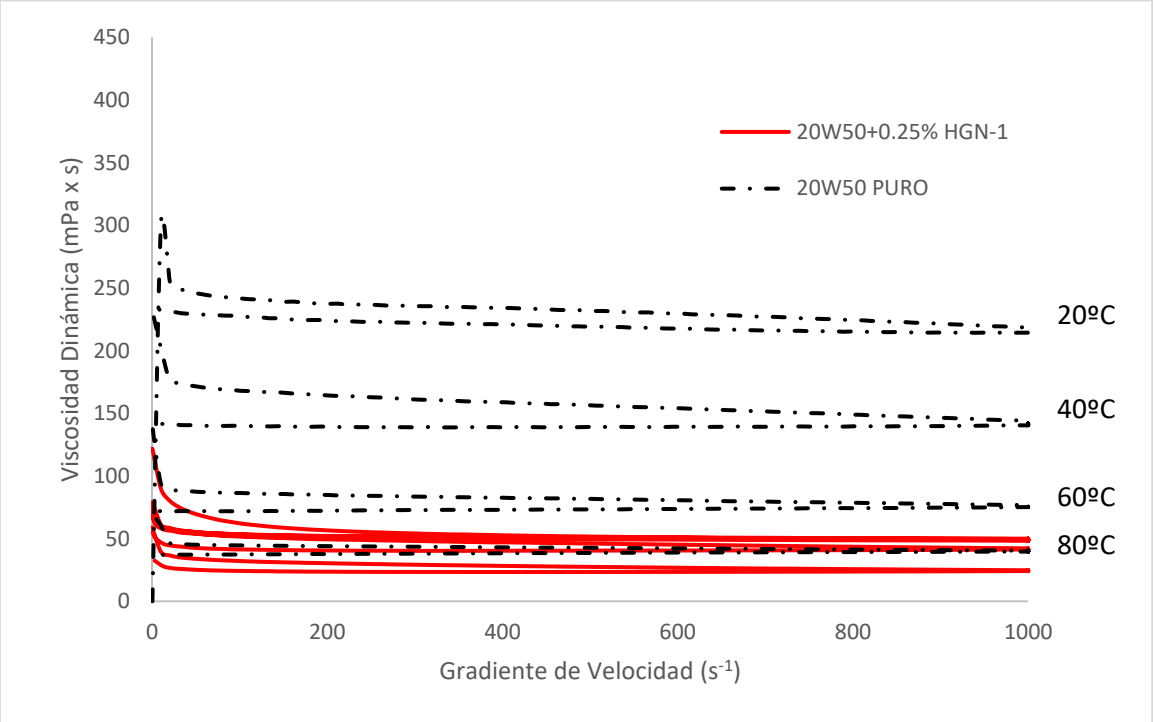


Ilustración 60 Viscosidad dinámica frente a Gradiente de velocidad en muestra 20W50 con 0.25% HGN-1 de 20ºC a 80ºC

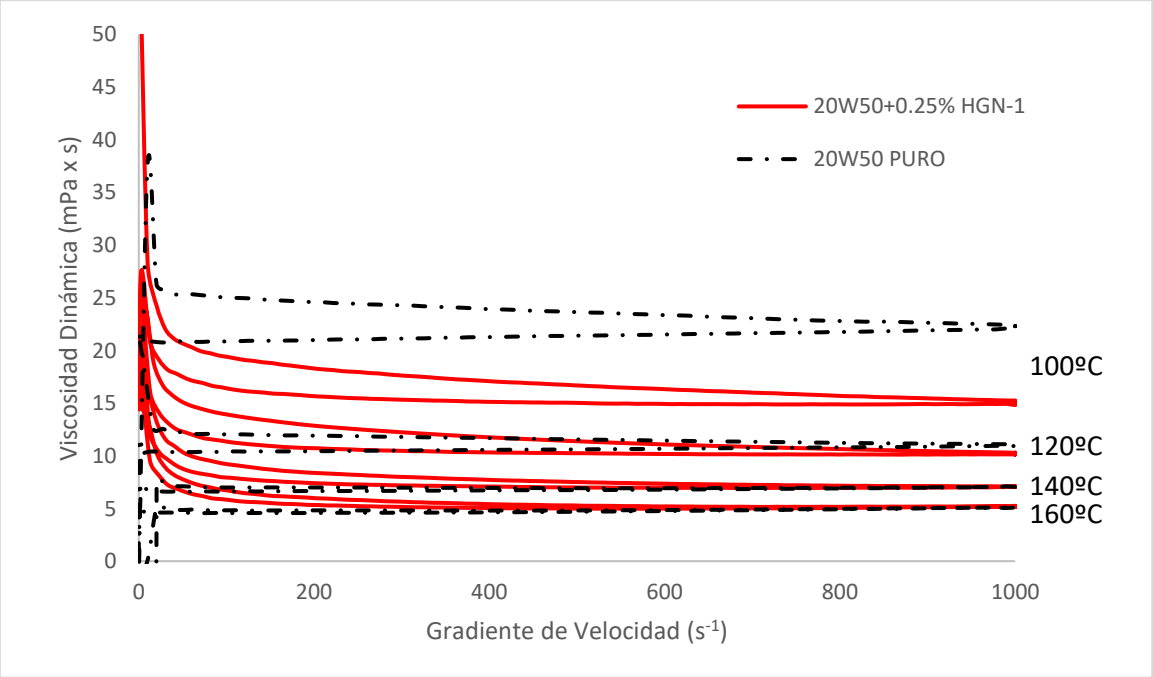


Ilustración 61 Viscosidad dinámica frente a Gradiente de velocidad en muestra 20W50 con 0.25% HGN-1 de 100ºC a 160ºC

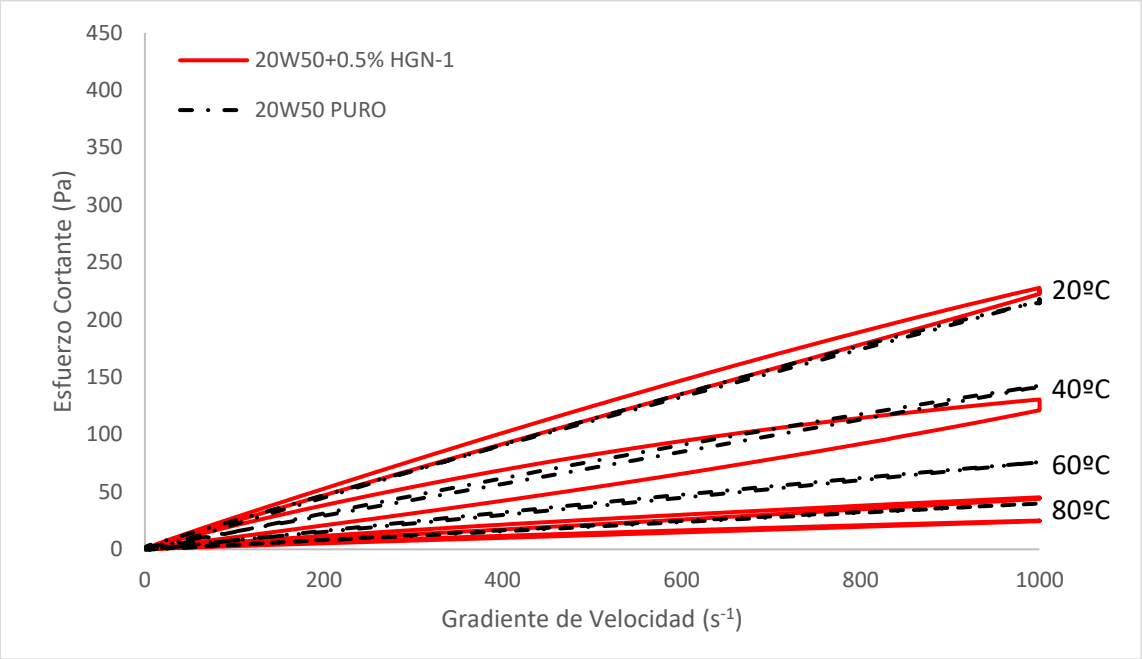


Ilustración 62 Esfuerzo cortante frente a Gradiente de velocidad en muestra 20W50 con 0.5% HGN-1 de 20ºC a 80ºC

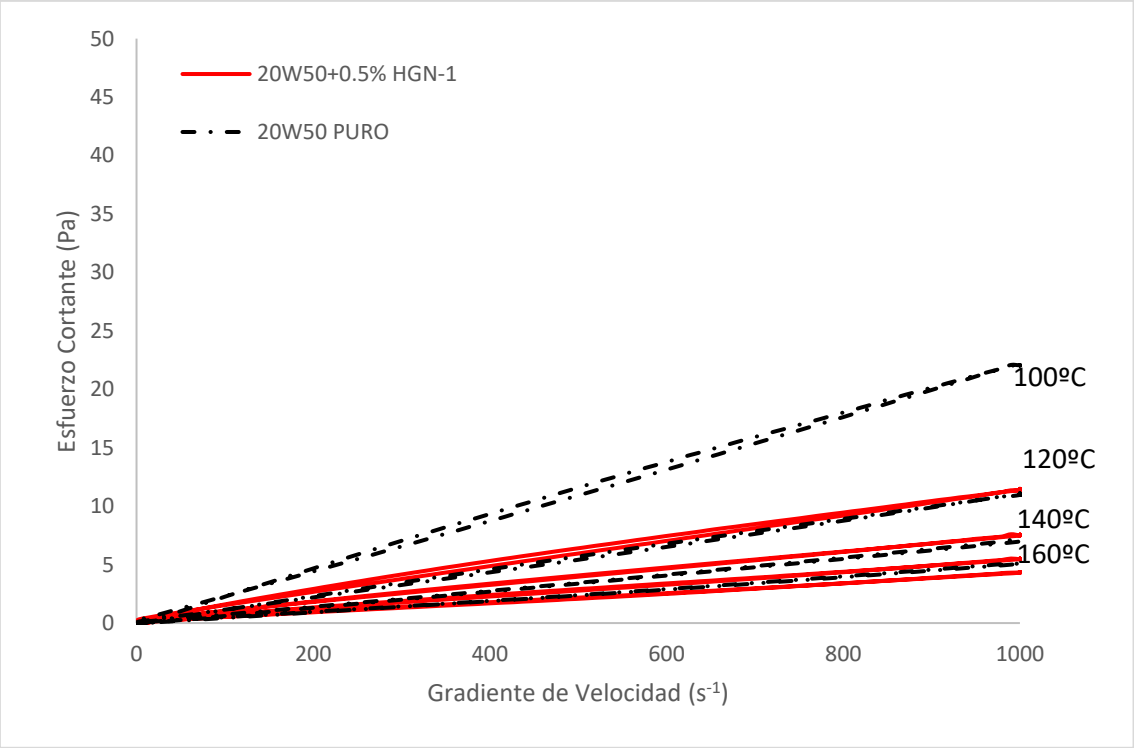


Ilustración 63 Esfuerzo cortante frente a Gradiente de velocidad en muestra 20W50 con 0.5% HGN-1 de 100ºC a 160ºC

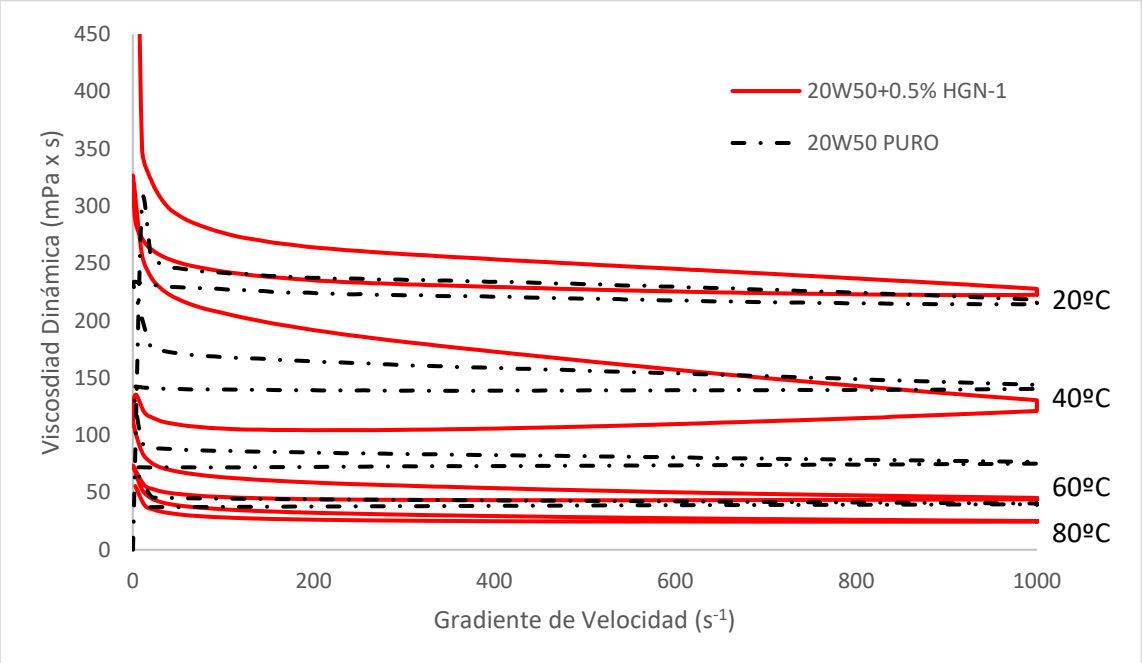


Ilustración 64 Viscosidad dinámica frente a Gradiente de velocidad en muestra 20W50 con 0.5% HGN-1 de 20ºC a 80ºC

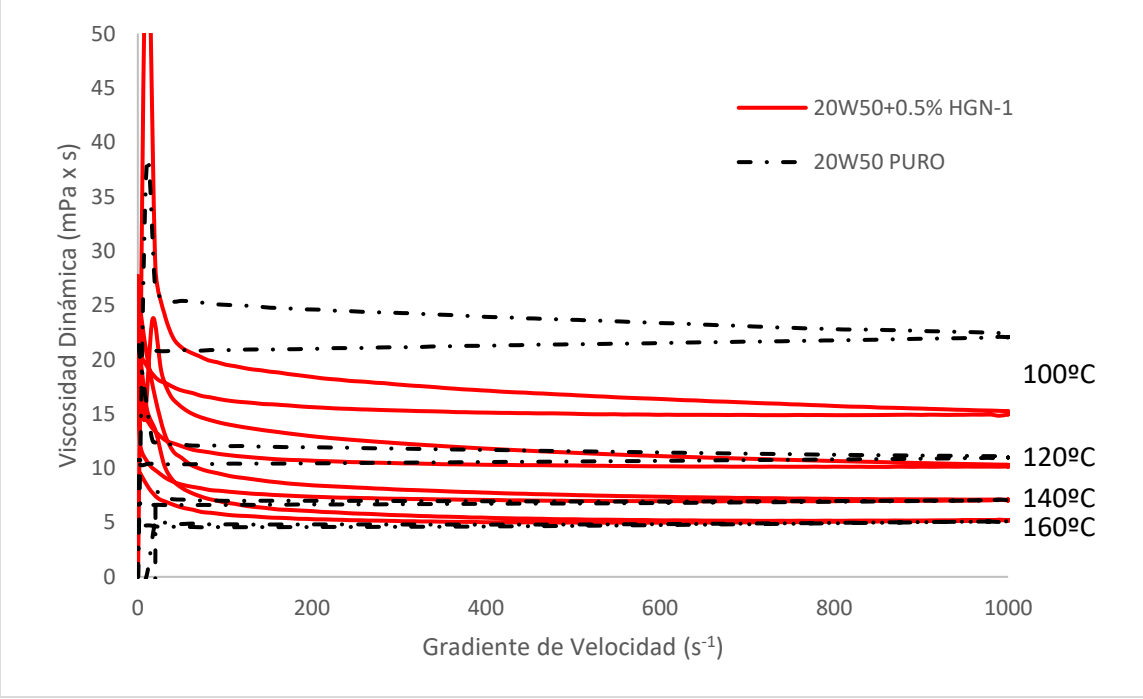


Ilustración 65 Viscosidad dinámica frente a Gradiente de velocidad en muestra 20W50 con 0.5% HGN-1 de 100ºC a 160ºC

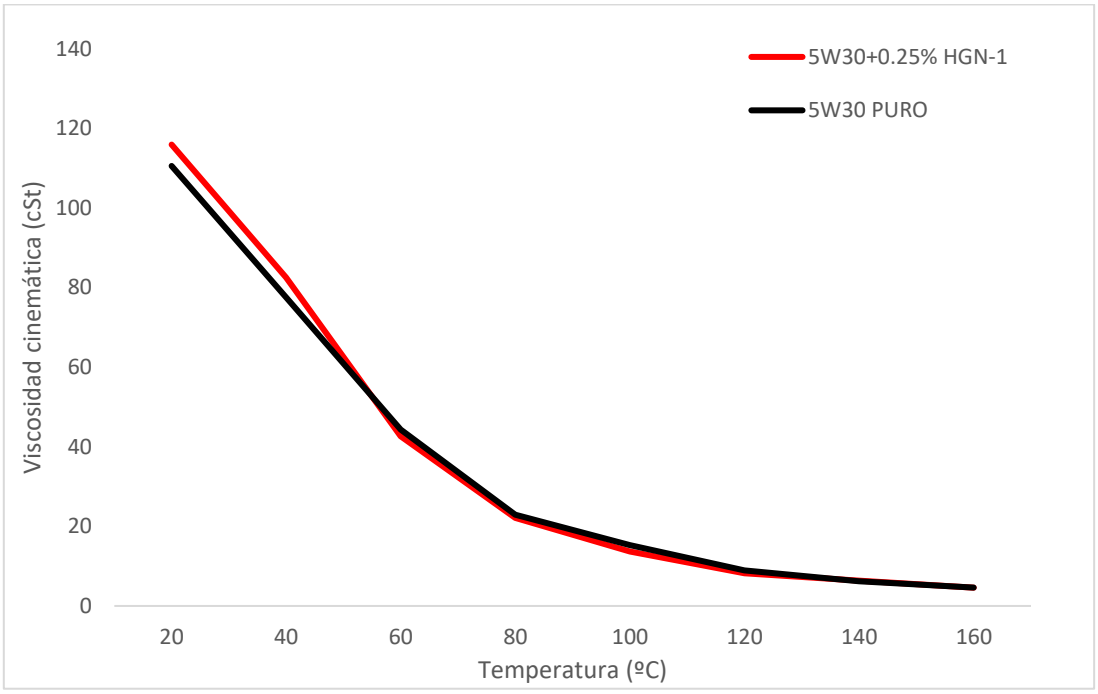


Ilustración 66 Gráfica viscosidad cinemática frente a Temperatura en muestra 5W30 con 0.25% HGN-1

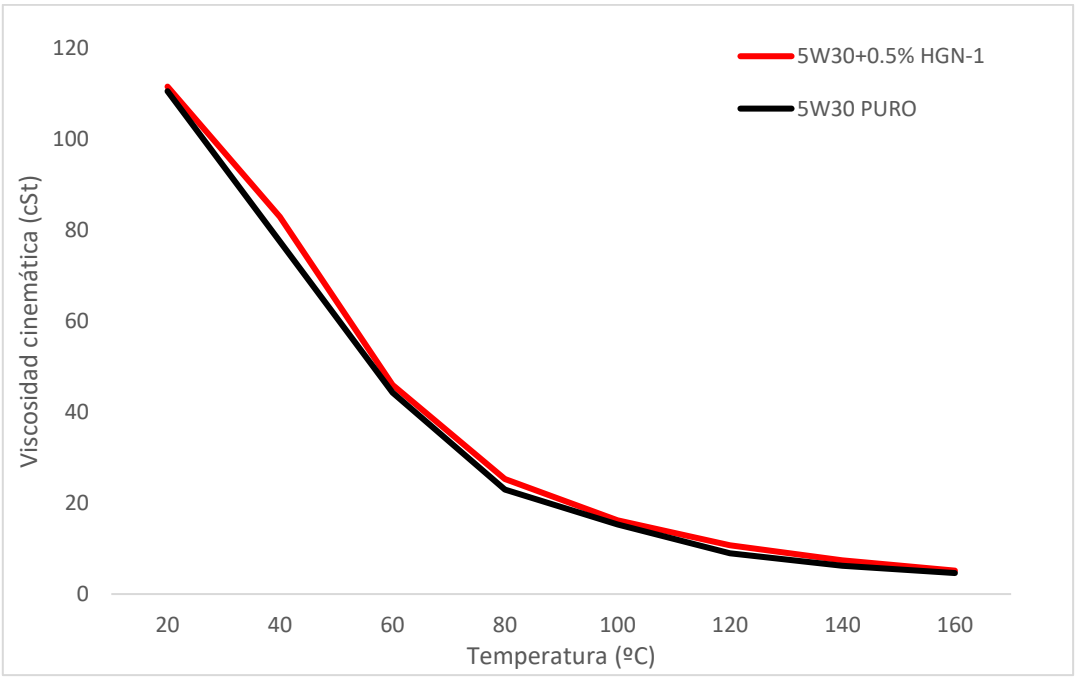


Ilustración 67 Gráfica viscosidad cinemática frente a Temperatura en muestra 5W30 con 0.5% HGN-1

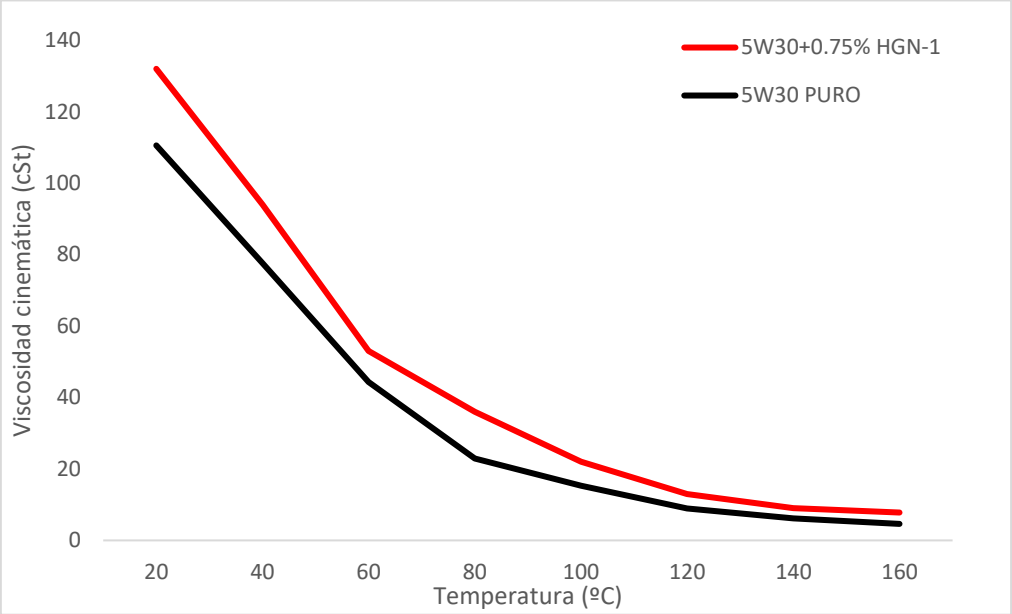


Ilustración 68 Gráfica viscosidad cinemática frente a Temperatura en muestra 5W30 con 0.75% HGN-1

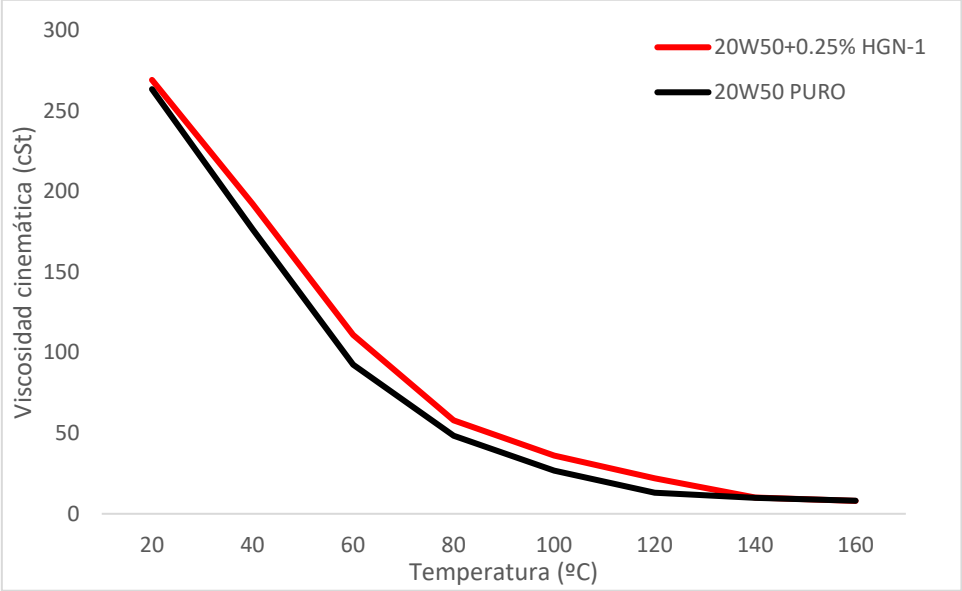


Ilustración 69 Gráfica viscosidad cinemática frente a Temperatura en muestra 20W50 con 0.25% HGN-1

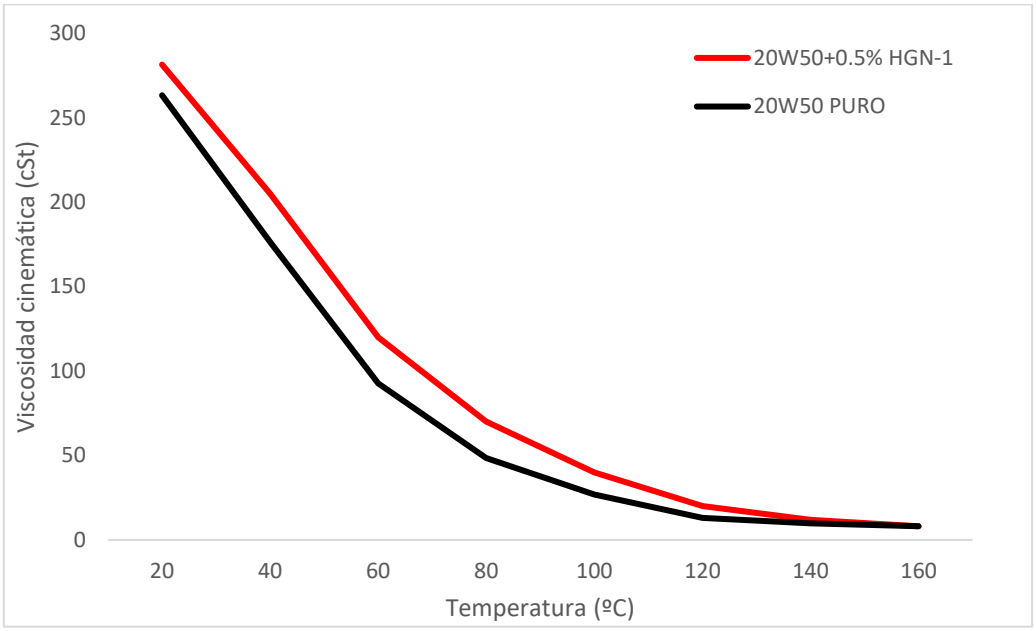


Ilustración 70 Gráfica viscosidad cinemática frente a Temperatura en muestra 20W50 con 0.5% HGN-1

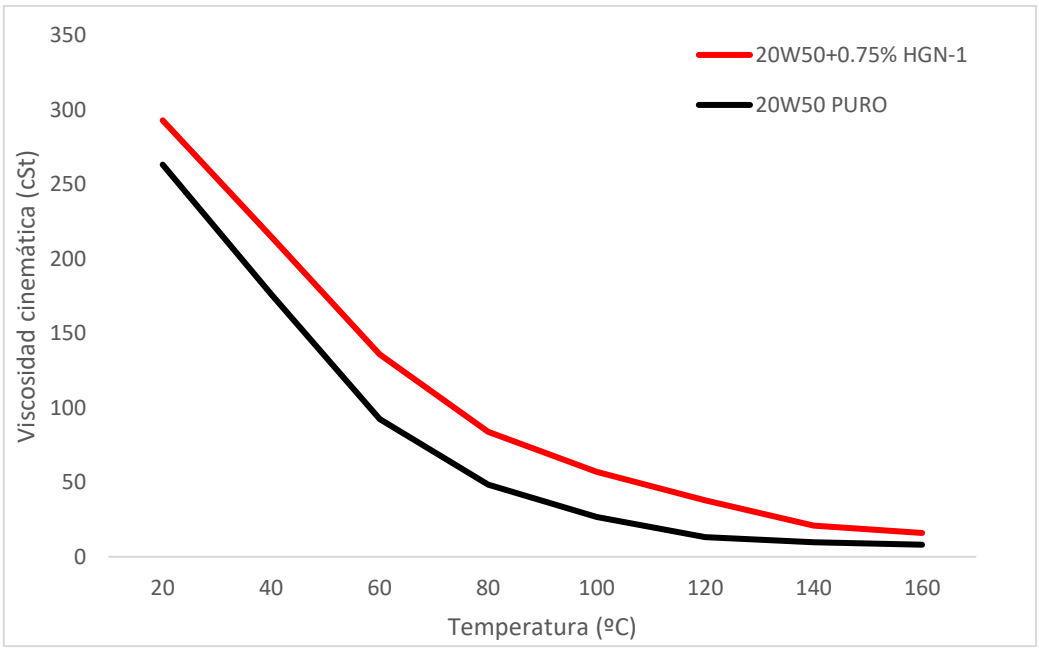


Ilustración 71 Gráfica viscosidad cinemática frente a Temperatura en muestra 20W50 con 0.75% HGN-1

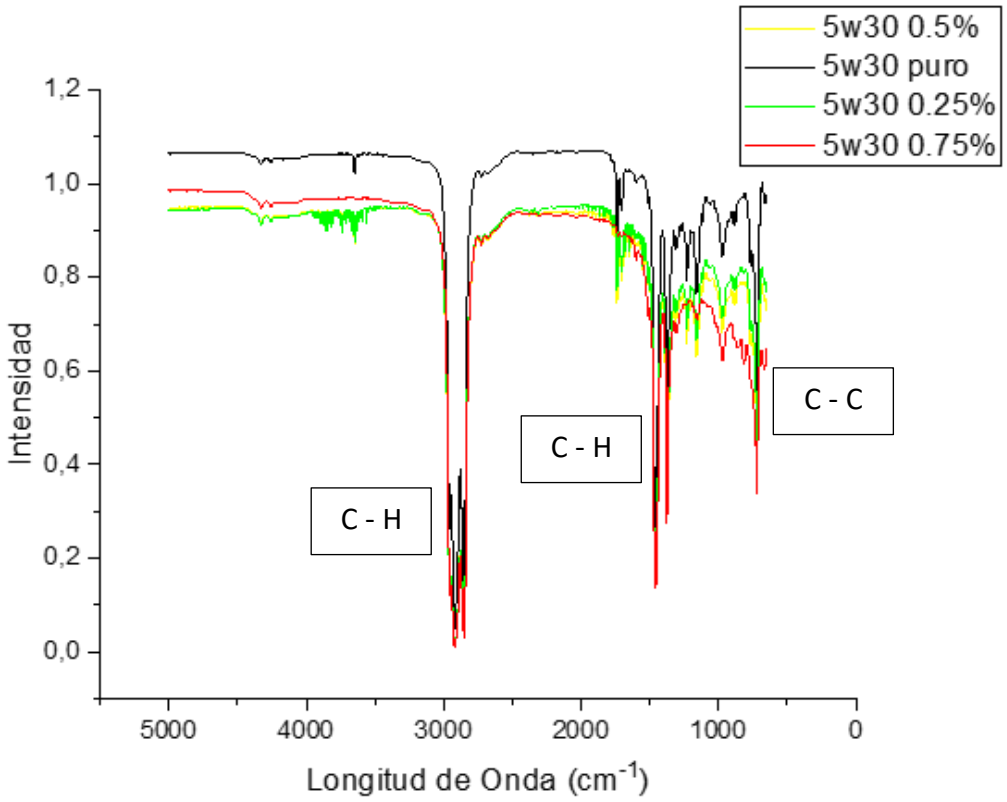


Ilustración 72 Espectro de muestras 5W30 con concentraciones de 0%, 0.25%, 0.5% y 0.75% de HGN-1 Intensidad vs Longitud de Onda

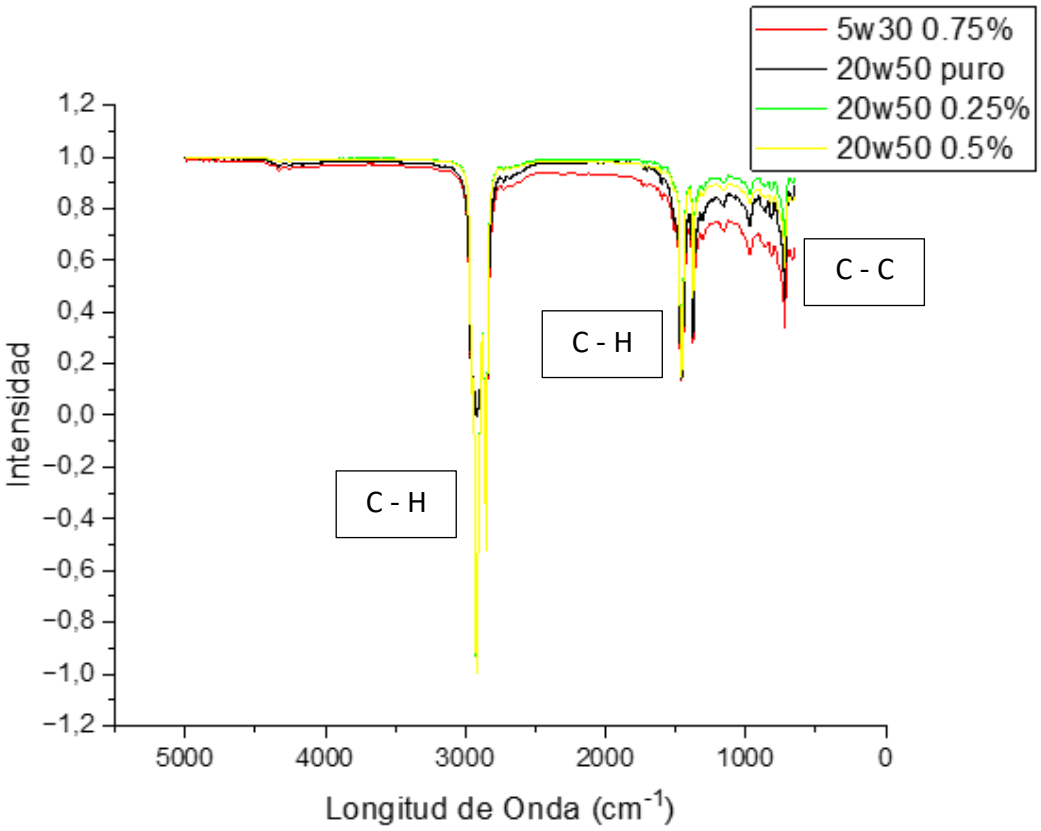


Ilustración 73 Espectro de muestras 20W50 con concentraciones de 0%, 0.25%, 0.5% y 0.75% de HGN-1 Intensidad vs Longitud de Onda