



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA, BIOTECNOLOGÍA Y
MATERIALES

**NANOFLUIDOS DE DISULFURO DE MOLIBDENO PARA APLICACIONES EN
COLECTORES SOLARES POR ABSORCIÓN DIRECTA (DASC)**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL QUÍMICO

CRISTÓBAL ALEJANDRO VERGARA MORALES

PROFESOR GUÍA:
HUMBERTO PALZA CORDERO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
JUAN QUIJADA ABARCA
WILLIAM CALDERON MUÑOZ

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por:
FONDECYT-ANID

SANTIAGO DE CHILE
2022

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE MAGÍSTER EN CIENCIAS
DE LA INGENIERÍA
POR: **CRISTÓBAL ALEJANDRO VERGARA MORALES**
FECHA: 2022
PROF. GUÍA: NOMBRE PROFESOR

NANOFLUIDOS DE DISULFURO DE MOLIBDENO PARA APLICACIONES EN COLECTORES SOLARES POR ABSORCIÓN DIRECTA (DASC)

Las emisiones de Gases de Efecto Invernadero a nivel mundial son los responsables del calentamiento global. El uso de energías renovables pueden reducir el uso de los combustibles fósiles, encargados de la producción del 84.3% de energía. El 54.1% de la energía solar aprovechada en el globo corresponde a energía solar térmica por medio de colectores solares. Los líquidos utilizados en los colectores presentan baja absorción de radiación y deficientes propiedades térmica. Es por esto mismo que se utilizan superficies que absorban más radiación y se la transfieran al fluido. Debido a lo anterior es que se ha estudiado el efecto de adición de partículas en los fluidos para mejorar la absorción y propiedades térmicas, por lo tanto, no habría necesidad de tener una superficie que absorba la radiación y la transfiera al líquido, mejorando la eficiencia por presentar menor número de resistencias térmicas. Cuando las partículas sólidas en el fluido tienen tamaños nanométricos pasa a ser llamados nanofluidos. El Disulfuro de molibdeno (MoS_2) es un material en 2 dimensiones que está siendo estudiado por su bajo costo, baja toxicidad y presentar beneficios similares a los compuestos carbonosos como Grafeno, óxido de grafeno (GO), etc.

El objetivo del presente trabajo es producir un nanofluido de MoS_2 por exfoliación mecánica de las partículas y analizar el efecto de este en la absorción de radiación y comparar el efecto del MoS_2 también se produjo el nanofluido de GO que es de los más estudiados. Se utilizó espectroscopía UV-vis para caracterizar los nanofluidos, espectroscopía Raman y difracción de rayos-X para las nanopartículas de MoS_2 .

Se obtuvo que el nanofluido de MoS_2 alcanza diferencias de temperaturas de 4 hasta 7°C que el fluido base para la potencia simulada de 1 sol dependiendo de la concentración de partículas. El nanofluido presenta aumenta la eficiencia de evaporación logrando una eficiencia de hasta el 40.8% para las 200 y 500ppm vs el 28.6% del agua pura. Cuando la intensidad de radiación es de 60 soles, el nanofluido de MoS_2 alcanza la temperatura de ebullición del agua pasado los 250 segundos, el GO en al menos 85s, mientras que el agua no alcanza a hacerlo en los 6 minutos de estudio.

Se concluye que el nanofluido de MoS_2 es apto para utilizarlo como nanofluido en DASC al presentar mejores resultados que el agua pura y similares que el GO a bajas concentraciones, aunque menores a las altas concentraciones.

Agradecimientos

Para iniciar con esta sección, quiero agradecer a mi padre Eduardo Vergara y madre Maria Morales por apoyarme en todo el proceso universitario.

También quiero agradecer al profesor Humberto Palza por darme la confianza de trabajar con él, ayudarme y orientarme en este trabajo.

Igualmente quiero dar gracias a Juan Benavides por su buena voluntad para ayudarme en el laboratorio y mojarse la camiseta al presionar a los técnicos y proveedores.

Asimismo quiero agradecer a Felipe Olate por enseñarme a usar los equipos y entregarme información de utilidad para la memoria.

Además, quiero agradecer a los profesores Raúl Quijada y Williams Calderon al disponer de su tiempo para ser integrantes de mi comisión.

Por otro lado, quiero dar las gracias a los compañeros Pedro Castillo, Loreto Flores y Jorge Maureira por su buena voluntad y prestar apoyo siempre que fuese necesario. Asimismo quiero reconocer a Óscar Salgado por ayudarme en los temas de formato y uso de programas como Latex para la escritura del trabajo.

Finalmente quiero agradecer al proyecto FONDECYT-ANID por financiar la memoria y al proyecto FONDEQUIP EQM150020 por prestar sus servicios de espectrometría Raman.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Energía Solar	3
1.2.1. Tecnologías	4
1.2.1.1. Paneles fotovoltaicos	4
1.2.1.2. Colectores Solares térmicos	5
1.2.1.3. Colectores solares híbridos térmicos fotovoltaicos (PV/T)	10
1.3. Calor	10
1.3.1. Conducción	11
1.3.2. Convección	11
1.3.3. Radiación	12
1.4. Nanofluidos	13
1.4.1. Nanofluidos en DASC	14
1.4.2. Preparación	17
1.4.2.1. Partículas en 2 dimensiones (2D)	20
1.4.3. Estabilidad	20
1.4.4. Propiedades ópticas	21
1.4.4.1. Absorción	21
1.4.4.2. Transmitancia	22
1.4.4.3. Dispersión	22
1.4.4.4. Coeficiente de extinción	22
1.4.5. Propiedades termofísicas de los nanofluidos	23
1.4.5.1. Densidad	23
1.4.5.2. Conductividad térmica	23
1.4.5.3. Capacidad calorífica específica	25
1.4.5.4. Viscosidad	25
1.4.5.5. Transferencia de calor por convección	27
1.4.6. Características que afectan a las propiedades del nanofluido	27
1.4.6.1. Forma de nanopartículas	27
1.4.6.2. Efecto de la Concentración de partículas	28
1.4.6.3. Efecto del Tamaño de partículas	31
1.4.6.4. Efecto de los surfactantes	33
1.4.6.5. Efecto de la intensidad radiativa	34
1.4.6.6. Efecto de la temperatura de operación	35
1.4.6.7. Efecto del pH	35
1.4.7. Nanofluidos en evaporación de agua	37
1.4.8. Disulfuro de Molibdeno (MoS_2)	39

1.4.8.1. DASC de MoS_2	43
2. Objetivos	45
2.1. Objetivo General	45
2.2. Objetivos específicos	45
3. Materiales y Metodología	46
3.1. Materiales y Equipos	46
3.1.1. Materiales	46
3.1.2. Equipos	47
3.2. Metodología	53
3.2.1. Preparación de nanopartículas	53
3.2.2. Preparación del nanofluido	54
3.2.3. Caracterización	54
3.2.4. Estabilidad	54
3.2.5. Estudio fototérmico de absorción de radiación solar con simulador solar . . .	54
3.2.6. Eficiencia de evaporación	55
3.2.7. Estudio fototérmico de absorción de radiación solar concentrada de 60 soles .	56
4. Resultados y Discusiones	58
4.1. Caracterización de partículas	58
4.1.1. Difracción de Rayos X (XRD)	58
4.1.2. Espectroscopia Raman	59
4.1.3. Espectroscopia UV-Visible	60
4.2. Estabilidad de fluidos	62
4.2.1. MoS_2	62
4.2.2. GO	63
4.3. Absorción de radiación	66
4.3.1. Transmitancia	66
4.3.2. Estudio térmico en Simulador solar	69
4.3.3. Evaporación en condiciones de laboratorio a intensidad de 1 sol en simulador solar	76
4.3.4. Estudio térmico en condiciones reales a 60 soles en Concentrador solar . . .	80
5. Conclusiones	83
Bibliografía	84
Anexos	94
Anexo A. Reactivos y especificaciones de equipos	95
A.1. Reactivos	95
A.2. Especificaciones de equipos	97
Anexo B. Comparación de transmitancia de nanofluidos por su concentración	102

Índice de Tablas

1.1.	Propiedades de algunos óxidos y sus nanofluidos. Tabla extraída de Xie <i>et al.</i> [82]. . .	26
1.2.	Comportamiento de la estabilidad de las suspensiones coloidales correspondiente a los valores del potencial zeta. Tabla extraída de [89]	31
3.1.	Reactivos utilizados. Se presentan sus recipientes en Anexo A.1	46
A.1.	Especificaciones técnicas de la centrifuga Supra R22	97
A.2.	Especificaciones de la unidad análoga de ultrasonidos Transsonic T700.	98
A.3.	Especificaciones técnicas del espectrofotómetro Rayleigh UV-1601.	98
A.4.	Especificaciones técnicas del Medidor de energía solar Modelo SP505.	99
A.5.	Especificaciones técnicas del simulador solar SF300B	100
A.6.	Especificaciones técnicas de la termocupla 88598 4ch K SD Logger	101

Índice de Ilustraciones

1.1.	Cambio en la temperatura media global en superficie. Las series temporales de las proyecciones y la medición de la incertidumbre (sombreado) se muestran en relación con los escenarios RCP2.6 (azul) y RCP8.5 (rojo). Las incertidumbres medias y asociadas, promediadas entre 2081 y 2100, Figuran en todos los escenarios de RCP indicadas con barras verticales de colores en el margen derecho de cada gráfico. Se indica asimismo el número de modelos de la quinta fase del Proyecto de comparación de modelos acoplados (CMIP5) utilizados para calcular la media multimodelos. Imagen extraída de IPCC[4].	2
1.2.	Espectro solar. El eje de la ordenada corresponde a la irradiancia en $Wm^{-2}nm^{-1}$ y la abscisa es la longitud de onda en nm. La línea negra continúa corresponde a la Ley de Planck para la emisión del cuerpo negro, el área amarilla corresponde a la radiación que llega a la superficie de la atmósfera terrestre y el área roja a la radiación al nivel del mar. Imagen extraída de [19].	4
1.3.	Clasificación de colectores solares [19].	7
1.4.	Esquema de a)colectores térmicos solares tradicionales y, b)absorción directa (DASC). Imagen extraída de Tahereh Gorji y A.A. Ranjbar [30]. c) Esquema de colector Solar Cilindro-Parabólico. Imagen extraída de Joardder <i>et al.</i> [35]	8
1.5.	a) Diagrama de Sistema Solar Directo termosifón con colector solar de placas planas, b) Diagrama de Sistema Solar Térmico Indirecto con colector solar de placas planas. Imagen extraída de [28].	9
1.6.	Comparación de sus redes de resistencia térmica, donde se muestran las resistencias a la radiación, a la conducción, convección y las propias de intercambiador de calor con R_{abs} , R_{cond} , R_{conv} y R_{HEX} , respectivamente para a) Colector solar tradicional y b) DASC. Imagen extraída de Tahereh Gorji y A.A. Ranjbar [30].	9
1.7.	a) Imagen TEM de Al_2O_3 de 100nm. Imagen extraída de Teng et al [39]. b y c) Imagen SEM y TEM de las nanopartículas de TiO_2 . Imágenes extraídas de Hozien <i>et al.</i> [40].	14
1.8.	Eficiencia del colector solar de placas planas para agua y nanofluido de CuO en el flujo másico óptimo. Imagen extraída de Jabari <i>et al.</i> [41].	15
1.9.	Esquema para la formulación del modelo de Colector Solar de Absorción Directa en 1-D con superficie transparente ($y=0$) y otras 3 superficies adiabáticas donde el sol apunta verticalmente a la superficie transparente. Imagen extraída de Chen <i>et al.</i> [45].	16
1.10.	Esquema para la formulación del modelo de Colector Solar de Absorción Directa en 2-D con superficie transparente ($y=0$) y otras 3 superficies adiabáticas. Imagen extraída de Chen <i>et al.</i> [46].	17
1.11.	Métodos de preparación de nanofluidos. Imagen extraída de Muhammad y Yusuf [52].	18
1.12.	Mecanismo propuesto para el proceso de LPE. La eficiencia del solvente para LPE debe tener la mejor correspondencia de los componentes de la tensión superficial con el material 2D deseado. Imagen extraída de Shen <i>et al.</i> [53].	19

1.13.	Diferentes formas de materiales basados en el grafeno considerados para aplicaciones biomédicas. Imagen extraída de Bullock y Bussy. [60].	20
1.14.	Diferentes escenarios de nanofluidos estables (a) e inestables (b-d). Imagen extraída de Bergmann <i>et al.</i> [61]Revisar esta referencia.	21
1.15.	Comportamiento del coeficiente de extinción experimental y analítico para el nanofluido binario de $\gamma - Al_2O_3$ y CuO en agua vs la longitud de onda para distintas fracciones volumétricas. Imagen extraída de Menbari <i>et al.</i> [67].	23
1.16.	Impacto de la orientación de la partícula y razón de aspecto en la viscosidad de una suspensión a través del coeficiente de Einstein B . Coeficiente de Einstein en función de la razón de aspecto para: partículas orientadas inicialmente de forma aleatoria (línea de puntos); todas las partículas orientadas para maximizar la viscosidad (línea discontinua); todas las partículas orientadas para minimizar la viscosidad (línea sólida); y los dos signos más son calculados mediante el enfoque de Brenner a partir de los datos experimentales de la tabla 6 de Anczurowski y Mason [78]; los dos asteriscos son de Pabst <i>et al.</i> [79]. Imagen extraída de Mueller <i>et al.</i> [80].	26
1.17.	Incremento de temperatura a); eficiencia fototérmica b) del nanofluido con nanopartículas de plata esféricas, cúbicas y agua (S-Ag, C-Ag y H ₂ O, respectivamente). Imagen extraída de Campos <i>et al.</i> [83].	27
1.18.	Relación de la conductividad térmica entre el nanofluido y el fluido base para 2 formas distintas de partículas y concentraciones volumétricas.Imagen extraída de Jeong <i>et al.</i> [84].	28
1.19.	Viscosidad (a) y Conductividad Térmica (b) de nanofluidos versus la concentración de nanopartículas de SiO_2 de 25nm. La líneas negras corresponden a los modelos numéricos de las ecuaciones 1.34 y 1.35 para a y b, respectivamente y los puntos los valores experimentales. Imagen extraída de Minakov <i>et al.</i> [86].	29
1.20.	Viscosidad relativa del nanofluido de CuO . A la izquierda se aplicó velocidad de cizallamiento de $\gamma = 100s^{-1}$ y a la derecha $\gamma = 1000s^{-1}$. Imagen extraída de Yapici <i>et al.</i> [87].	29
1.21.	Viscosidad relativa del nanofluido de CuO . A la izquierda se aplicó velocidad de cizallamiento de $\gamma = 100s^{-1}$ y a la derecha $\gamma = 1000s^{-1}$. Imagen extraída de Yapici <i>et al.</i> [87].	30
1.22.	El valor absoluto del potencial Zeta del nanofluido de CNT a diferentes temperaturas para concentraciones de CNT de 0.005, 0.05 y 0.1 % en fracción volumétrica. Imagen extraída de Li <i>et al.</i> [88].	31
1.23.	Variación de la relación de conductividad térmica (k_e/k_f) en función del tamaño de nanopartícula de dispersa en etilenglicol para los símbolos vacíos y en agua para los símbolos rellenos para a) $AlCu_2$ y b) Ag_2Al . Imágenes extraídas de Chorpkar <i>et al.</i> [91].	32
1.24.	Viscosidad (a) y Conductividad Térmica (b) de nanofluidos versus el tamaño de nanopartículas de SiO_2 en el censo de concentración al 2 %. Imagen extraída de Minakov <i>et al.</i> [86].	33
1.25.	Eficiencia térmica en función de la intensidad radiativa para distintas concentraciones del nanofluido a base de CeO_2 . Imagen extraída de Sharma y Tiwari[94].	34
1.26.	Variación de la eficiencia del colector solar con la radiación solar para diferentes tipos de nanofluidos. Imagen extraída de Kaya y Arslan[95].	35
1.27.	Impacto del pH en el coeficiente de dispersión de nanopartículas de TiO_2 con diferente fracción volumétrica de partículas a diferentes longitudes de onda. Imagen extraída de Al-Geroby y Pinar [97].	36

1.28.	a) Variación de la viscosidad de los nanofluidos con diferentes pH y fracciones másicas a 303K. b) Relación de conductividad térmica de las nanosuspensiones a diferentes valores de pH. Imágenes extraídas de Xian-Ju y Xin-Fang [98].	37
1.29.	Eficiencia fototérmica de calentamiento, evaporación y total de los 3 montajes estudiados bajo el poder de iluminación solar de 5 soles. Imagen extraída de Wang <i>et al.</i> [99].	38
1.30.	Esquema del montaje experimental para la generación de vapor solar. Imagen extraída de Liu <i>et al.</i> [100].	39
1.31.	Vistas superiores de la estructura atómica de tres fases masivas de MoS ₂ , como 2H, 1T y 3R. Imagen extraída de Gajanan y Hussainn [102].	40
1.32.	A la izquierda se encuentra el espectro de absorción UV-Visible de nanohojas de MoS ₂ exfoliadas por Au ₂₅ – BSA a diferentes valores de pH. A la derecha la relación entre el valor del pH de las nanohojas de MoS ₂ y su intensidad de absorción con las imagenes opticas correspondientes. Imagen extraída de Lu <i>et al.</i> [46].	41
1.33.	a).Patrón de XRD del bulk de MoS ₂ (MoS ₂) y del MoS ₂ exfoliado a 130°C por 2 horas (MoS ₂ E). b) Espectro Raman del bulk de MoS ₂ (MoS ₂) y del MoS ₂ exfoliado a 130°C por 2 horas (MoS ₂ E). c)Espectro de absorción del bulk de MoS ₂ (MoS ₂) y del MoS ₂ exfoliado a 130°C por 2 horas (MoS ₂ E). Imágenes extraídas de Baby y Rajeev [108].	42
1.34.	a) imagen SEM del bulk de MoS ₂ , b-k MoS ₂ exfoliado a diferentes temperaturas hidrotermales y tiempos. b) 110 °C por 2 h, c) 110 °C por 4 h, d) 110 °C por 6 h, e) 120 °C por 2 h, f) 120 °C por. Imagen extraída de Baby y Rajeev [108].	43
1.35.	a) TEM del bulk de MoS ₂ y b-e) MoS ₂ exfoliado a 130°C durante 2 horas. Imagen extraída de Baby y Rajeev [108].	44
3.1.	Balanza analítica Precisa 100A-300M.	47
3.2.	Agitador magnético.	47
3.3.	Sonicador de cañon Sonic Vibra-Cell.	48
3.4.	Centrífuga Supra 22K Hanil.	49
3.5.	Baño de ultrasonido.	50
3.6.	Termocupla de 4 canales "88598 AZ EBçon memoria SD.	50
3.7.	Medidor de radiación solar Modelo SP505 Extech.	51
3.8.	Simulador solar modelo SF300B de SCIENCETECH	52
3.9.	Espectro simulador solar SF300 con filtro AM1.5G.	52
3.10.	Termocupla de 4 canales "88598 AZ EBçon memoria SD.	53
3.11.	Montaje de estudio de medición de evolución de temperatura para fluidos y nanofluidos.	55
3.12.	Montaje de estudio de eficiencia de evaporación de fluidos y nanofluidos.	56
3.13.	Montaje de equipo concentrador de radiación solar con un disco parabólico de factor 60.	57
4.1.	Difracción de Rayos X (XRD) para las nanoláminas exfoliadas de MoS ₂	59
4.2.	Espectroscopía Raman para las nanoláminas exfoliadas de MoS ₂	60
4.3.	Espectro de absorción del bulk de MoS ₂ y las partículas exfoliadas de este material en las longitud de onda 350 a 800nm. La medición fue realizada a la concentración de 500ppm aunque normalizado.	61
4.4.	Espectro de absorción del GO. La medición fue realizada a la concentración de 50ppm entre 200 y 800nm.	61

4.5.	Estabilidad de bulk de MoS_2 . La imagen a) corresponde al bulk a 500ppm recién agitado en $t=0$, mientras que b) 69h y 24min o 4164 min después de la imagen a) . . .	62
4.6.	Nanofluido de GO a distintas concentraciones en tiempo a) $t=0$ min; b) $t=93$ h y 38min o 5618 min después. La concentración es de 50, 100, 200 y 500ppm desde izquierda a derecha.	64
4.7.	Nanofluido de MoS_2 a distintas concentraciones en tiempo a) $t=0$ min; b) $t=22$ h o 1320min después; y c) $t=90$ h y 42 min o 5442min después. La concentración es de 50, 100, 200 y 500ppm desde izquierda a derecha.	65
4.8.	Transmitancia de los nanofluido de MoS_2 a distinta concentración de partículas, y la irradiancia solar a nivel de la tierra en el ángulo cenital solar de 48.2° en $Wm^{-2}nm^{-1}$	67
4.9.	Transmitancia de los fluido de MoS_2 a 500ppm de partículas sin exfoliar (bulk) y exfoliadas, y la irradiancia solar a nivel de la tierra en el ángulo cenital solar de 48.2° en $Wm^{-2}nm^{-1}$	68
4.10.	Transmitancia de los nanofluidos de GO a las concentraciones de 50, 100, 200 y 500ppm, y la irradiancia solar a nivel de la tierra en el ángulo cenital solar de 48.2° en $Wm^{-2}nm^{-1}$	69
4.11.	Aumento de temperatura para el nanofluido de MoS_2 a distintas concentraciones cuando reciben luz del simulador solar a 1 sol con una diferencia de 11.6cm de la fuente de poder.	70
4.12.	Aumento de temperatura para el fluido (bulk) y nanofluido de MoS_2 a la concentración de 500ppm que reciben luz del simulador solar a 1 sol con una diferencia de 11.6cm de la fuente de poder.	71
4.13.	Eficiencia fototérmica de nanofluido de MoS_2 a distinta concentración de partícula a la intensidad de 1 sol.	72
4.14.	Eficiencia fototérmica de fluido de MoS_2 a 500ppm de bulk y exfoliado a la intensidad de 1 sol.	72
4.15.	Aumento de temperatura para el nanofluido de GO a distintas concentraciones cuando reciben luz del simulador solar a 1 sol con una diferencia de 11.6cm de la fuente de poder.	74
4.16.	Eficiencia fototérmica de nanofluido de GO a distinta concentración de partícula a la intensidad de 1 sol.	74
4.17.	Aumento de temperatura para el nanofluido de MoS_2 a 100ppm y de GO a 500ppm cuando reciben luz del simulador solar a 1 sol con una diferencia de 11.6cm de la fuente de poder.	75
4.18.	Eficiencia fototérmica de nanofluido de MoS_2 a 100ppm y GO a 500ppm a la intensidad de 1 sol.	75
4.19.	Mejora de eficiencia de evaporación en comparación al agua para los nanofluidos de MoS_2 (amarillo) y GO (rojo) a distinta concentración de partículas e intensidad del simulador solar de 1 sol. Nivel de significancia (*)=0.05; (**)=0.01; (***)=0.001; y (****)=0.0001	78
4.20.	Mejora de eficiencia de evaporación en comparación a la concentración de partículas de 50ppm (rojo), 100ppm (verde), 200ppm (azul) y 500ppm (celeste) para los nanofluidos de MoS_2 y GO a la intensidad del simulador solar de 1 sol. Nivel de significancia (*)=0.05; (**)=0.01; (***)=0.001; y (****)=0.0001	79
4.21.	Mejora de eficiencia de evaporación en comparación al agua para el fluido de MoS_2 sin exfoliar (bulk) y exfoliado a una concentración de 500ppm e intensidad del simulador solar de 1 sol. Nivel de significancia (*)=0.05; (**)=0.01; (***)=0.001; y (****)=0.0001.	79

4.22.	Temperatura del nanofluido de MoS_2 a las concentraciones de 50, 100, 200 y 500ppm a una intensidad de 60 soles.	81
4.23.	Temperatura del nanofluido de GO a las concentraciones de 50, 100, 200 y 500ppm a una intensidad de 60 soles.	82
4.24.	Temperatura del nanofluido de MoS_2 y GO a 100ppm y 500ppm a la intensidad de 60 soles, respectivamente.	82
A.1.	Ácido Acético (glacial) al 100 % (CH_3COOH). Marca Merck	95
A.2.	Polvo de Disulfuro de Molibdeno (MoS_2) $<2\mu m$, 99%. Marca Sigma Aldrich	96
A.3.	Quitosano Peso Molecular Medio. Quitina Desacetilada, Poli(D-glucosamina). Marca Sigma Aldrich.	97
B.1.	Transmitancias de nanofluidos de MoS_2 y GO a 50ppm, y la irradiancia solar a nivel de la tierra en el ángulo cenital solar de 48.2° en $Wm^{-2}nm^{-1}$	102
B.2.	Transmitancias de nanofluidos de MoS_2 y GO a 100ppm, y la irradiancia solar a nivel de la tierra en el ángulo cenital solar de 48.2° en $Wm^{-2}nm^{-1}$	103
B.3.	Transmitancias de nanofluidos de MoS_2 y GO a 200ppm, y la irradiancia solar a nivel de la tierra en el ángulo cenital solar de 48.2° en $Wm^{-2}nm^{-1}$	103
B.4.	Transmitancias de nanofluidos de MoS_2 y GO a 500ppm, y la irradiancia solar a nivel de la tierra en el ángulo cenital solar de 48.2° en $Wm^{-2}nm^{-1}$	104
B.5.	Transmitancias de nanofluidos de MoS_2 y GO a la concentración de 100 y 500ppm, respectivamente, y la irradiancia solar a nivel de la tierra en el ángulo cenital solar de 48.2° en $Wm^{-2}nm^{-1}$	104

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

El cambio climático es definido por la NASA como “una amplia gama de fenómenos globales creados predominantemente por la quema de combustibles fósiles, que añaden a la atmósfera de la Tierra gases que atrapan el calor. Estos fenómenos incluyen a las tendencias de aumento de la temperatura descritas por el calentamiento global, pero también abarcan cambios como el aumento del nivel del mar; la pérdida de masa de hielo en Groenlandia, la Antártida, el Ártico y los glaciares de montaña en todo el mundo; los cambios en la floración de las flores/plantas; y los eventos climáticos extremos”[1]. Este impacto afecta a todo el planeta provocando riesgos en la salud humana, la vida silvestre y costos para la sociedad y economía causados por los eventos mencionados en la definición.

El mismo organismo estadounidense describe el calentamiento global como “el aumento inusualmente rápido de la temperatura media de la superficie de la Tierra durante el último siglo, debido principalmente a los gases de efecto invernadero liberados por las personas que queman combustibles fósiles”[2]. Este aumento de la temperatura promedio del planeta es causado por el forzamiento radiativo ocasionado por la concentración de Gases de Efecto Invernadero (GEI) en la atmósfera como el dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), dióxido de azufre (SO_2) y varios otros. El CO_2 es el más abundante de estos gases y su principal fuente de emisión es la quema de combustibles fósiles [3].

En el informe de Síntesis de Cambio Climático 2014 elaborado por el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés), se plantearon distintos escenarios de emisión de GEI al ambiente para finales del siglo XXI, dónde se estima un aumento entre 0.3 a 4.8°C con respecto al período 1986-2005 dependiendo del nivel de emisiones como se muestra en la Figura 1.1[4]. A causa de esto, es que se han estado realizando conferencias a nivel global (Conferencia de las Partes o COP por sus siglas en inglés) para poder combatir el calentamiento global, dónde una de las más conocidas fue la COP21 en el 2015, en la cual se llegó al acuerdo (Acuerdo de París) de alcanzar al final del siglo XXI un aumento máximo de temperatura de 2°C en comparación al periodo pre-industrial [5]. Para lograr ese objetivo, es que las 190 partes participantes se propusieron metas para ayudar a cumplir con el acuerdo. Por ejemplo en Chile, el compromiso es ser carbono neutral para el 2050, y para lograrlo, uno de los pasos más importante es trabajar en el cambio de la matriz energética de energías basadas en combustibles fósiles a Energías Renovables No Convencionales (ERNC) [6]

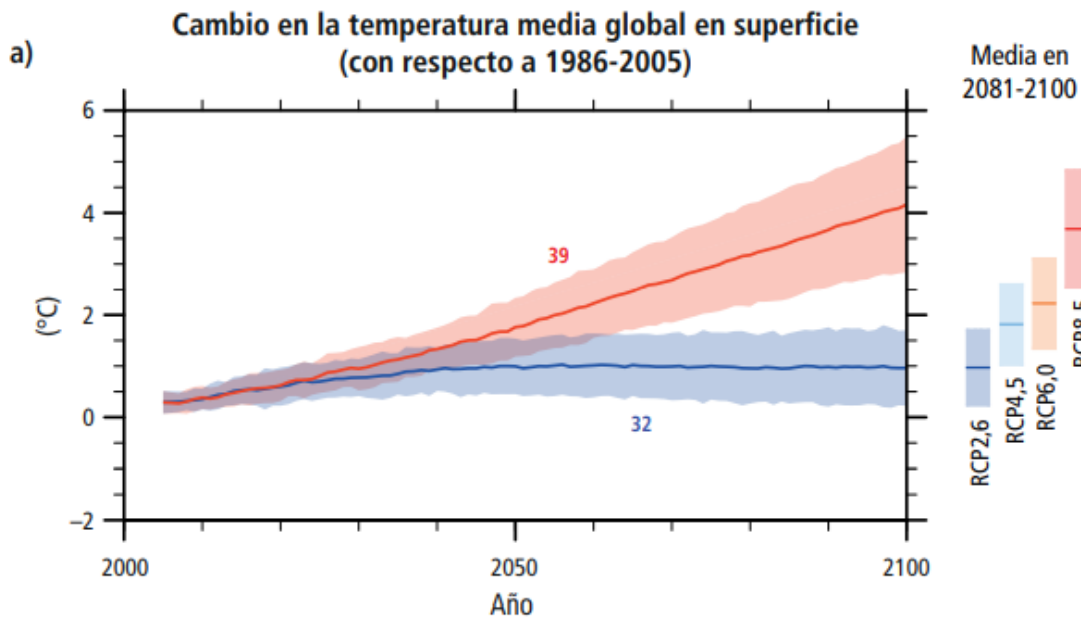


Figura 1.1: Cambio en la temperatura media global en superficie. Las series temporales de las proyecciones y la medición de la incertidumbre (sombreado) se muestran en relación con los escenarios RCP2.6 (azul) y RCP8.5 (rojo). Las incertidumbres medias y asociadas, promediadas entre 2081 y 2100, Figuran en todos los escenarios de RCP indicadas con barras verticales de colores en el margen derecho de cada gráfico. Se indica asimismo el número de modelos de la quinta fase del Proyecto de comparación de modelos acoplados (CMIP5) utilizados para calcular la media multimodelos. Imagen extraída de IPCC[4].

Los combustibles fósiles son la principal fuente de energía a nivel mundial, siendo responsables de emitir 35.68 Gt de CO_2 a la atmósfera en el 2016. Del total de emisiones por combustibles fósiles, 15.01 Gt (42 % de las emisiones totales de CO_2) correspondieron a la producción de electricidad y calor. Además, se estimó que en el mismo año, el 73.2 % de las emisiones de GEI provinieron del sector energético que considera la energía usada en la industria, en construcción, transporte, entre otras.

La fuentes de energía primaria corresponde a las fuentes donde la energía es aprovechada directamente como se encuentran en la naturaleza, por lo que no requieren un proceso de transformación para ser utilizadas como el combustible antes de quemarlo o la energía eólica antes de convertirla en electricidad[7][8]. En el 2019 el 84.9 % de la energía primaria provino de combustibles fósiles, el 15.7 % restante a las energías bajas en carbono (incluyen renovables no convencionales y energía nuclear), y de este total, un 11.4 % de la energía producida fue por renovables como hidroeléctrica (6.4 %), eólica (2.2 %), solar (1.1 %), biocombustibles (0.7 %) y otras energías renovables (0.9 %) [9]. Ahora bien, enfocándose solamente en la generación de electricidad provenientes de la energía primaria (y excluyendo el sector transporte y combustibles para calefacción), el porcentaje de combustibles fósiles es de un 63.3 %, la nuclear a un 10.4 % y el resto del total a las renovables, con un 15.8 % en energía hidroeléctrica, eólica un 5.3 %, solar 2.7 % y el 2.5 % restante a otros tipos de ERNC [9]. Cabe mencionar que en el año 2019, el 26.4 % de la energía eléctrica residencial en Estados Unidos se utilizó en forma de calor para calentar espacios y agua [10], lo que abre la posibilidad de reemplazar esa fracción usada en forma de calor por otros medios que no emitan CO_2 .

Para combatir el cambio climático y el calentamiento global, las ERNC son buena alternativa [11] pues presentan ciertas ventajas en comparación a las provenientes de combustibles fósiles, como ser infinitas, requerir menos mantención, ser más económica su producción, reducir la dependencia de la energía extranjera y tener beneficios para la salud y medioambiente al no emitir GEI ni contaminantes atmosféricos durante la producción. Sin embargo, también presentan ciertas desventajas como altos costos de inversión inicial, intermitencia, dificultad de almacenamiento y limitantes geográficas [12], siendo necesario seguir estudiándolas.

1.2. Energía Solar

El sol entrega un flux de radiación de 1367 W m^{-2} a la tierra, también conocido como constante solar extraterrestre, donde el 56 % corresponde al espectro del infrarrojo (700nm-3000nm), 36 % al Visible (400nm-700nm) y solo un 7 % al ultravioleta (300-400 nm), todo esto para la superficie de la atmósfera. Debido a los componentes en la atmósfera, como el ozono que absorbe parte de la radiación ultravioleta, el agua que absorbe parte del infrarrojo, y otros gases como el oxígeno, nitrógeno, etc, que absorben radiación del resto del espectro, es que a la superficie de la tierra la cantidad de energía que llega se reduce alrededor del 40 %, y a consecuencia de los gases en la atmósfera, la distribución del espectro que llega también cambia a 47 % el infrarrojo, 50 % Visible y solamente el 3 % UV. El flujo total de energía anual que llega a la superficie de la tierra es de $1.08 \cdot 10^8 \text{ GW}$, lo que equivale entre 7000 y 8000 veces más que la energía primaria consumida anualmente en el planeta [13]. El espectro solar se presenta en la Figura 1.2

La energía solar es una opción viable para reemplazar a los combustibles fósiles por poseer las ventajas mencionadas anteriormente al ser una ERNC. Actualmente es utilizada en el área industrial, comercial y residencial en generación de energía, iluminación y calor. Para ser aprovechada se tienen distintas tecnologías como los paneles fotovoltaicos o colectores solares térmicos [14]. En Estados Unidos, el uso de energía solar fotovoltaica ha ido en aumento en los últimos años en el área residencial e industrial, causado por la evolución de la tecnología en esta área y la reducción en sus costos de operación, implementación y mantención, traducándose en cada vez mayor ahorro para los usuarios[15].

Además de la gradual reducción en los costos de operación, implementación y mantención de los equipos empleados en la energía solar, la posibilidad de aplicarlos en espacios reducidos los hace una opción factible por sobre el resto de energías renovables en lugares residenciales. Por ejemplo, la energía eólica requiere de grandes terrenos; la hidroeléctrica también requiere de vastos espacios además de un constante flujo de agua; la biomasa precisa material constantemente que no puede ser producido en el hogar además de emitir Compuestos Orgánicos Volátiles (COV) y óxidos nitrosos (NOx) [16] [17] que son perjudiciales para el ser humano [18], etc.

Spectrum of Solar Radiation (Earth)

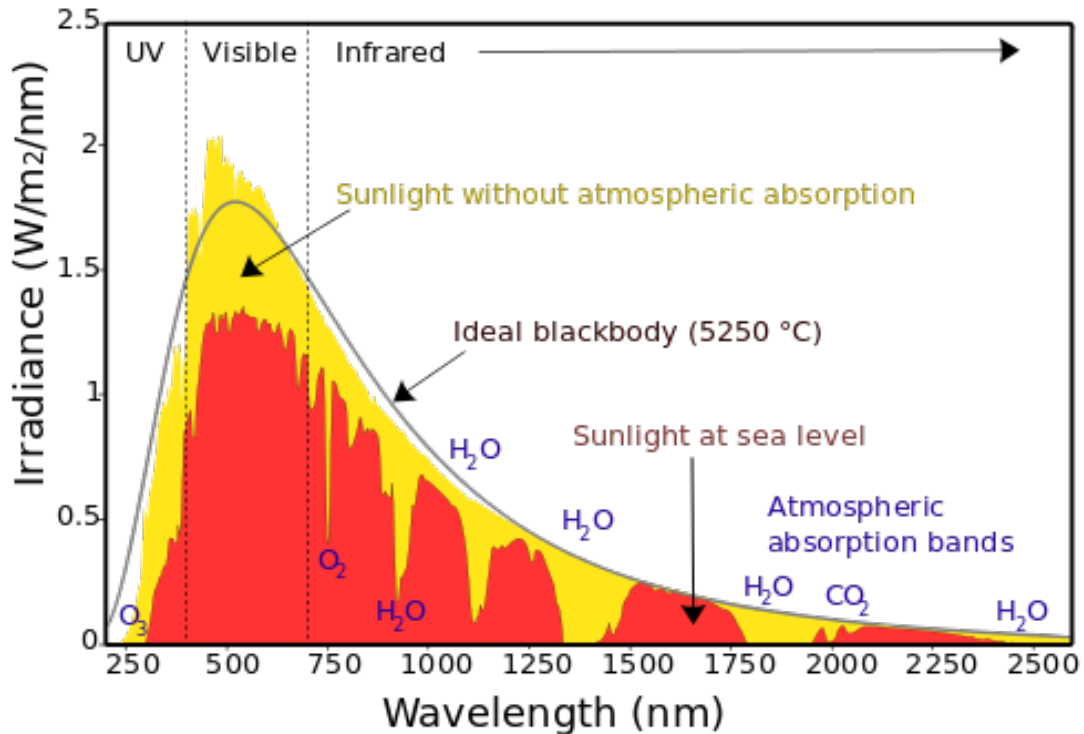


Figura 1.2: Espectro solar. El eje de la ordenada corresponde a la irradiancia en $Wm^{-2}nm^{-1}$ y la abscisa es la longitud de onda en nm. La línea negra continua corresponde a la Ley de Planck para la emisión del cuerpo negro, el área amarilla corresponde a la radiación que llega a la superficie de la atmósfera terrestre y el área roja a la radiación al nivel del mar. Imagen extraída de [19].

1.2.1. Tecnologías

Existen distintos tipos de tecnologías que utilizan la energía solar, donde la más conocida son los paneles fotovoltaicos, no obstante, en el 2017 cerca de 476.9 GW fueron producidos a nivel mundial con colectores térmicos solares, lo que correspondió al 54.1% de la capacidad energética solar global y el 45.9% restante en solar fotovoltaica equivalente a 405GW [20]. En la Figura 1.3 se presentan las distintas tecnologías de colectores solares.

1.2.1.1. Paneles fotovoltaicos

Los paneles fotovoltaicos al absorber los fotones del sol liberan electrones que al ser capturados generan electricidad[21], presentando una eficiencia de absorción de radiación de 15-20% [22] y se utilizan para producir electricidad.

El uso de esta tecnología ha ido en aumento con el crecimiento de la demanda energética a nivel mundial. Al ser utilizada como ERNC, presenta las mismas dificultades de costo inicial, pero también los beneficios de los bajos costos operaciones y de mantención. No obstante, ha obtenido

gran popularidad a medida que se reduce el precio de los módulos fotovoltaicos [21].

A pesar de la variedad de materiales que se ha descubierto para los paneles fotovoltaicos, el 80 % del mercado de paneles fotovoltaicos corresponde a tecnologías de silicio, esto debido a que tienen un valor considerablemente menor al resto. Las otras tecnologías son celdas de selenio de cobre, indio y galio, polímeros, nanomateriales, materiales orgánicos, entre otros, que siguen en estudio[23] que se pueden observar en la rama izquierda de la Figura 1.3.

1.2.1.2. Colectores Solares térmicos

Los colectores térmicos absorben la radiación y transfieren la energía en forma de calor. Estos, a diferencia de los paneles fotovoltaicos, presentan una eficiencia del 60-80 % [22] y se utilizan para calentar y calefaccionar espacios y agua[19], aunque en menor medida también son aprovechados para obtener energía eléctrica con los colectores concentradores térmicos [24].

Existen distintas tecnologías relacionadas con los colectores térmicos solares como se presentan en la Figura 1.3, que depende de la aplicación de calentamiento o evaporación de agua, la potencia y magnitud requerida [25][26]. Los no concentradores absorben la radiación directamente en placas o superficies para calentarse y transferir la energía en forma de calor a un fluido de trabajo como aire, agua, etilenglicol, entre otros. Esta tecnología alcanza temperaturas entre 80 y 120°C, así que en virtud del rango alcanzado se utiliza principalmente en espacios residenciales. Se presenta en la Figura 1.4a un esquema de un colector térmico solar de placas planas donde hay una superficie transparente que permite el paso de la radiación y aísla las pérdidas de calor por convección, la superficie absorbidora de radiación, el fluido de trabajo que está en contacto con la superficie absorbidora y una base aislante.

La otra tecnología de colectores solares térmicos corresponde a los equipos concentradores que reflejan la radiación con superficies reflectantes y la concentran en un punto que la absorbe. Estos se clasifican en temperatura media y alta alcanzando valores cercanos a 400 y 1000°C, respectivamente. Se utilizan para generación de electricidad, calefacción de grandes espacios como hospitales o plantas de alimentos [27]. En la Figura 1.4c se muestra un Colector Concentrador Cilindro-Parabólico.

Existen 2 formas de utilizar los colectores solares, de manera directa e indirecta, como se presentan en la Figura 1.5a y b, respectivamente. En el sistema directo se presenta un termosifón, en este, el colector absorbe la radiación y se calienta, mientras tanto, circula un fluido de trabajo dentro de este para ir extrayendo el calor, donde este mismo es acumulado para ser utilizado posteriormente. El sistema indirecto también funciona con un colector que absorbe la radiación, sin embargo, el fluido de trabajo solo extrae el calor, el cual pasa por un intercambiador de calor para transferirlo a un otro fluido más frío que requiera ser calentado. En general, el sistema indirecto se utiliza cuando el fluido de trabajo se le agregan otros componentes como anticongelante y no puedan ser utilizados directamente, pero presentan otras propiedades que pueden ser más útiles como menor viscosidad, mayor punto de ebullición, menor punto de fusión, entre otras[28][29].

Los materiales utilizados para la absorción y transferencia de calor en los colectores solares térmicos deben ser térmicamente estables como el aluminio, ciertos polímeros, el cobre, entre otros,

y absorber la radiación en gran parte del espectro solar, es por ello que se les puede aplicar una capa superficial negra en caso de presentar baja absorción. Estos equipos presentan grandes pérdidas de calor por convección y radiación al ambiente y conducción de la superficie al resto de los componentes del aparato [30].

De acuerdo al estudio de Thomas *et al.*[31], para la superficie absorbente en los colectores solares térmicos se están utilizando semiconductores que se escogen por su banda prohibida (bandgap). La importancia de este parámetro es que el material absorbe casi la totalidad de los fotones con mayor energía que el valor de la bandgap y muy pocos para los de menor. Estos materiales presentan menor absorción en comparación a los metálicos debido a que estos últimos no presentan bandgap al superponerse la banda de valencia con la de conducción[32], en cambio, los metales presentan mayor emisividad en el infrarrojo lo que se traduce en mayor pérdida energética por radiación. No obstante, los semiconductores con bandgap “pequeñas” (entre 0.6 y 1.4 eV) tienen un alto índice de refracción reduciendo la radiación absorbida y en general está la necesidad de aplicarles revestimientos que son bastante emisivos en el infrarrojo posicionando a estos materiales con baja bandgap como materiales no aptos para las aplicaciones térmicas.

Además de las pérdidas de energía mencionados anteriormente, los colectores de superficie tradicionales presentan 4 resistencias térmicas a la absorción de energía: la resistencia a la radiación (R_{abs}), conducción (R_{cond}), convección (R_{conv}) y las que se encuentran en el intercambiador de calor (R_{HEX}) como se presenta con la analogía de redes de resistencias en la Figura 1.6a. Las resistencias térmicas pueden asemejarse a las resistencias eléctricas, ya que se define como la relación entre la diferencia de temperatura (entre la fuente caliente y fría) (ΔT) y el flux de calor (\dot{Q}) como se muestra en la ecuación 1.1 para una dimensión[33]. Como las resistencias son proporcionales a la diferencia de temperatura, entre mayor sea esta, más lenta es la transferencia de calor ya que éstas son inversamente proporcional al Coeficiente de Transferencia de Calor, también conocido como factor- U [34] y se presenta en la ecuación 1.2.

$$R_h = \frac{\Delta T}{\dot{Q}_t} \quad (1.1)$$

$$AU = \frac{1}{R_{total}} \quad (1.2)$$

Donde A es el área de transferencia, U es el coeficiente de transferencia de calor, y R_{total} es la resistencia total que se puede calcular de 2 formas distintas dependiendo de si la red de resistencias están en serie o en paralelo siguiendo la misma analogía de las resistencias eléctricas, como se muestra en las ecuaciones 1.3 y 1.4, respectivamente.

$$R_{total} = R_1 + R_2 + \dots + R_n \quad (1.3)$$

$$\frac{1}{R_{total}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} \quad (1.4)$$

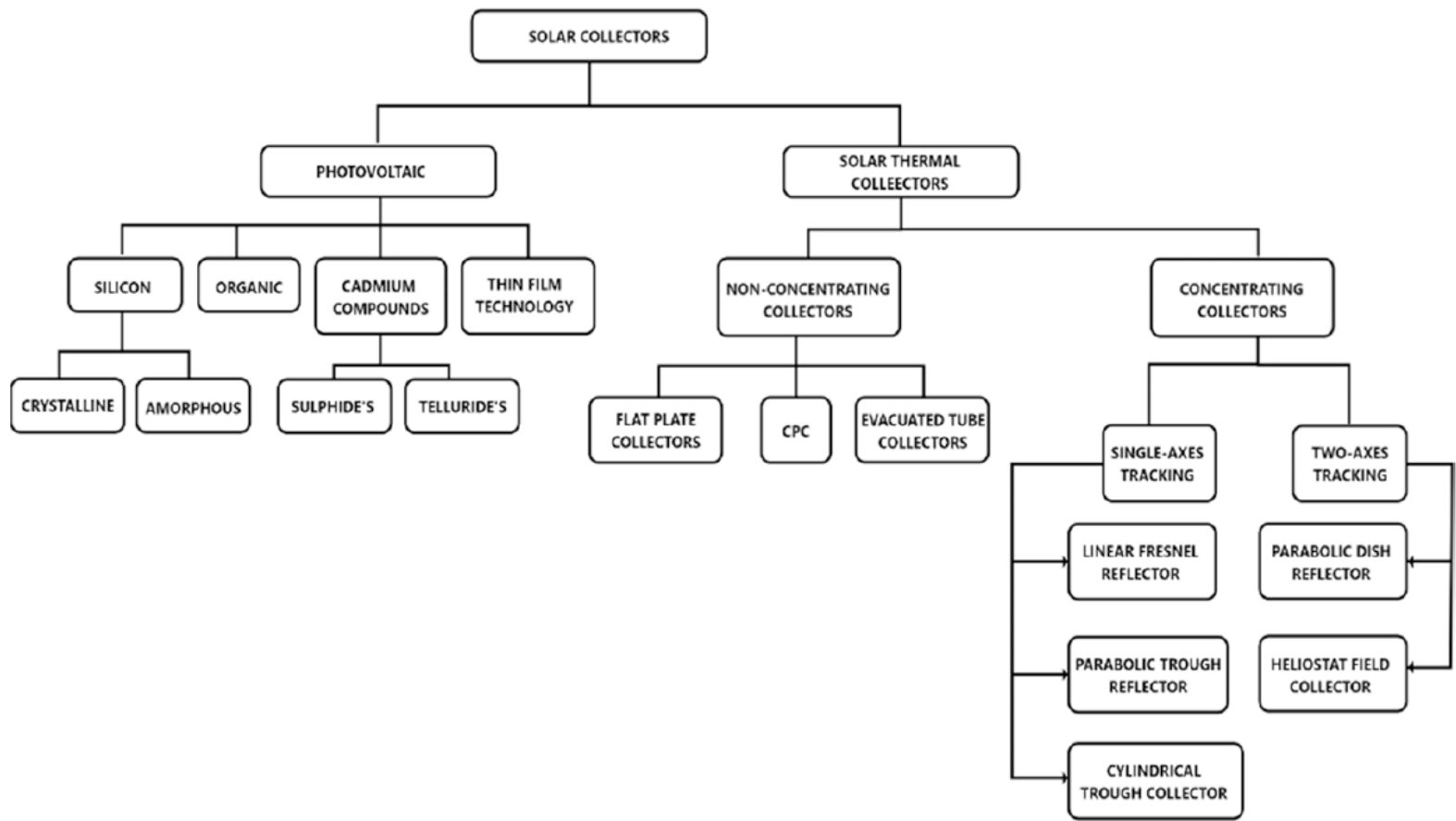


Figura 1.3: Clasificación de colectores solares [19].

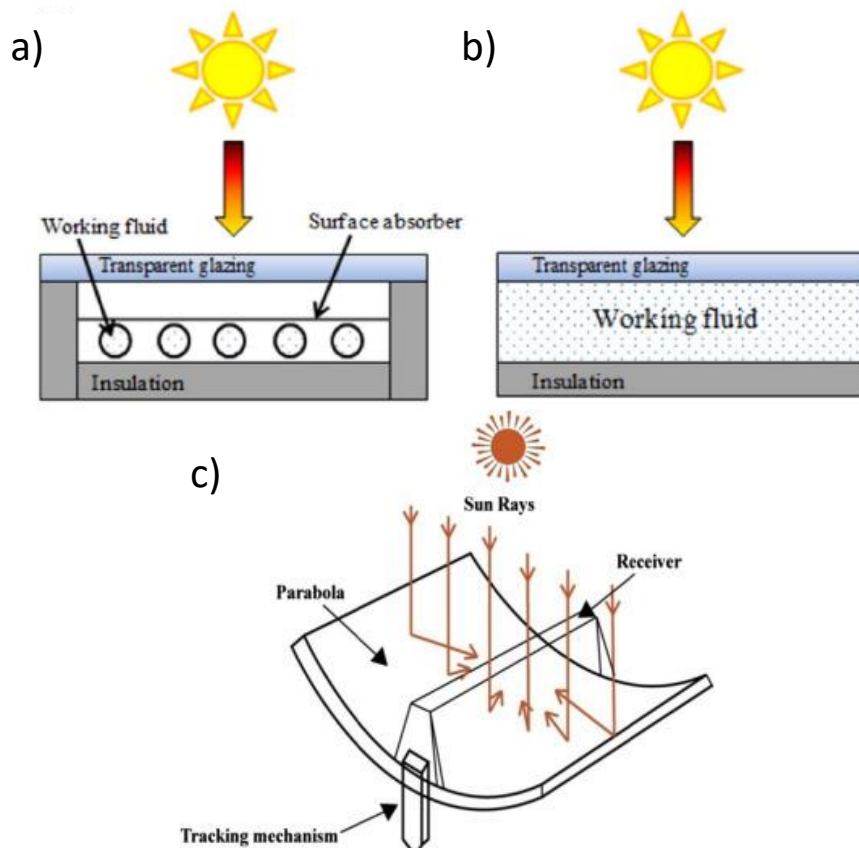


Figura 1.4: Esquema de a) colectores térmicos solares tradicionales y, b) absorción directa (DASC). Imagen extraída de Tahereh Gorji y A.A. Ranjbar [30]. c) Esquema de colector Solar Cilindro-Parabólico. Imagen extraída de Joardder *et al.* [35]

Los colectores térmicos solares funcionan con fluidos de trabajo que extraen el calor de las superficies absorbentes, siendo los responsables de las resistencias R_{cond} y R_{conv} al tener que transferirse la energía de un medio a otro y en si mismo, reduciendo la velocidad de transferencia de calor. Los fluidos que se utilizan en estos equipos dependen del rango de temperaturas en que se opere, pues hay que tener en consideración el punto de fusión, ebullición, inflamación, viscosidad, coeficiente de expansión y capacidad térmica de éstos [36]. Para los no concentradores es factible emplear una mezcla de agua con etilenglicol, mientras que en los concentradores se utilizan aceites con mayores puntos de ebullición [29].

Los fluidos de trabajo se utilizan para transferir el calor absorbido desde las placas a los intercambiadores de calor necesarios que distribuirán la energía donde sea necesario. Estas placas son necesarias para absorber la radiación pues los fluidos comúnmente utilizados presentan baja absorbancia, por lo que absorben poca energía en comparación a las placas. Esto se traduce en que si el fluido fuera el encargado de recibir la radiación para transformarla en calor, absorbería menos energía y alcanzaría menores temperatura en igual unidad de tiempo y área que las superficies utilizadas actualmente.

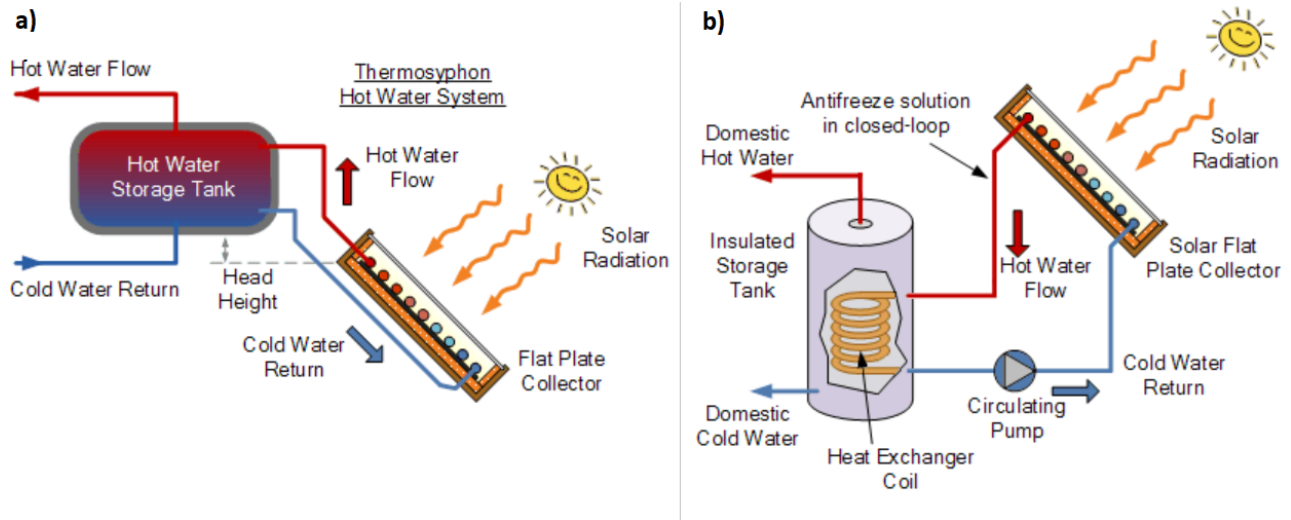


Figura 1.5: a) Diagrama de Sistema Solar Directo termosifón con colector solar de placas planas, b) Diagrama de Sistema Solar Térmico Indirecto con colector solar de placas planas. Imagen extraída de [28].

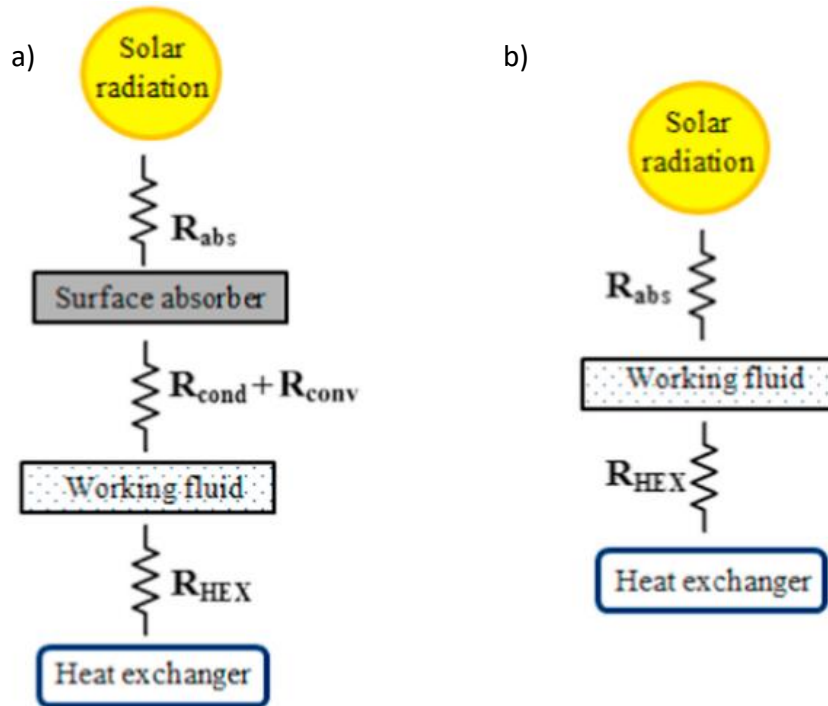


Figura 1.6: Comparación de sus redes de resistencia térmica, donde se muestran las resistencias a la radiación, a la conducción, convección y las propias de intercambiador de calor con R_{abs} , R_{cond} , R_{conv} y R_{HEX} , respectivamente para a) Colector solar tradicional y b) DASC. Imagen extraída de Tahereh Gorji y A.A. Ranjbar [30].

Colectores Solares de Absorción Directa (DASC)

A causa de las pérdidas de energía y el número de resistencias presentadas por los colectores solares tradicionales, es que surge la idea de los Colectores Solares de Absorción Directa (DASC por sus siglas en inglés), en la Figura 1.4b se presenta un esquema de los DASC, donde el fluido de trabajo se encuentra entre una superficie superior transparente y una inferior aislante, dejando que solamente el fluido absorba la radiación solar y transfiera directamente el calor a los intercambiadores necesarios. Estos no presentan una superficie absorbente de radiación fija que tenga que transferir el calor al fluido de trabajo para poder transportar el calor, sino que el fluido de trabajo es el que absorbe directamente la radiación [29], es por ello que ya no cuenta con las resistencias R_{cond} ni R_{conv} , sino que presenta solamente R_{abs} y R_{HEX} , como se muestra en la Figura 1.6b.

Ya que los fluidos de trabajo utilizados en los colectores térmicos tradicionales tienen baja absorbancia y para su uso en los DASC deben absorber mayor cantidad de energía solar, es que se le agregan partículas metálicas, poliméricas, a base de carbono, etc. para mejorar esta propiedad. La adición de estos elementos también contribuye en mejorar las propiedades térmicas de transferencia de calor y al no concentrar las mayores temperaturas en la superficie como en los colectores con placas y superficies sólidas, hay menor pérdida de calor por convección ni radiación al ambiente[29].

El tamaño de las partículas añadidas a los fluidos van del orden de mili a nanómetros. Las de mayor orden, mili o micro, presentan ciertas dificultades y limitaciones que no las hacen tan utilizadas, comenzando por la rápida velocidad de sedimentación, desgaste de equipos como bombas y tuberías, y una alta caída de presión y potencia de bombeo por la gran cantidad de partículas en el fluido. Cuando se agregan partículas nanométricas al fluido, estos pasan a llamarse nanofluidos y solucionan los problemas mencionados de los fluidos con partículas de mayor tamaño, ya que estas se mantienen más tiempo en suspensión y presentan una mayor área superficial, mejorando la transferencia de calor pues este fenómeno ocurre en la superficie de las partículas. Además, al ser más pequeñas reducen la abrasión, la posibilidad de obstrucción de las partículas y el consumo energético de bombeo [29].

1.2.1.3. Colectores solares híbridos térmicos fotovoltaicos (PV/T)

Esta tecnología mezcla el funcionamiento de ambas mencionadas anteriormente, ya que absorbe radiación en una celda solar para generar electricidad y la radiación que no fue posible transformar en electricidad por la celda es aprovechada en forma de calor. Esto se debe a que más de la mitad de la radiación incidente en una celda solar es convertida en calor. Además de utilizar más de la mitad de radiación incidente en forma de calor, las celdas solares sufren daños estructurales al mantenerse a altas temperaturas por periodos prolongados. El calor puede ser utilizado para calefaccionar espacios o líquidos[37].

1.3. Calor

La energía puede estar presente de distintas maneras, tales como: térmica, eléctrica, cinética, etc. La energía interna de un sistema está compuesto por la energía potencial y cinética de este, sin embargo, esta última en un sistema es la que se conoce como energía sensible o calor sensible. La actividad y movimiento de las partículas va directamente relacionado con la temperatura es por

ello que a mayor temperatura, las moléculas presentan mayor energía cinética[34]. El calor puede ser transferido por 3 mecanismos: conducción, convección y radiación.

Esta energía está presente en los 3 estados de la materia (sólido, líquido y gas), cuando a un sólido y líquido se le agrega suficiente temperatura para vencer las fuerzas moleculares, sufrirán cambios de fase hasta llegar a gas, siendo esta última fase un estado de energía interna más alto que los otros dos.

1.3.1. Conducción

La conducción es la transferencia de calor desde una molécula a mayor temperatura a las de menor por estar en contacto. Este se ocasiona por la colisión y difusión de las moléculas durante el movimiento de estas. La rapidez que es transferido el calor por conducción en un medio depende de la geometría, el espesor, el material y la diferencia de temperatura a través de él.

La transferencia de calor por conducción unidimensional se puede expresar por la Ley de Fourier de la Conducción de Calor que se muestra en la ecuación 1.6:

$$\dot{Q}_x = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad (1.5)$$

Con \dot{Q}_n el calor transferido en la dirección x , k es la conductividad térmica del medio, A es el área normal a la dirección de transferencia de calor y $\partial T/\partial x$ es el gradiente de temperatura. Al aproximar la ecuación 1.6 a diferencias finitas, se obtiene:

$$\dot{Q}_n = -kA \frac{T_2 - T_1}{L} \quad (1.6)$$

Con T_2 la temperatura en el punto que recibe el calor, T_1 la temperatura en la fuente de calor y L es la distancia entre T_1 y T_2 . Mientras que de esta ecuación se puede obtener que la resistencia térmica a la conducción (R_{cond}) es:

$$R_{cond} = \frac{L}{kA} \quad (1.7)$$

1.3.2. Convección

La convección es la transferencia de calor por movimiento de un fluido. Esta puede ocurrir de manera simultánea con la conducción, sin embargo, en caso de haber un movimiento masivo del fluido puede ser considerado como convección pura y en caso de no haber movimiento (fluido en reposo), no habría convección y la transferencia sería solamente por conducción.

Esta depende de la viscosidad dinámica (μ), la conductividad térmica (k), la densidad (ρ) y el calor específico (C_p) y la velocidad del fluido. Otra dependencia es la configuración geométrica y aspereza de la superficie sólida como también del tipo de flujo del fluido (laminar o turbulento).

La transferencia de calor por convección se puede expresar con la Ley de Newton de enfriamiento como se muestra en la ecuación 1.8

$$\dot{Q} = hA_s(T_s - T_\infty) \quad (1.8)$$

dónde h es el coeficiente de transferencia por convección, A_s es el área superficial de transferencia, T_s es la temperatura de la superficie sólida y T_∞ la temperatura del fluido suficientemente lejos de la superficie. El coeficiente de transferencia por convección no es una propiedad del fluido, sino que depende de todos los factores que afectan a la convección ya mencionadas anteriormente.

De la ecuación 1.8 se deduce la resistencia a la convección (R_{conv}):

$$R_{conv} = \frac{1}{h_{conv}A_s} \quad (1.9)$$

1.3.3. Radiación

La radiación se define como *la energía emitida por la materia en forma de ondas electromagnéticas (o fotones) como resultado de los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas* Cengel [34]. Este fenómeno es volumétrico y cualquier cuerpo emite radiación térmica, sea sólido, líquido o gaseoso y no necesita un medio material para poder transferirse.

La máxima energía de radiación que puede ser emitida por una superficie es expresada por la Ley de Stefan-Boltzmann de la ecuación 1.10, y solo puede ser emitida por un cuerpo negro:

$$\dot{Q} = \sigma A_s T_s^4 \quad (1.10)$$

dónde σ es la constante de Stefan-Boltzmann igual a $5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$, A_s es el área superficial del cuerpo emisor y T_s es la temperatura superficial del cuerpo emisor en K

Debido a que la emisión de radiación de un cuerpo real no es completa, cada superficie presenta emisividad (ϵ en W) que va desde el 0 a 1, por lo tanto el calor radiativo emitido (\dot{Q}_{emi}) por un cuerpo real es:

$$\dot{Q}_{emi} = \epsilon \sigma A_s T_s^4 \quad (1.11)$$

Parte de la radiación incidente en un cuerpo no es absorbida a excepción que sea un cuerpo negro, a esto se le llama absorptividad (α), valor que también va desde 0 si la superficie no absorbe nada de radiación y 1 en caso opuesto como es el caso de un cuerpo negro. Los cuerpos reales no pueden absorberla completamente y la cantidad que no es absorbida es reflejada o transmitida (es decir, que pasa al otro lado del medio material sin ser absorbida ni reflejada). Es por esto, que la energía absorbida por radiación ($\dot{Q}_{abs,rad}$) es:

$$\dot{Q}_{abs,rad} = \alpha \dot{Q}_{incidente} \quad (1.12)$$

con $\dot{Q}_{incidente}$ la energía por radiación que recibe la superficie.

En ocasiones es necesario conocer el poder de emisión espectral (o irradiancia) de un cuerpo negro ($E_{b\lambda}(\lambda, T)$) en cierto rango de longitud de onda (λ) y a la temperatura (T), es por ello que Max Planck desarrolló la **Ley de Planck** que se expresa como:

$$E_{b\lambda}(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5 [\exp(C_2/\lambda T) - 1]} \quad (1.13)$$

Con $C_1 = 2\pi hc_0^2 = 3.74177 \times 10^8 W \mu m^4 m^{-2}$, $C_2 = hc_0/k = 1.43878 \times 10^4 \mu m K$, k constante de Boltzmann igual a $1.38065 \times 10^{-23} J K^{-1}$, T es la temperatura en K . Esta relación es válida para una superficie en el vacío o un gas, mientras que para otros medios es necesario reemplazar C_1 por $C_1 n^{-2}$ con n el índice de refracción del medio.

Que al integrarla en todo el rango de longitud de onda se obtiene el poder total de emisión un cuerpo negro a la temperatura T ($E_b(T)$) en $W m^{-2}$:

$$E_b(T) = \int_0^\infty E_{b\lambda}(\lambda, T) d\lambda = \sigma T^4 \quad (1.14)$$

Por otro lado, de la ecuación 1.10 y realizando un balance de radiación entre la superficie absorbente a una temperatura T_s y las superficies circundantes a alguna temperatura T_{alred} , se obtiene que el flujo de calor es:

$$\dot{Q}_{rad} = \epsilon \sigma A_s (T_s^4 - T_{alred}^4) = h_{rad} A_s (T_s - T_{alred}) \quad (1.15)$$

Con h_{rad} es el coeficiente de transferencia por radiación. Y de la ecuación 1.15 se puede deducir la resistencia a la radiación (R_{rad}) como:

$$R_{rad} = \frac{1}{h_{rad} A_s} = \frac{1}{\epsilon \sigma A_s (T_s^2 + T_{alred}^2)(T_s + T_{alred})} \quad (1.16)$$

1.4. Nanofluidos

Los nanofluidos son suspensiones estables con partículas de tamaño nanométrico (<100 nm). Estos son buenas alternativas para utilizarlos en DASC debido a sus propiedades ópticas y termo-físicas que presentan a causa del tipo de partículas que pueden ser añadidas. Las partículas sólidas en estos fluidos son variadas, donde las metálicas, óxidos metálicos y a base de carbono son las más estudiadas, aunque también se han investigado los polímeros y semiconductores debido a las mejoras en las propiedades que puedan aportar a los fluidos. Las partículas metálicas se utilizan porque pueden dispersar, absorber y atrapar la luz en gran parte del espectro solar; los óxidos metálicos tienen buena absorción en el espectro visible e infrarrojo cercano (NIR por sus siglas en inglés); los materiales a base de carbono presentan mayor absorción en el espectro visible pero menor rendimiento fototérmico que los metálicos; los polímeros presentan ventajas similares a las nanopartículas metálicas presentando buena absorción en todo el espectro solar; y los semiconductores presentan una buena capacidad de conversión fototérmica[38].

Para caracterizar los nanofluidos se han utilizado distintas técnicas con el objetivo de estudiar la concentración, forma y tamaño de partículas. La microscopía electrónica es muy útil para obtener imágenes de gran resolución. Las dos más conocidas son la Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) y de Transmisión (TEM) y también son las más utilizadas para caracterizar las formas de las partículas en los nanofluidos como en Teng *et al.* [39] que utilizan TEM para ver el tamaño de las partículas de alumina (Al_2O_3) que se muestran en la Figura 1.7a y en Hozien *et al.* [40] se usó SEM y TEM para ver la distribución y forma de las partículas de óxido de titanio (TiO_2) como se presentan en las Figuras 1.7b y c, para SEM y TEM respectivamente.

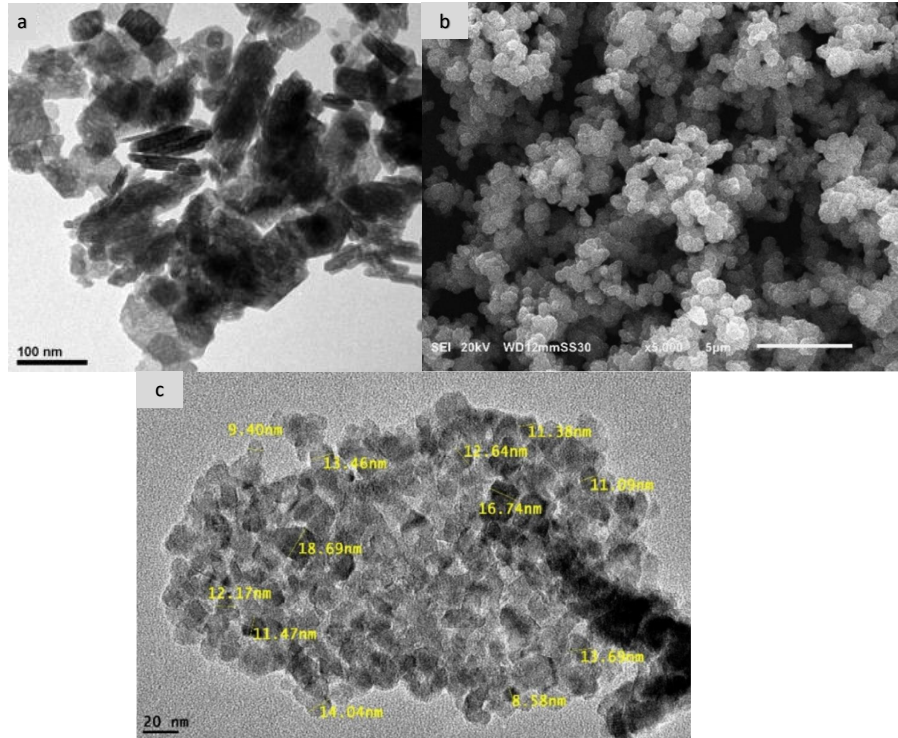


Figura 1.7: a) Imagen TEM de Al_2O_3 de 100nm. Imagen extraída de Teng et al [39]. b y c) Imagen SEM y TEM de las nanopartículas de TiO_2 . Imágenes extraídas de Hozien *et al.* [40].

1.4.1. Nanofluidos en DASC

En el trabajo de Jabari *et al.* [41] se estudió el nanofluido de CuO en un colector de placas planas. Este fluido se preparó a 0.4% volumen de nanopartículas de tamaño de 40 nm. Se comparó la eficiencia del colector a diferentes flujos máxicos (1, 2 y 3 $kgmin^{-1}$) entre ellos y agua pura. Se obtuvo que ésta se reduce a medida que aumenta el flujo máxico. Finalmente, la eficiencia del nanofluido a flujo de $1kgmin^{-1}$ presentó un 16.7% más que el agua con un flujo de $2kgmin^{-1}$ como se observa en la Figura 1.8 para la razón entre la diferencia de temperatura de entrada al colector (T_i) con ambiental (T_a) y la intensidad global (G_T).

En Parvin *et al.* [42] se comparan los nanofluidos de plata, cobre y alúmina para distintas concentraciones, alcanzando una mejora en 36, 34 y 25 puntos de eficiencia del colector comparado al agua, respectivamente.

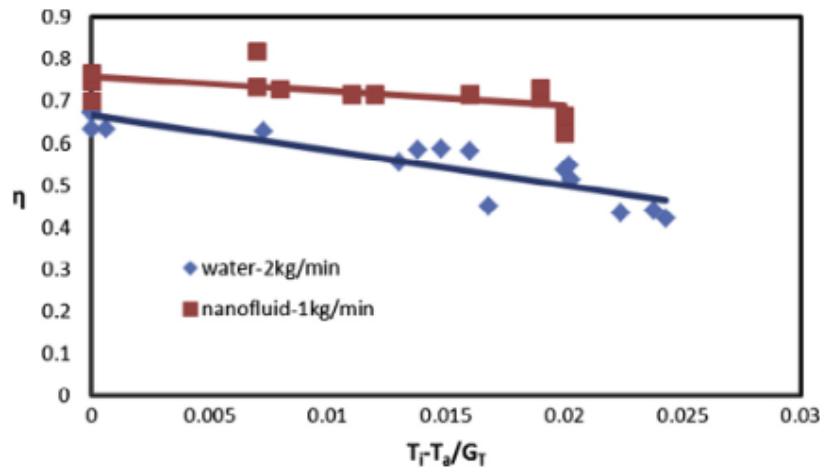


Figura 1.8: Eficiencia del colector solar de placas planas para agua y nanofluido de CuO en el flujo másico óptimo. Imagen extraída de Jabari *et al.* [41].

En Chen *et al.* [43] se estudió la eficiencia fototérmica de los materiales carbonosos 2-D como el grafeno (GE), óxido de grafeno (GO) y óxido de grafeno reducido (rGO). Se obtuvo que la adición de el 0.02% de partículas presenta eficiencia del 70%, 94%, 95% y 97% para el agua, el GE, el GO y el rGO a 30°C, respectivamente, y de un 41%, 50%, 56% y 61% cuando la temperatura es de 70°C en el mismo orden anterior.

En el review de Pankaj y Sudhakar [44] se recopilaron trabajos de distintos nanofluidos probados en DASC y Colectores Solares de Placa Plana (FPSC por sus siglas en inglés). Ahora bien, al probarlos en los equipos DASC y FPSC, se obtiene que la eficiencia en estos colectores incrementa con la adición de nanopartículas hasta cierto punto que se estabiliza a causa de que la fuerza de viscosidad incrementa y la transferencia de calor disminuye. También, con el surfactante, tamaño de partículas y pH adecuados puede aumentar la eficiencia del colector. Además, se logró obtener que la mejor eficiencia en los colectores fue con los nanofluidos con nanotubos de carbono (CNT por sus siglas en inglés), logrando mejoramiento del 32.2% que el agua cuando el nanofluido contiene 150ppm de CNT. Finalmente, se concluye que a mayor temperatura, se alcanzó mayor eficiencia en los nanofluidos estudiados en comparación al agua.

En el trabajo de Chen *et al.*[45] se estudió el nanofluido a partir de nanopartículas de plata para su uso en DASC. Se utilizó el esquema en 1 Dimensión (1-D) que se presenta en la Figura 1.9 donde h corresponde a la altura del nanofluido y la radiación llega perpendicular a la superficie. En dicho trabajo se midió para el nanofluido el cambio de temperatura en función de la profundidad, obteniéndose que la mayor temperatura se encontraba en la superficie y esta reducía con la profundidad. En la superficie se logró un aumento de $\sim 17^\circ C$ mientras que a los 20 mm se consiguió un cambio de $\sim 9^\circ C$, todo esto al cabo de 1200 s. Además, se obtuvo que el nanofluido de Ag al 0.01% alcanza un 40% de eficiencia y 20°C más que el agua al cabo de 1200s.

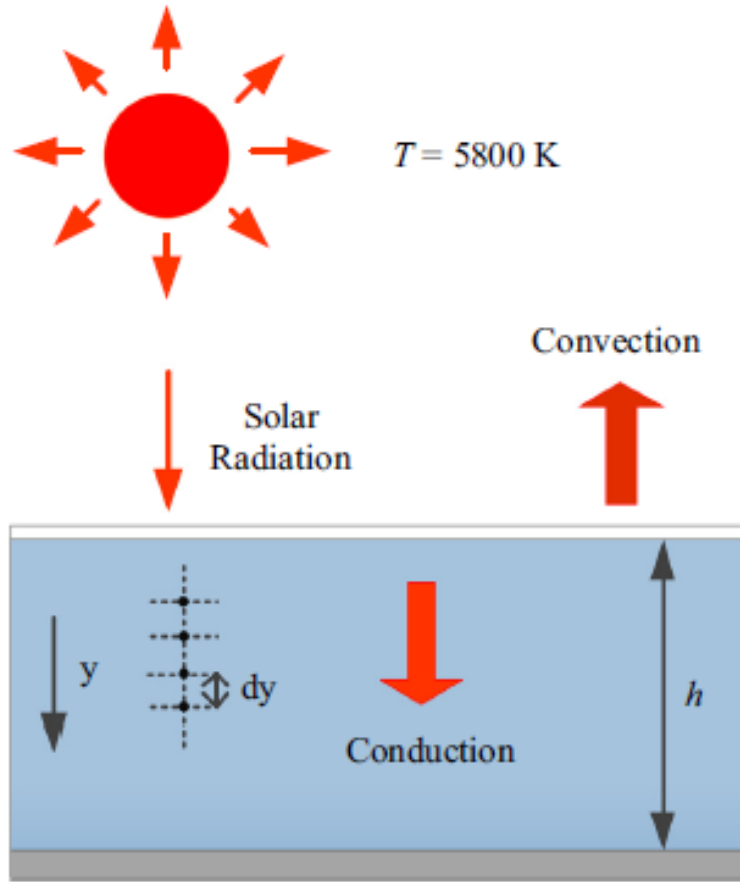


Figura 1.9: Esquema para la formulación del modelo de Colector Solar de Absorción Directa en 1-D con superficie transparente ($y=0$) y otras 3 superficies adiabáticas donde el sol apunta verticalmente a la superficie transparente. Imagen extraída de Chen *et al.* [45].

En Tahereh y Ranjbar [46] se hizo un estudio numérico y experimental de DASC a bajo flujo de nanofluidos a base de nanopartículas de grafito, magnetita y plata. En la Figura 1.10 se muestra el esquema del Colector Solar de Absorción Directa utilizado para el estudio. En este se considera transferencia de calor en 2 dimensiones, en el eje X e Y. El nanofluido circula de manera horizontal (de izquierda a derecha) en el equipo mientras que reciben la radiación perpendicular. En la superficie superior se encuentra un vidrio transparente de borosilicato. Además, a través de este cristal se pierde energía por medio de convección natural al ambiente. Mientras que la capa inferior del colector se considera opaca y adiabática.

En dicho estudio se comparó la eficiencia térmica de los distintos nanofluidos cambiando distintas variables como el flujo volumétrico, la intensidad radiativa y la concentración de partículas, logrando en cada caso siempre una mejora sustancial respecto al agua. Para un flujo de radiación de $1000Wm^{-2}$ se obtuvo una mejora de 12 puntos en la eficiencia del nanofluido de plata a 40ppm cuando el caudal del líquido es $5ml\ min^{-1}$, mientras que es de 35 y 45 puntos para los nanofluidos de magnetita y grafito, respectivamente a la misma concentración y caudal. También, se consiguió que la eficiencia del nanofluido de plata a 40ppm mejora en 10% para el caudal volumétrico de $2.5ml\ min^{-1}$ y 14% para el caudal de $7.5ml\ min^{-1}$ para un flujo radiativo de $1000Wm^{-2}$.

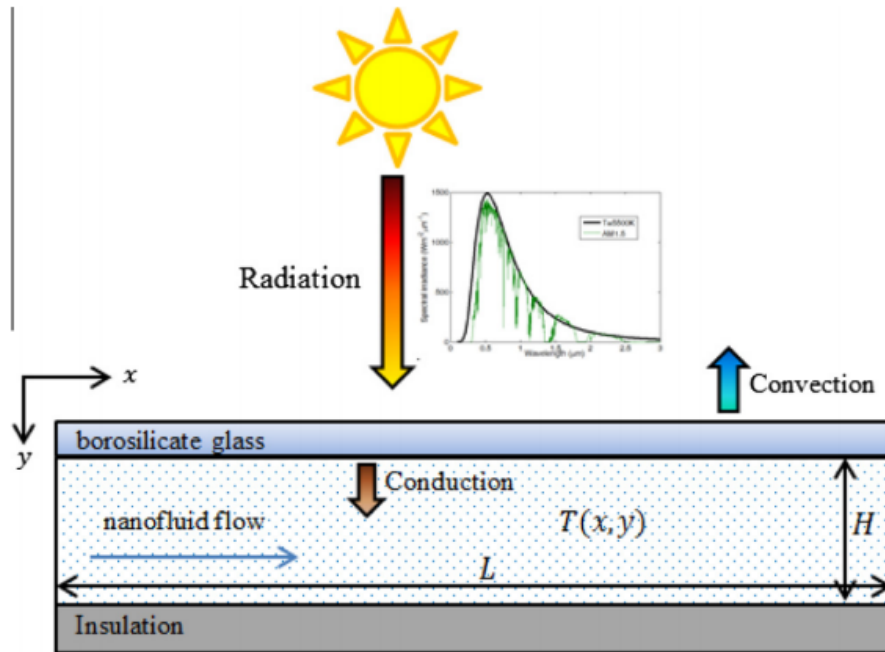


Figura 1.10: Esquema para la formulación del modelo de Colector Solar de Absorción Directa en 2-D con superficie transparente ($y=0$) y otras 3 superficies adiabáticas. Imagen extraída de Chen *et al.* [46].

En Ladjevardi *et al.* [47] se hizo un análisis numérico 2-D similar al anterior de Tahereh y Ranjbar para estudiar un DASC basado en nanofluido de grafito utilizando un esquema similar al presentado en la Figura 1.10. En este trabajo se calculó la energía absorbida de la radiación solar (radiación incidente de 836 Wm^{-2}) por parte del nanofluido de profundidad de 1 mm con fracciones volumétricas de nanopartículas de 0, 0.00001, 0.00005 y 0.0001 % obteniéndose un valor de 300, 400, ~ 620 y $\sim 750 \text{ Wm}^{-2}$, respectivamente, lo que significa una mejora en la absorción de energía de 100, 320 y 450 Wm^{-2} comparado al agua, respectivamente..

1.4.2. Preparación

Los nanofluidos pueden ser preparados con distintas técnicas de 1 o 2 pasos, aunque hay otros métodos que se han ido descubriendo.

Un paso

Estos métodos consisten en sintetizar y dispersar las partículas de manera simultánea, lo que se traduce en una menor aglomeración y mayor estabilidad del fluido [48][49]. Esto se debe a que se evitan los pasos de secado, almacenamiento, transporte y dispersión de las nanopartículas. En Lo *et al.* [50] se sintetizó un nanofluido a base de cobre mediante Sistema de Síntesis de Nanopartículas por Arco Sumergido (SANSS en inglés), que es un proceso complejo que requiere evaporar cobre entre $6,000$ y $12,000^\circ\text{C}$ y las partículas evaporadas son dispersadas en el medio de refrigeración, ocurriendo 3 etapas: nucleación, crecimiento y condensación.

En el trabajo de Zhu *et al.* [51] se preparó un nanofluido de cobre mediante método químico de un paso, en el cual se mezclaron distintos compuestos y elementos para obtener un nanofluido rojo oscuro. El problema de estos métodos es que no pueden ser realizados a gran escala a causa de su

alto costo de producción. En la Figura 1.11 se representa la preparación de un nanofluido en un solo paso.

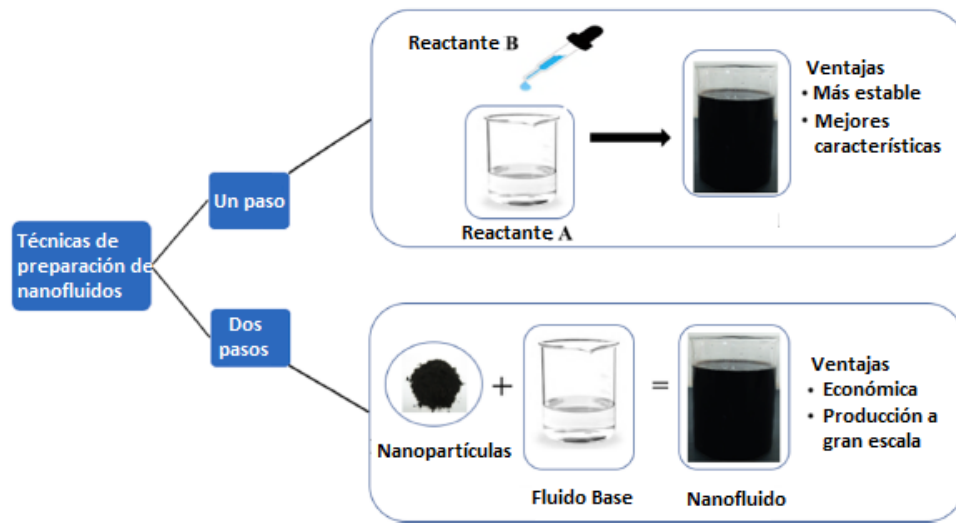


Figura 1.11: Métodos de preparación de nanofluidos. Imagen extraída de Muhammad y Yusuf [52].

Dos pasos

Los métodos de 2 pasos se inician produciendo polvo seco del material que se utilizará para seguir con el segundo paso, que es dispersar las partículas en el fluido con ayuda de agitación magnética, agitación ultrasónica, homogeneización, etc. Los métodos de dos pasos son en general más económicos que los de un solo paso, lo que los vuelve factibles para realizar a gran escala. Sin embargo, las problemáticas de estos métodos es la dificultad de estabilizar la solución, pues, en caso de no estabilizarlo bien, las nanopartículas tienden a aglomerarse, sedimentar y por ende, reducir sus propiedades termofísicas. Para solucionar los problemas de estabilidad y aglomeración, se suelen agregar surfactantes para estabilizar las nanopartículas. No obstante, la funcionalidad de estos es preocupante al trabajar a altas temperaturas [48][49].

En el trabajo de Shen *et al.* [53] se estudia el efecto de los componentes de tensión superficial para la Exfoliación en Fase Líquida (LPE por sus siglas en inglés), dónde se propone el mecanismo del proceso de estabilización de las partículas. Los surfactantes impiden que las nanopartículas se aglomeren y cambien las propiedades del nanofluido como la capacidad de absorben la radiación, la conductividad térmica, etc a causa del mayor tamaño de partícula. Para las partículas de 2-D impiden que estas se vuelvan a juntar, manteniendo las partículas con un menor número de capas. En el trabajo de Shen *et al.* [53] se propone un mecanismo de estabilización del nanofluido de LPE que se presenta en la Figura 1.12 donde se muestra el efecto de los surfactantes en las nanopartículas bidimensionales en la cual se presenta en la parte superior un buen proceso de inmersión de las nanopartículas con el solvente, una buena exfoliación y también estabilización, logrando mantener el número de capas de cada partícula y estabilidad de estas en el fluido. En la parte central se presenta una buena inmersión y sonicación pero no estabilización, lo que provoca que las partículas exfoliadas vuelvan a aglomerarse y pasen a estar parcialmente exfoliadas (unas pocas capas). Finalmente, en la parte inferior no ocurre una buena inmersión, por lo que las partículas

no son exfoliadas en ningún momento.

La inmersión consiste en sumergir la partícula a exfoliar y los solventes completamente en la solución con el fin de reducir las fuerzas de atracción de Van der Waals, en que las interacción dispersiva de London presentan la energía potencial entre las capas. Los componentes de tensión superficial entre el solvente y el material 2D debe ser similar para que el paso anterior ocurra de manera óptima. La exfoliación de las partículas 2D (o laminares) ocurre cuando el ultrasonido produce burbujas de vacío de alta intensidad, las cuales explotan al alcanzar un tamaño crítico, creando chorros de líquido de alta presión, temperatura y velocidad que logran separar las capas del material. Posteriormente a la exfoliación, si el solvente no es el adecuado para las nanopartículas, a causa de los constantes movimientos Brownianos de las partículas en la solución se rompe el equilibrio y por lo tanto, las partículas se comienzan a aglomerar y a sedimentar, cambiando y perdiendo distintas propiedades.

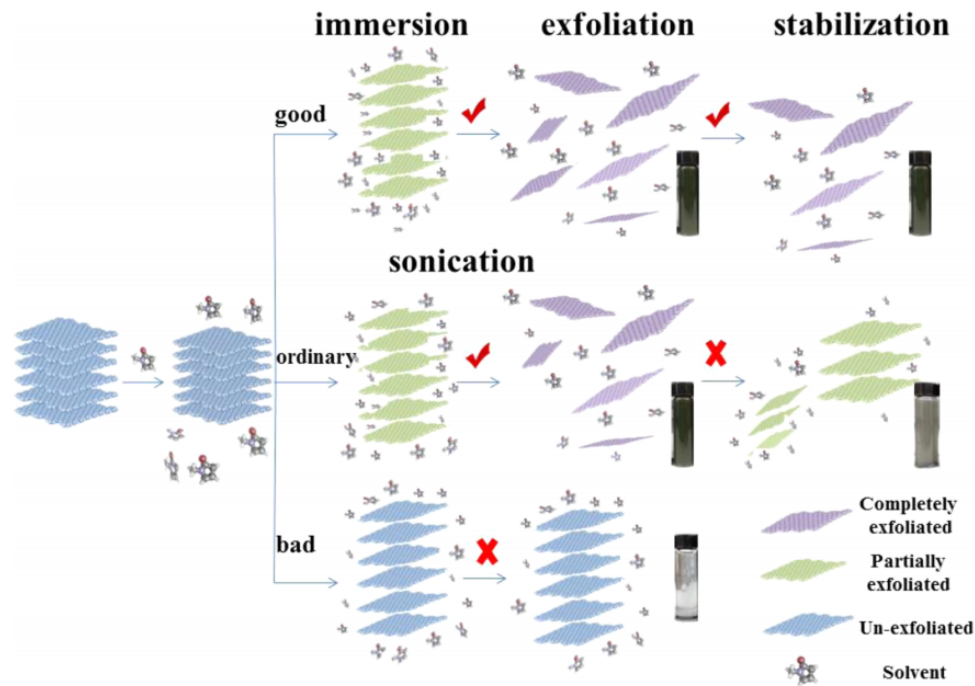


Figura 1.12: Mecanismo propuesto para el proceso de LPE. La eficiencia del solvente para LPE debe tener la mejor correspondencia de los componentes de la tensión superficial con el material 2D deseado. Imagen extraída de Shen *et al.* [53].

Métodos novedosos

Estos son métodos que no entran en la categoría de un o dos pasos. En el trabajo de Feng *et al.* [54] se utiliza la variación de solubilidad de Poli(N-vinilpirrolidona) en agua con la temperatura, donde se transfieren los metales nobles (oro, plata y platino) entre las fases orgánicas y acuosas solo cambiando la temperatura de las mezclas. En otro estudio, de Zhu *et al.* [55] se sintetizó un nanofluido de CuO, el cual inició como una mezcla de etilenglicol con $CuSO_4 \cdot 5H_2O$, a la cual se le aplicaron distintos pasos de agitado, adición de otros compuestos y aplicación de microondas, terminando en color negro después de haber pasado por verde y puce.

En general, los nanofluidos preparados por estos nuevos métodos presentan mejor estabilidad y propiedades termofísicas que los otros métodos más tradicionales. Esto último se debe a que las condiciones de preparación pueden ser más controladas como el pH, temperatura o variación en los métodos de mezclado [48, 56].

1.4.2.1. Partículas en 2 dimensiones (2D)

La forma de las partículas puede alterar las propiedades de los materiales y una de ellas son las partículas en 2-D. Estos materiales tienen la peculiaridad de presentar largos sobre 100nm pero solo unos cuantos nanómetros de tamaño lateral, alrededor de 5nm. A causa de las dimensiones, presentan grandes áreas superficiales y propiedades químicas/físicas/ópticas anisotrópicas como la conductividad térmica, entre otras[57][58]. Las propiedades del material van a depender del número de capas, pues entre ser de unas pocas capas o monocapas, por ejemplo, para el *MoSe* se diferencia entre una bandgap indirecta y directa [59].

Los materiales 2D como el grafeno, óxido de grafeno o dicalcogenuros de metales de transición (TMD) tienen estructuras laminadas con débiles fuerzas de van der Waals entre ellas y fuertes enlaces en el plano por lo que es posible separar las capas sin romper los enlaces en el plano. Estas fuerzas de Van der Waals se pueden romper hasta el punto de producir 1 capa o monocapa del material como se muestran en la Figura 1.13 para monocapas de grafeno, óxido de grafeno (GO) y óxido de grafeno reducido (rGO)[60].

El GO ha demostrado tener muchas utilidades por sus propiedades como buena estabilidad y dispersión en el agua siendo buen candidato para transportador de medicamentos. También muestra buena absorción de radiación en el infrarrojo, haciéndolo buen candidato para terapias fototérmicas[58].

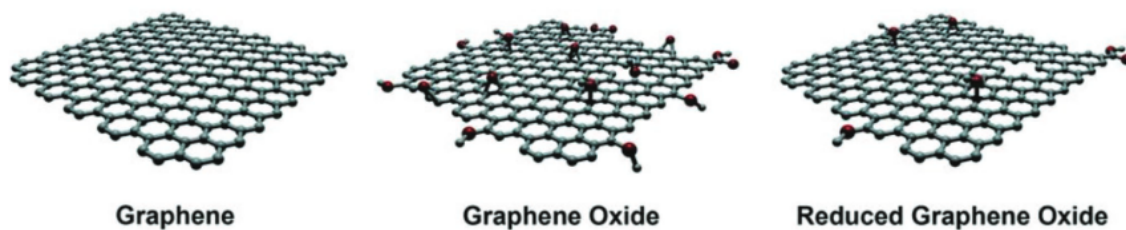


Figura 1.13: Diferentes formas de materiales basados en el grafeno considerados para aplicaciones biomédicas. Imagen extraída de Bullock y Bussy. [60].

1.4.3. Estabilidad

La importancia de la estabilidad química y durabilidad de la suspensión es de suma importancia para sus aplicaciones de transferencia de calor. Si el nanofluido no es estable, ocurrirá sedimentación y aglomeración de las nanopartículas causada por la gran carga superficial en ellos repercutiendo en las propiedades termofísicas como la conductividad térmica, densidad, viscosidad, etc. que reducirán los beneficios de los nanofluidos[29].

La estabilidad de los nanofluidos está relacionada con las propiedades electrocinéticas determinada por diferentes fuerzas como las fuerzas repulsivas (se incluye la repulsión estérica y estática), fuerza Browniana, termoforesis y de arrastre, las que depende de muchos factores como el método de preparación, características de las nanoparticulas, el fluido base, el pH y electrolitos. Hay distintas técnicas para estabilizar los nanofluidos, las mecánicas como la ultrasonificación y homogeneización; y las químicas como la estabilización estérica, estabilización electrostática, cambio de pH, estabilización electroestética, entre otras[29]. En la Figura 1.14 se presentan distintos escenarios para soluciones estables (primera) y no estables (las 3 restantes).

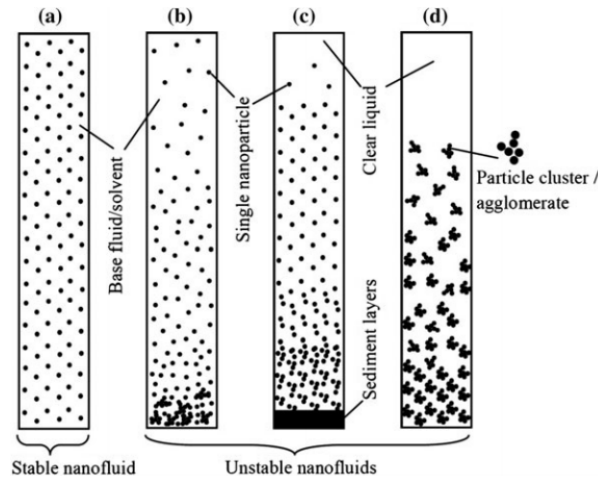


Figura 1.14: Diferentes escenarios de nanofluidos estables (a) e inestables (b-d).
 Imagen extraída de Bergmann *et al.* [61]Revisar esta referencia.

1.4.4. Propiedades ópticas

Para los nanofluidos es necesario el estudio de las propiedades ópticas del fluido en las diferentes partes del espectro solar, ya que estas tienen relación directa con el calor absorbido por el nanofluido[62].

1.4.4.1. Absorción

La absorción es la capacidad de perder la intensidad de la luz incidente cuando atraviesa un medio. Este es un parámetro clave a tener en cuenta al momento de la utilización de los nanofluidos en aplicaciones térmicas ya que es la capacidad que tiene el material para captar la energía. En los nanofluidos la absorción no es la suma de la absorción del fluido y las partículas debido a la interacción de ambos medios, donde este parámetro se ve afectado por el tipo de partícula, el tamaño de esta, la concentración, el fluido base y profundidad óptica [29]. En las aplicaciones térmicas en nanofluidos se estudia en todo el espectro solar UV-Visible-IR y se mide con la espectrometría correspondiente a cada rango del espectro.

El coeficiente de absorción μ_a se calcula como muestra la ecuación 1.17 donde ϵ_a es el Coeficiente de dispersión de una suspensión determinada y ρ es la concentración del medio de Absorción o Dispersión dentro del medio [63]

$$\mu_a = \epsilon_a \rho \tag{1.17}$$

1.4.4.2. Transmitancia

La transmitancia corresponde a la intensidad de la luz que atraviesa el material. En los nanofluidos, al igual que la absorción, depende de otros parámetros como el tipo de partícula, el tipo de fluido base, la profundidad óptica, el tamaño y concentración de partículas[29]. Por ejemplo, el agua tiene casi un 100 % de transmitancia en el espectro visible, lo que indica que es un material para absorber la radiación solar y utilizarlo en aplicaciones de absorción directa. Matemáticamente corresponde a la razón entre el flujo radiante transmitido ϕ_t y el flujo radiante incidente ϕ_i como se presenta en la ecuación 1.18[64]. Al igual que la absorbancia, estas se miden con espectrofotómetros.

$$\tau = \frac{\phi_t}{\phi_i} \quad (1.18)$$

1.4.4.3. Dispersión

La dispersión corresponde al estorbo que ocasionan las partículas sólidas en el nanofluido, lo que ocasionan una desviación en la luz incidente. Tiene un efecto muy pequeño si las partículas son menores a 10nm o la concentración de partículas es menor al 0.6 %. Sin embargo, si las partículas o la concentración son mayores que dichos valores, puede tener un efecto más importante. Una buena dispersión de las partículas en los nanofluidos reducen el efecto de la dispersión[29].

1.4.4.4. Coeficiente de extinción

El coeficiente de extinción μ_{ext} corresponde a la intensidad absorbida y dispersada de un material a cierta longitud de onda, siendo una propiedad intrínseca de la especie[65]. Este es afectado por la concentración, forma y tamaño de las partículas, además del fluido base. Éste se mide con un espectrómetro que se basa en la ley de Lambert-Beer que se presenta en la ecuación 1.19 [66].

$$\frac{I}{I_0} = e^{-\alpha l} = e^{-\epsilon lc} \quad (1.19)$$

Donde I es la intensidad de luz transmitida, I_0 es la intensidad de la luz incidente, α coeficiente de absorción, l longitud atravesada por la luz, c concentración del absorbente en el medio y ϵ es el Coeficiente de atenuación molar y depende de la longitud de onda y condiciones de medida principalmente como temperatura, pH, etc.

Como este coeficiente engloba a la dispersión y absorción de radiación, con la suma de estos 2 es posible tener el coeficiente de extinción como se muestra en la ecuación 1.20, con ϵ_{ext} coeficiente de dispersión de una solución determinada.

$$\mu_{ext} = \epsilon_{ext}\rho = (\epsilon_a + \epsilon_s)\rho = \mu_s + \mu_a \quad (1.20)$$

En una variedad de trabajos se obtuvo el coeficiente de extinción de los nanofluidos ya que corresponde a la energía útil en forma de calor. Este se estudia en determinada longitud de onda, por ejemplo para los usos termosolares va desde el UV hasta el infrarrojo por el rango en que emite el sol. En Menbari *et al.* [67] se tiene que el coeficiente de extinción para el nanofluido híbrido de alumina (Al_2O_3) y óxido de cobre (CuO) para distintas concentraciones que se muestra en la Figura 1.15. También se obtuvo este parámetro en el estudio de Choi *et al.* [68] para caracterizar Nanotubos de Carbono de Paredes Múltiples (MWCNTs) rellenos de parafina aunque se diferencia del estudio anterior en obtenerlo solo para la longitud de onda específica de $\lambda = 638.2nm$.

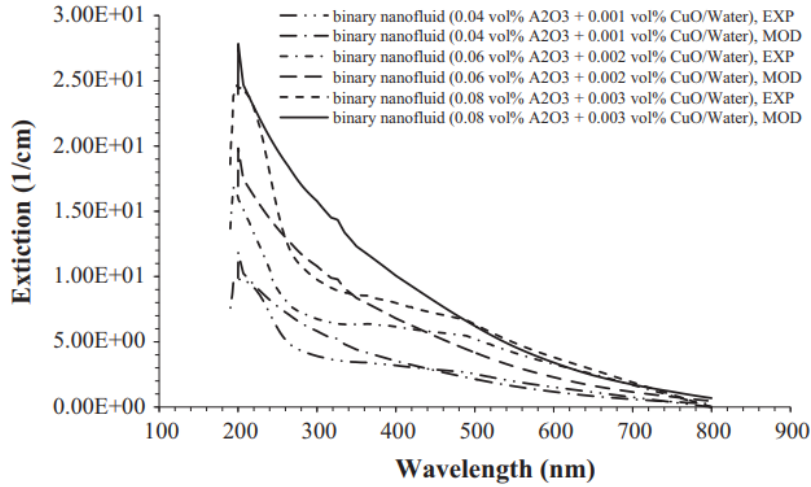


Figura 1.15: Comportamiento del coeficiente de extinción experimental y analítico para el nanofluido binario de $\gamma - Al_2O_3$ y CuO en agua vs la longitud de onda para distintas fracciones volumétricas. Imagen extraída de Menbari *et al.* [67].

1.4.5. Propiedades termofísicas de los nanofluidos

Las propiedades térmicas del nanofluido son importantes para definir el rendimiento de este en los colectores térmicos[69]. Estas son la conductividad térmica, capacidad calorífica específica, viscosidad y transferencia de calor por convección. La eficiencia de los colectores térmicos se miden dependiendo de las condiciones de operación como la variación de temperatura, tamaño de partícula, fluido base, condiciones ambientales, la forma de la nanopartícula y la concentración de estas en el fluido.

1.4.5.1. Densidad

La densidad es la relación entre la masa y el volumen que utiliza una sustancia. Esta varía con la temperatura y la presión. Como un nanofluido es una mezcla de dos fases, sólido y líquido, esta se puede calcular con la misma propiedad de las dos fases separadas como en la ecuación 1.21:

$$\rho_{nf} = (1 - \phi)\rho_f + \phi\rho_p \quad (1.21)$$

Con ρ_{nf} es la densidad del nanofluido, ρ_f es la densidad del fluido base puro, ρ_p la densidad de las partículas y ϕ la concentración de volumen de partículas.

1.4.5.2. Conductividad térmica

La conductividad térmica es la capacidad intrínseca de un material a transferir o conducir calor [70] y es una de las propiedades más importantes a tener en cuenta en los nanofluidos ya que define la rapidez a la cual se transfiere el calor. Se define como *una medida de la capacidad de un material para conducir calor*[34]

En el trabajo de Keblinski *et al.* [71] se utiliza la ecuación 1.22 para calcular esta propiedad en nanofluidos, la que corresponde a la ecuación de Maxwell modificada por la teoría de Hamilton y Crosser[72], la cual considera una mezcla heterogénea de una fase continua (líquido) y una discontinua (partículas) dispersa en la fase continua, igual concentración de la fase discontinua en la continua y el estado estacionario:

$$k_{nf} = k_0 \left\{ \frac{k_p + (n-1)k_f - (n-1)\phi(k_f - k_p)}{k_p + (n-1)k_f + \phi(k_f - k_p)} \right\} \quad (1.22)$$

donde k_{nf} es la conductividad térmica del nanofluido, k_f es la conductividad térmica fluido base, k_p es la conductividad térmica de las partículas sólidas, ϕ es la fracción volumétrica de las partículas y n es el factor de forma empírica que se calcula como en la ecuación 1.23:

$$n = \frac{3}{\psi} \quad (1.23)$$

Con ψ esfericidad de las partículas, que se define como la razón entre el área superficial de una esfera con igual volumen que el de la partícula y el área superficial de la partícula y se puede calcular como[73]:

$$\psi = \frac{\pi^{1/3}(6V_p)^{2/3}}{A_p} \quad (1.24)$$

Con V_p y A_p el volumen y área de la partícula, respectivamente.

La ecuación 1.22 funciona bien cuando las partículas son mayores a 13 nm, pero cuando se ha utilizado para particulares menores se ha obtenido desviación de más 100% en comparación con los resultados experimentales.

Fricke [74] descubrió un modelo para soluciones diluidas de partículas esferoidales con la razón de aspecto que se presenta en la ecuación 1.25:

$$k_{nf} = k_f \left(1 - \frac{n_a \phi \left(\frac{k_p}{k_f} - 1 \right)}{(n_a - 1) + \frac{k_p}{k_f} - \phi \left(\frac{k_p}{k_f} - 1 \right)} \right) \quad (1.25)$$

Con n_a el factor de forma adimensional que se calcula como:

$$n_a = \frac{\beta \frac{k_p}{k_f} - \beta}{\left(\frac{k_p}{k_f} - 1 \right) - \beta} \quad (1.26)$$

β es un factor que se obtiene con:

$$\beta = \frac{1}{3} \left(\frac{k_p}{k_f} - 1 \right) \left[\frac{2}{1 + \left(\frac{k_p}{k_f} - 1 \right) L_{11}} + \frac{1}{1 + \left(\frac{k_p}{k_f} - 1 \right) L_{33}} \right] \quad (1.27)$$

Donde L_{11} y L_{33} se calculan como:

$$L_{11} = \frac{a^2}{2(a^2 - 1)} - \frac{a}{2(a^2 - 1)^{3/2}} \cosh^{-1}(a) \quad (1.28)$$

$$L_{33} = 1 - 2L_{11} \quad (1.29)$$

1.4.5.3. Capacidad calorífica específica

El calor específico se define como *la energía requerida para elevar en un grado la temperatura de una unidad de masa de una sustancia*[34]. Es una propiedad importante ya que es la cantidad de energía que tendrá que absorber el nanofluido para aumentar su temperatura.

La capacidad calorífica específica de los sólidos es menor a los líquidos, es por ello que esta propiedad disminuye con la adición de partículas, mientras que incrementa con el aumento de temperatura [29][75].

El calor específico para un fluido con partículas sólidas dispersas se puede obtener con la ecuación 1.30:

$$c_{pnf} = (1 - \phi)c_{pf} + \phi c_{pp} \quad (1.30)$$

Donde c_{pnf} al calor específico del nanofluido, c_{pf} al calor específico del fluido base, c_{pp} al calor específico de la partícula sólida, ϕ es la concentración volumétrica de partícula. Sin embargo, Xuan y Roetzel [76] modificó la correlación anterior para las partículas sólidas nanométricas, obteniendo la siguiente ecuación 1.31:

$$c_{pnf} = \frac{\phi \rho_s c_{pp} + (1 - \phi) \rho_f c_{pf}}{\rho_{nf}} \quad (1.31)$$

1.4.5.4. Viscosidad

Para los líquidos, la viscosidad es originada por las fuerzas de cohesión entre las moléculas, mientras que en los gases por las colisiones moleculares[34]. El interés de esta propiedad en los nanofluidos radica en la cantidad de energía necesaria para mover los fluidos y el desgaste que sufrirán los equipos a causa de esta[77].

Esta propiedad, para los nanofluidos, depende directamente del tipo de nanopartícula, del fluido base, de la temperatura, la concentración de partículas y el tamaño de estas. Debido a la cantidad de parámetros que influyen en el valor de la viscosidad, es que las ecuaciones que se han obtenido son para partículas con los parámetros fijos a excepción de la concentración de las nanopartículas. No obstante, se ha demostrado que para los líquidos, la viscosidad disminuye con el aumento de la temperatura y del tamaño de las partículas, no obstante, este valor aumenta con el aumento de la concentración.

El modelo clásico que describe la viscosidad es el modelo de Einstein que se muestra en la ecuación 1.32, el cual considera partículas esféricas y soluciones diluidas. Este modelo se puede utilizar a concentraciones muy bajas, menores a 1% volumen.

$$\mu_{eff} = \mu_f(1 + B\phi) \quad (1.32)$$

donde μ_{eff} es la viscosidad efectiva del nanofluido, μ_f es la viscosidad del fluido base, B es el coeficiente de Einstein que se obtiene con el gráfico de la Figura 1.16 siendo 2.5 para partículas esféricas y ϕ es la fracción volumétrica de partículas dispersas.

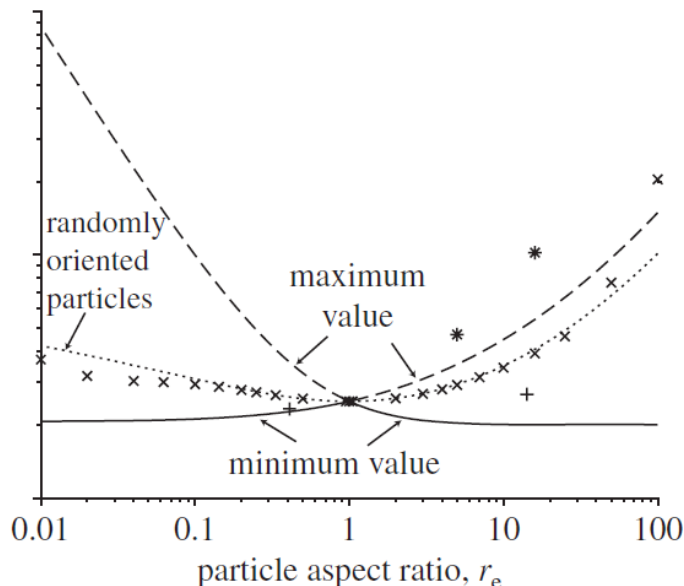


Figura 1.16: Impacto de la orientación de la partícula y razón de aspecto en la viscosidad de una suspensión a través del coeficiente de Einstein B . Coeficiente de Einstein en función de la razón de aspecto para: partículas orientadas inicialmente de forma aleatoria (línea de puntos); todas las partículas orientadas para maximizar la viscosidad (línea discontinua); todas las partículas orientadas para minimizar la viscosidad (línea sólida); y los dos signos más son calculados mediante el enfoque de Brenner a partir de los datos experimentales de la tabla 6 de Anczurowski y Mason [78]; los dos asteriscos son de Pabst *et al.* [79]. Imagen extraída de Mueller *et al.* [80].

Roscoe [81] trabajó la ecuación de Einstein para partículas esféricas de distintos tamaños logrando obtener la ecuación 1.33

$$\mu_{eff} = \mu_f(1 - \phi)^{-2.5} \quad (1.33)$$

En la tabla 1.1 se presentan datos de óxidos con sus nanofluidos, en la cual es posible observar a pesar de la misma temperatura de 30° C y concentración volumétrica de partículas de 5 %, la viscosidad es diferente.

Tabla 1.1: Propiedades de algunos óxidos y sus nanofluidos. Tabla extraída de Xie *et al.* [82].

	Thermal Conductivity (W/mK)	Density (g/cm ³)	Cristalline	Viscosity (cP) with 5.0 vol. % 30°C	Thermal Conductivity enhancement of nanofluids (%) with 5.0 vol. %
MgO	48.4	2.9	Cubic	17.4	40.6
TiO ₂	8.4	4.1	Anatase	31.2	27.2
ZnO	13.0	5.6	Wurtzite	129.2	26.8
Al ₂ O ₃	36.0	3.6	γ	28.2	28.2
SiO ₂	10.4	2.6	Noncrystalline	31.5	25.3

1.4.5.5. Transferencia de calor por convección

La transferencia de calor por convección es la transferencia de energía entre un sólido y un fluido (líquido o gas) que combina la conducción y el movimiento del fluido. Este parámetro no es una propiedad intrínseca del fluido ya que se determina de manera experimental y el valor obtenido depende de las siguientes variables, como la configuración geométrica de la superficie, el tipo de flujo (laminar, turbulento), las propiedades y velocidad del fluido [34]. A causa de que define la velocidad de transferencia de energía entre un sólido y el fluido de trabajo es la importancia de este parámetro en los nanofluidos para transferencia de calor.

1.4.6. Características que afectan a las propiedades del nanofluido

1.4.6.1. Forma de nanopartículas

En el trabajo de Campos *et al.*[83] se comparó el efecto de la forma de las nanopartículas de plata, esféricas y cúbicas, logrando obtener un aumento de casi 35K para el nanofluido que contiene las partículas no esféricas (C-Ag) al cabo de 3000s a la intensidad de $1000W/m^2$, mientras que para las partículas esféricas (S-Ag) este incremento fue de aproximadamente 32K, como se presentan en la Figura 1.17a. Además se estudio la eficiencia fototérmica, alcanzando mayor eficiencia de hasta 6 % para las partículas no esféricas en comparación a las esféricas y hasta 20 % al agua pura como se muestran en la Figura 1.17b).

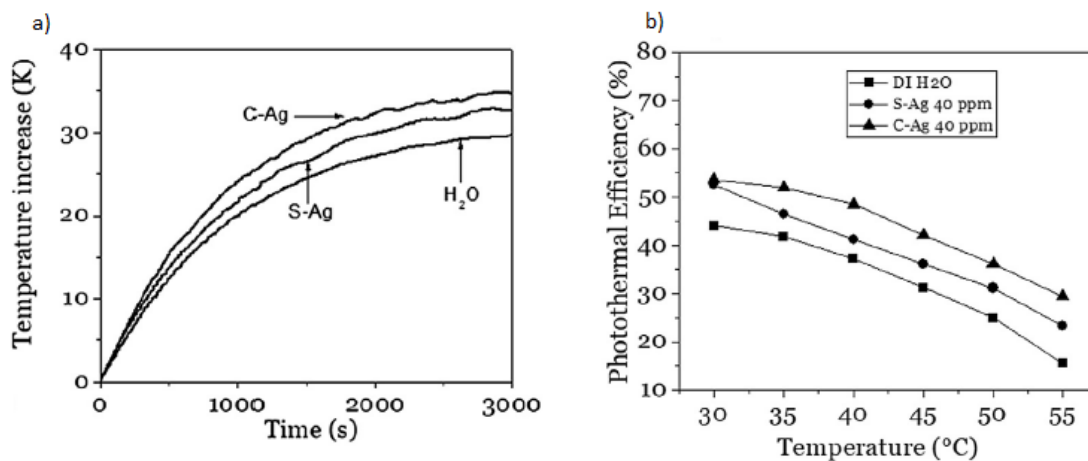


Figura 1.17: Incremento de temperatura a); eficiencia fototérmica b) del nanofluido con nanopartículas de plata esféricas, cúbicas y agua (S-Ag, C-Ag y H₂O, respectivamente). Imagen extraída de Campos *et al.* [83].

Jeong *et al.* [84] estudiaron 2 formas del nanofluido de partir de óxido de zinc (ZnO), rectangulares y esféricas, donde las partículas rectangulares alcanzaron una mayor mejora en la conductividad térmica (k_{eff}/k_f), alcanzando casi 5% más para las partículas rectangulares cuando el volumen de partículas era del 3%. Estos resultados se muestran en la Figura 1.18

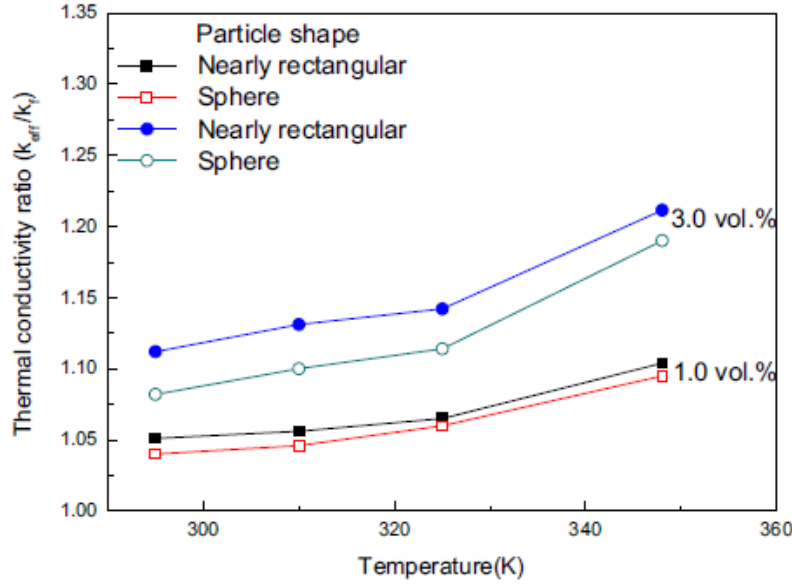


Figura 1.18: Relación de la conductividad térmica entre el nanofluido y el fluido base para 2 formas distintas de partículas y concentraciones volumétricas. Imagen extraída de Jeong *et al.* [84].

En el trabajo de Timoofeva *et al.* [85] se estudió la conductividad térmica de nanofluidos para las formas de cuchillas, plaquetas, ladrillos y cilindros. Se logró obtener que la mayor mejora fueron las formas cilíndricas hasta un 35 % cuando la concentración era de 8.4 % volumen, no obstante, para todas las formas se alcanzó una mejora en comparación al fluido base.

1.4.6.2. Efecto de la Concentración de partículas

En el trabajo de Minakov *et al.* [86] se estudió el efecto de la concentración de nanopartículas de SiO_2 de 25nm. En la Figura 1.19a se muestra el aumento exponencial de la viscosidad al añadir partículas al nanofluido, donde la línea negra es el modelo predictivo que se muestra en la ecuación 1.34. Mientras en que la 1.19b el aumento de la conductividad térmica relativa con la concentración de partículas, y la línea es el modelo numérico de la ecuación 1.35.

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_w} = 1 + \frac{5}{2}\phi \quad (1.34)$$

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{k_p + 2k_f + 2\phi(k_p - k_f)}{k_p + 2k_f - \phi(k_p - k_f)} \quad (1.35)$$

Con μ_{nf} la viscosidad del nanofluido, μ_w la viscosidad del agua, ϕ la fracción volumétrica de las partículas, k_{nf} , k_f y k_n son los coeficientes de conductividad térmica del nanofluido, del fluido base y de las nanopartículas, respectivamente.

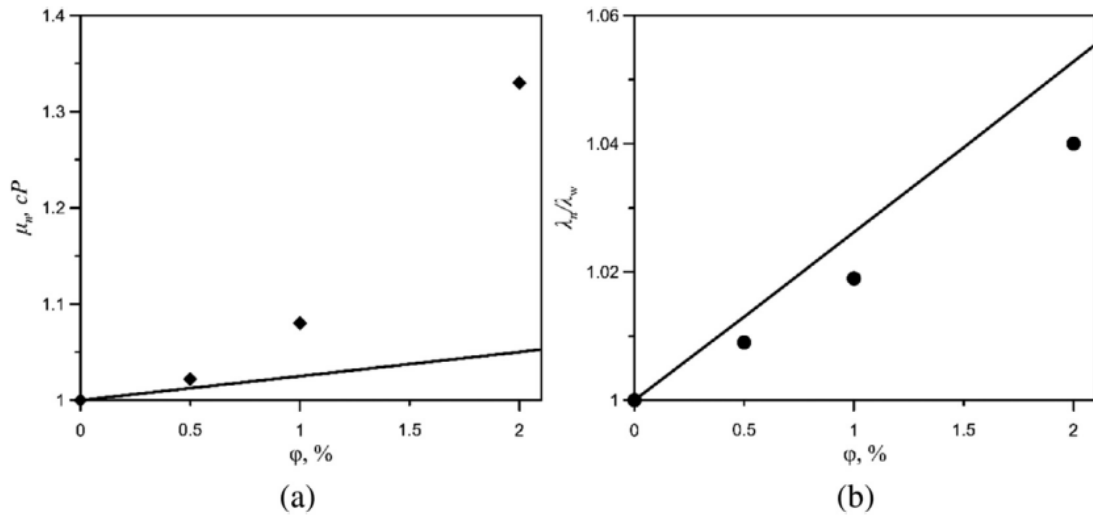


Figura 1.19: Viscosidad (a) y Conductividad Térmica (b) de nanofluidos versus la concentración de nanopartículas de SiO_2 de 25nm. La líneas negras corresponden a los modelos numéricos de las ecuaciones 1.34 y 1.35 para a y b, respectivamente y los puntos los valores experimentales. Imagen extraída de Minakov *et al.* [86].

Yapici *et al.* [87] estudió la viscosidad relativa para distintos nanofluidos, tamaños de partículas y fracciones másicas. En las Figuras 1.20 y 1.20 se muestra la viscosidad relativa para los nanofluidos con nanopartículas de SiO_2 y CuO , respectivamente, mostrando aumento de esta con el aumento de la fracción másica, aunque no presentan el mismo aumento para los dos tipos de partículas.

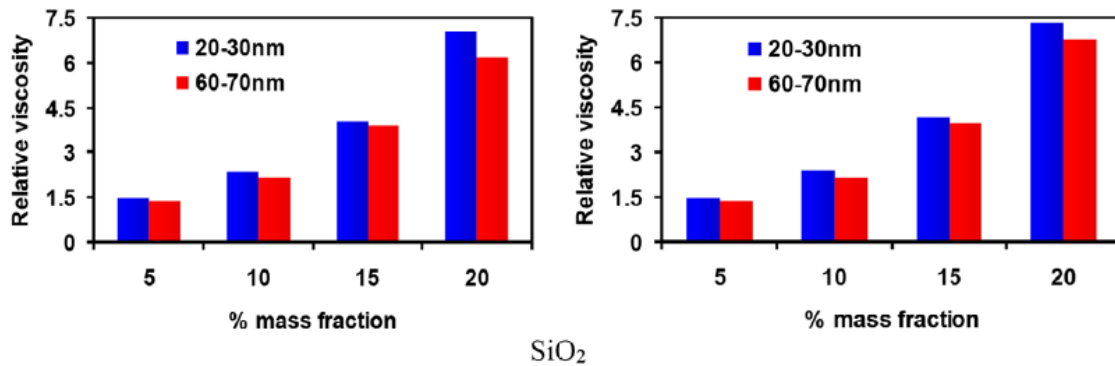


Figura 1.20: Viscosidad relativa del nanofluido de CuO . A la izquierda se aplicó velocidad de cizallamiento de $\gamma = 100s^{-1}$ y a la derecha $\gamma = 1000s^{-1}$. Imagen extraída de Yapici *et al.* [87].

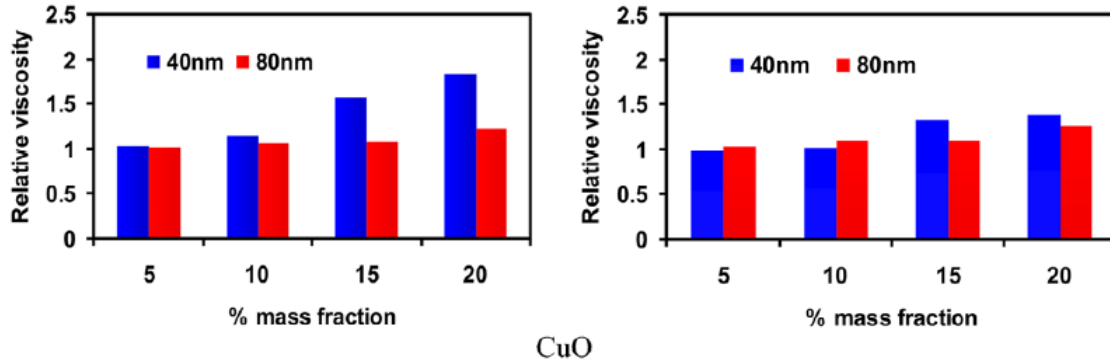


Figura 1.21: Viscosidad relativa del nanofluido de CuO . A la izquierda se aplicó velocidad de cizallamiento de $\gamma = 100s^{-1}$ y a la derecha $\gamma = 1000s^{-1}$. Imagen extraída de Yapici *et al.* [87].

Del mismo estudio de Li *et al.* [88], se midió la capacidad calorífica (C_p) de la mezcla y se comparó el fluido base con el nanofluido a distintas concentraciones de nanopartículas. Se obtuvo una mejora del $\sim 27.4\%$ para el nanofluido en concentración del 0.1% en comparación al fluido base puro. También se estudió conversión fototérmica, dónde se consiguió una tasa de $1.586\text{ }^{\circ}C\text{ }min^{-1}$ al cabo de 50 min para la mezcla con concentración de 0.1%, lo que es 25% más que el fluido base. Finalmente se midió la conversión fototérmica cada ciclo térmico, donde se logró notar reducción de la conversión fototérmica después de 5 ciclos para todas las 3 concentraciones de nanopartículas de 0.005, 0.05 y 0.1% volumen.

En Li *et al.* [88] se estudió el nanofluido a partir de nanotubos de carbono (CNT) modificados con β -ciclodextrina para los DASC. Se midió la estabilidad de la mezcla para las concentraciones de 0.005, 0.05 y 0.1% volumen de CNT mediante potencial zeta absoluto (ζ_{abs}), pues entre mayor sea el valor absoluto de la suspensión, más estable será (en la tabla 1.2 se muestra una referencia de la estabilidad para el ζ_{abs} según [89]). Se obtuvo que a $20^{\circ}C$, para las 3 concentraciones un ζ_{abs} mayor a 50 mV, lo que implica una buena estabilidad de la mezcla, aunque reducía su valor a mayor concentración de partículas, disminuyendo desde ~ 54 a 51 mV, para 0.005 y 0.1% volumen, respectivamente. Siguiendo con la estabilidad, se midió el ζ_{abs} para las mismas concentraciones a distintas temperaturas de 20, 40 y $60^{\circ}C$ obteniéndose un ζ_{abs} de ~ 54 , ~ 50 y ~ 48 mV, respectivamente para la solución con 0.005%. Mientras que la mezcla con mayor concentración de 0.1% redujo de 51~ mV hasta ~ 45 mV de $20^{\circ}C$ a $60^{\circ}C$. Para las 3 concentraciones a $60^{\circ}C$ caen en el rango de estabilidad moderada-excelente. Asimismo se estudiaron las mezclas para las distintas concentraciones por número ciclos de térmicos, donde se obtuvo que la estabilidad se va degradando por los ciclos intermitentes de calor, pero es posible solucionar este problema mediante un proceso de ultrasonido al cabo de cierto número de ciclos, en este caso fue cada 10 y se logró volver a la misma estabilidad inicial. Con los resultados anteriores que también se presentan en la Figura 1.22 se concluye que la estabilidad de la mezcla se reduce con el aumento de temperatura, concentración de partículas en la solución y tiempo de uso, por lo que es necesario tener en cuenta estos factores cuando sean utilizados con fines térmicos y cíclicos, como en los DASC.

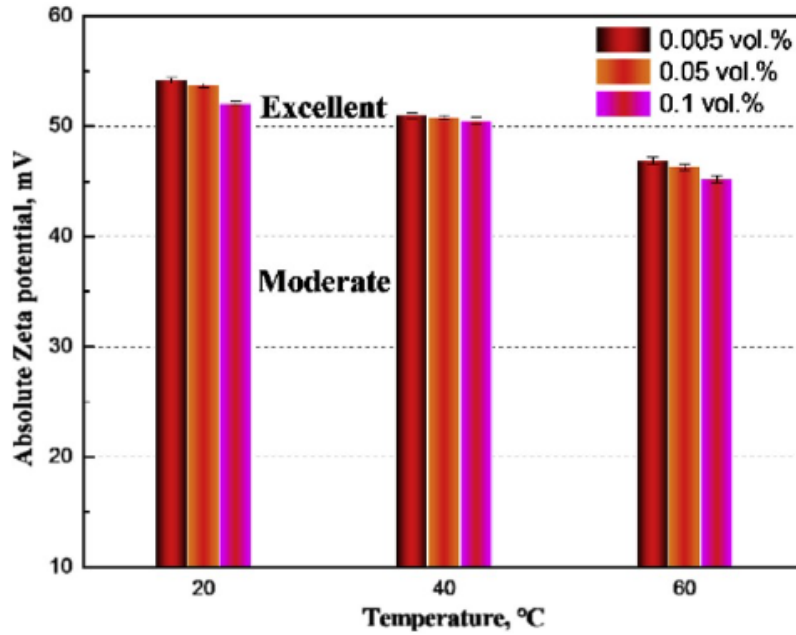


Figura 1.22: El valor absoluto del potencial Zeta del nanofluido de CNT a diferentes temperaturas para concentraciones de CNT de 0.005, 0.05 y 0.1 % en fracción volumétrica. Imagen extraída de Li *et al.* [88].

De los muchos materiales estudiados para los nanofluidos, en Jiheng Ding *et al.* [90] se le dio énfasis al grafeno debido a su alta conductividad térmica de $5300 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ y su morfología en láminas. Esta última característica posee mejoras importantes en la conductividad térmica a baja carga debido al transporte térmico dominante de percolación causado por la ventajosa anisotropía. En este trabajo se obtuvo que la conductividad térmica de un nanofluido a base de grafeno (grafeno funcionalizado con ácido sulfónico selectivo de bordes o ESfG por sus siglas en inglés) fue de $3.11 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ para un volumen del 10 % de ESfG, lo que equivale a 420 % más comparado al agua pura. También, para ver la funcionalidad de este fluido en sistemas de transferencia de calor, es que se midió la viscosidad, obteniendo un aumento a mayor fracción volumétrica de partículas, pasando desde $1 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ cuando el agua es pura, hasta $16.7 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ cuando la concentración de nanopartículas es del 10 % en volumen.

Tabla 1.2: Comportamiento de la estabilidad de las suspensiones coloidales correspondiente a los valores del potencial zeta. Tabla extraída de [89]

Potencial Zeta (mV)	Comportamiento de estabilidad de los coloides
de 0 a ± 5	Rápida coagulación o floculación
de ± 10 a ± 30	Insipiente estabilidad
de ± 30 a ± 40	Moderada estabilidad
de ± 40 a ± 60	Buena estabilidad
más de ± 61	Excelente estabilidad

1.4.6.3. Efecto del Tamaño de partículas

En el trabajo de Chorpkar *et al.* [91] se estudió el efecto del tamaño de partícula en la conductividad térmica en nanofluidos de Al_2Cu y Ag_2Al para distintas concentraciones de nanopartículas

con fluidos base para ambos tipos, agua y etilenglicol. Para todos los casos de estudio, se obtuvo una reducción no lineal de la tasa de conductividad térmica con el aumento del tamaño de partícula como se muestra en la Figura 1.23a y b para las partículas Al_2Cu y Ag_2Al , respectivamente.

En Anoop *et al.* [92] se midió el coeficiente de transferencia de calor convectivo para un nanofluido de Al_2O_3 al 1, 2, 4 y 6 % en fracción másica. Se logró obtener que este coeficiente, para una fracción másica del 4 % mejoró un 25 % cuando las nanopartículas fueron de 45nm y un 11 % cuando tenían un tamaño de 150nm. Además de esto, se concluye que con el aumento del flujo y concentración de partículas el coeficiente convectivo también aumenta.

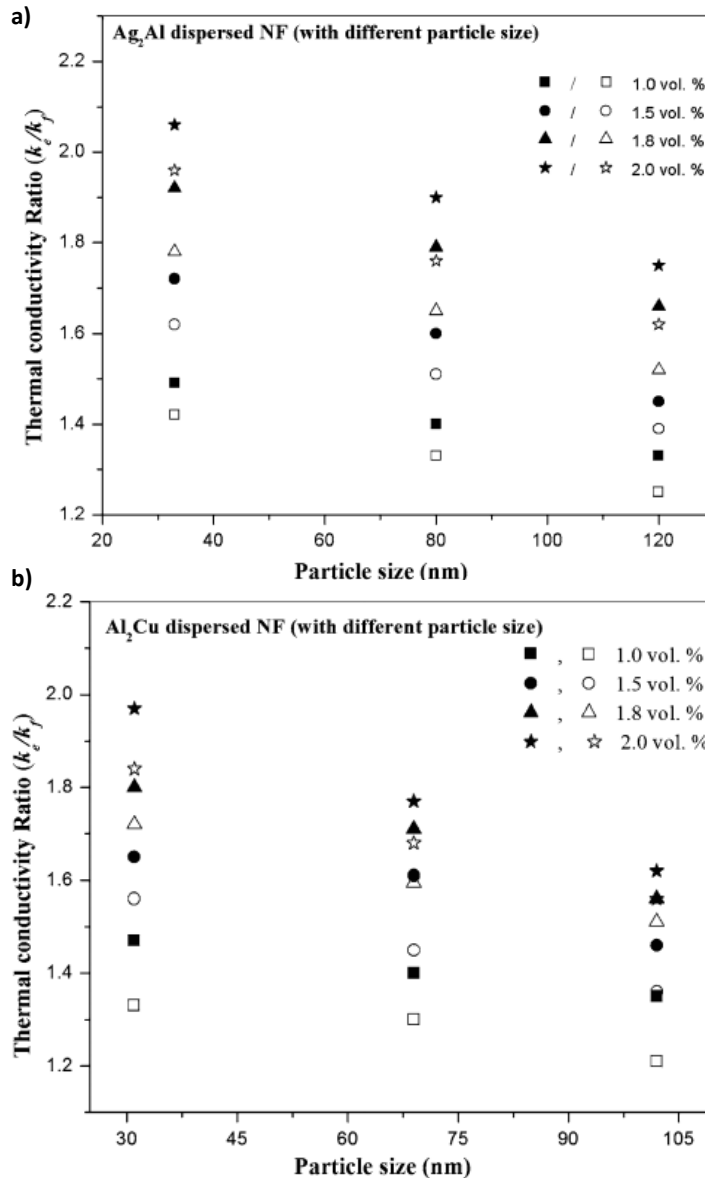


Figura 1.23: Variación de la relación de conductividad térmica (k_e/k_f) en función del tamaño de nanopartícula de dispersa en etilenglicol para los símbolos vacíos y en agua para los símbolos rellenos para a) Al_2Cu y b) Ag_2Al . Imágenes extraídas de Chorpkar *et al.*[91].

Minakov *et al.* [86] lograron estudiar el efecto del tamaño de las nanopartículas de SiO_2 en la viscosidad y conductividad térmica en un nanofluido. En la Figura 1.24a se muestra la reducción en la viscosidad con el aumento del tamaño de las nanopartículas. En la misma Figura 1.24b se exhibe el aumento en la conductividad térmica relativa con el aumento del tamaño de las partículas, lo que es consistente con el trabajo de Chorpkar *et al.* [91].

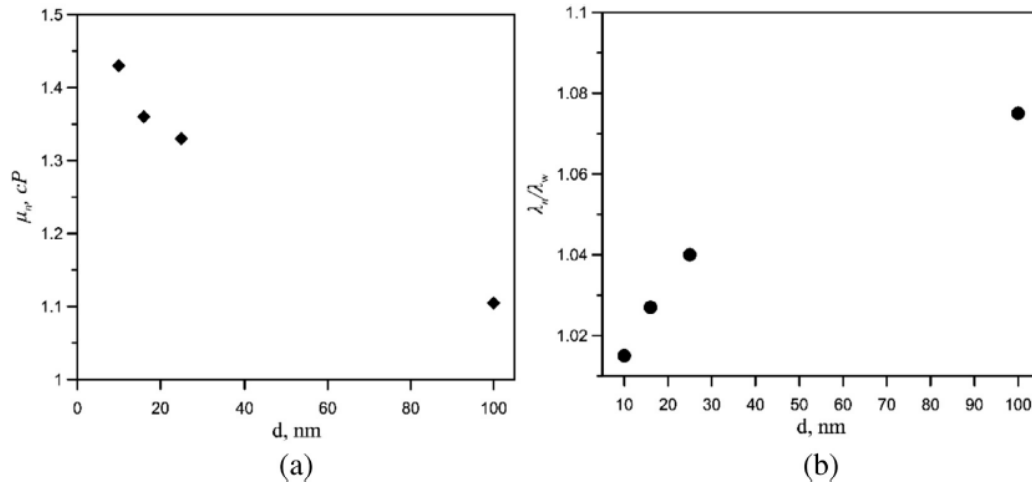


Figura 1.24: Viscosidad (a) y Conductividad Térmica (b) de nanofluidos versus el tamaño de nanopartículas de SiO_2 en el censo de concentración al 2%. Imagen extraída de Minakov *et al.*[86].

1.4.6.4. Efecto de los surfactantes

Siguiendo el grafeno en nanofluidos, en Aguilar *et al.* [93] se estudió el rendimiento del nanofluido exfoliado a base de óxido de grafeno. En dicho trabajo se estudió la densidad, el calor específico isobárico y la conductividad térmica para un fluido de transferencia de calor (definido como HTF por sus siglas en inglés) compuesto por la mezcla eutéctica de óxido de difenilo y bifenilo, óxido de grafeno comercial (GO, polvo de 15 a 20 hojas, 4-10 % oxidado) y 3 surfactantes, el polietilenglicol 200 (PEG), 1-octadecanotiol (ODT) y Triton X-100 (TRX), en concentraciones de $1.2 \cdot 10^{-1}$, $7.8 \cdot 10^{-3}$ y $5.1 \cdot 10^{-1}$ wt %, respectivamente. Los resultados demostraron que las nano hojas de óxido de grafeno mezcladas con Triton X-100 mejoran las propiedades térmicas estudiadas del fluido por sobre el 6.6 %, 45.5 % y 29.7 % para el calor específico isobárico, conductividad térmica y coeficiente de transferencia de calor, respectivamente. Adicional a lo anterior, se midió el coeficiente de extinción para la longitud de onda $\lambda = 400nm$, donde para todos los casos es mayor que el fluido puro, logrando tener el mayor valor cuando el surfactante es el TRX X-100. Por todo lo anterior y principalmente por el coeficiente de extinción, es que concluyen que puede ser prometedor para estudiarlos en los DASC.

Relacionado con el mismo trabajo anterior de Aguilar *et al.* [93], se comparó el tamaño de las partículas de grafeno para la mezcla de los distintos surfactantes. En cada uno de estos se obtuvo distinto tamaño de partícula de inicial de 300, 350 y 390 nm, para el TRX, ODT y PEG. Además de esto, estudió el tamaño de partícula en el tiempo, donde el tamaño para todos los casos aumento, llegando hasta alrededor de 330, 420 y 480nm para el TRX, ODT y PEG al cabo de 34 días.

De esto se concluye que la mejor exfoliación fue con Triton X-100.

1.4.6.5. Efecto de la intensidad radiativa

También en el trabajo de Sharma y Tiwari[94] se estudió el efecto de la intensidad en un colector solar de placas planas para un nanofluido de CeO_2 , donde se obtuvo que la eficiencia del equipo aumentaba a medida que también aumentaba la intensidad hasta cierto punto. El aumento no fue lineal y alcanza un máximo que después va en descenso. Para casi todas las concentraciones estudiadas, a excepción cuando es de 1.5%, el máximo de eficiencia fue cuando la intensidad radiativa fue de $700 W m^{-2}$. La máxima eficiencia se alcanzó cuando la concentración de partículas fue del 1% y pasó de un 49% cuando la intensidad era de $300 W m^{-2}$ hasta un 58% cuando la intensidad fue de $700 W m^{-2}$ para comenzar a decaer como se muestra en la Figura 1.25.

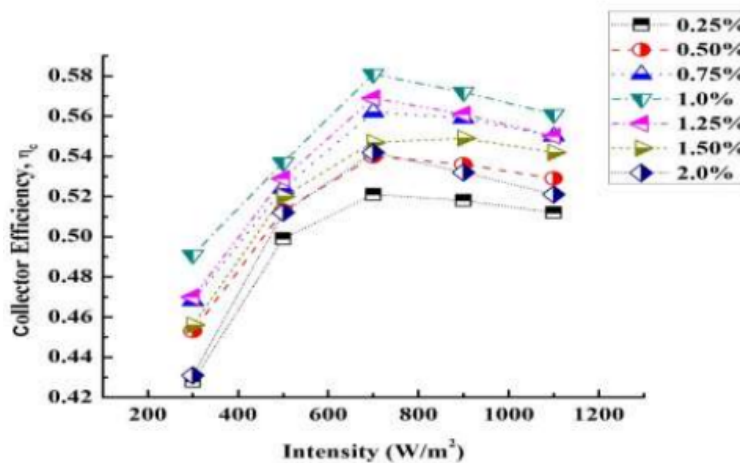


Figura 1.25: Eficiencia térmica en función de la intensidad radiativa para distintas concentraciones del nanofluido a base de CeO_2 . Imagen extraída de Sharma y Tiwari[94].

En Kaya y Arslan[95] se hizo un estudio numérico de la eficiencia de un Colector Solar de Tubos en U Evacuados con diferentes nanofluidos. En dicho trabajo se simuló la eficiencia de 3 nanofluidos diferentes y un fluido al 30% de etilenglicol en función de la radiación solar incidente. El resultado para cualquier fluido, sean los nanofluidos o el fluido con etilenglicol, es que la eficiencia aumentaba con el aumento de la radiación incidente. El nanofluido de plata al 4% vol obtuvo la mayor eficiencia en todo el rango de la radiación incidente, aumentando desde casi un 44% al 63% de eficiencia desde la intensidad de 200 a $1000 W m^{-2}$. Para la misma radiación se obtuvo un aumento del 43 al 59% y 40 al 55% para los nanofluidos de ZnO y MgO, ambos al 4% volumen. Finalmente para la mezcla de agua con etilenglicol pasó de un 36 a 49% de eficiencia. Estos resultados también se presentan en 1.26.

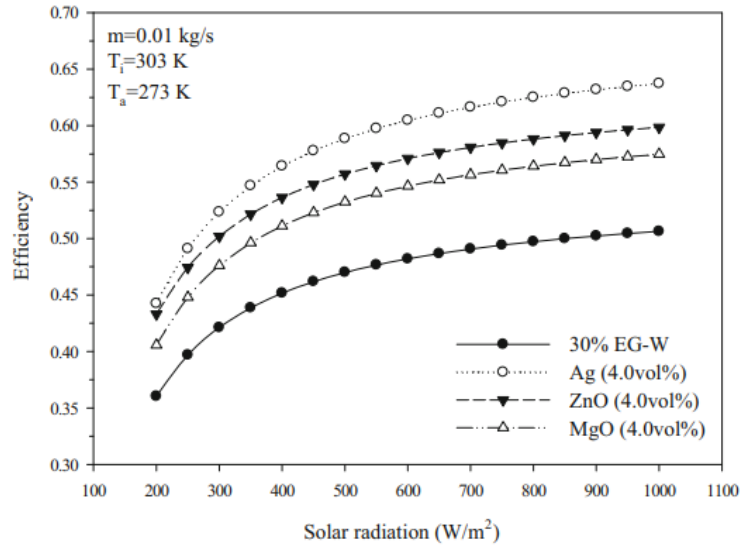


Figura 1.26: Variación de la eficiencia del colector solar con la radiación solar para diferentes tipos de nanofluidos. Imagen extraída de Kaya y Arslan[95].

1.4.6.6. Efecto de la temperatura de operación

En el trabajo anterior de Jeong *et al.* [84] además del efecto de la forma en la conductividad térmica, se logra observar el aumento de esta propiedad con el aumento de la temperatura, alcanzando una mejora de 5 % para las partículas rectangulares hasta casi un 10 % en comparación al fluido base desde la temperatura de 295K a 350K (Véase Figura 1.18).

Jin *et al.* [96] estudió como influía la temperatura en la conductividad térmica de un nanofluido híbrido de nanopartículas de cobre y nanotubos de carbono en agua. En dicho trabajo se obtuvo que para las 5 concentraciones estudiadas, aumentaba este parámetro con el incremento de temperatura. Cuando la concentración era de 0.01 %w, la conductividad aumentó un 2 % cuando la temperatura era de 25°C hasta casi 12 % a 65°C. Para el resto de concentraciones también se obtuvo que aumentaban de manera similar con la temperatura, aunque en mayor medida debido a la concentración de las partículas.

Siguiendo con el estudio de Jin *et al.* [96], se obtuvo que la viscosidad decrecía con el aumento de temperatura como se esperaba de la viscosidad de los líquidos, pasando de 0.95mPa · s cuando la concentración es de 0.04 %w y la temperatura de 25°C hasta 0.6mPa · s cuando la temperatura era de 65°C.

1.4.6.7. Efecto del pH

El pH es capaz de afectar a las propiedades ópticas de los nanofluidos como se muestra en el trabajo de Al-Geroby y Pinar [97] donde se estudió de este parámetro en el coeficiente de dispersión de un nanofluido de óxido de titanio en las longitudes de onda de 400, 800 y 1100 nm para distintas concentraciones volumétricas de partículas, logrando observar que el coeficiente de dispersión cambiaba con el pH sin algún comportamiento claro con la variación de pH. Por otra parte, cuando se mide en el Infrarrojo cercano (1100nm), la mayor dispersión se alcanza en el pH

6 y 10, mientras que cuando la longitud $\lambda = 400nm$ la mayor dispersión se alcanza en el pH 2 o 10, aunque todo dependerá bien de la concentración de partículas.

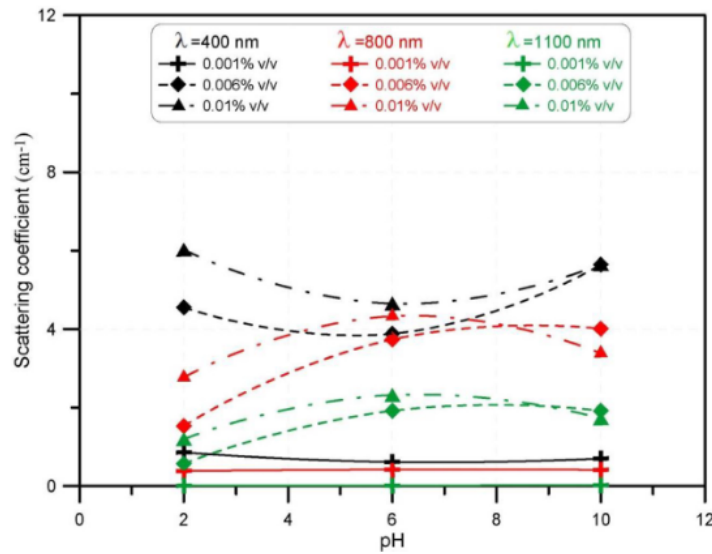


Figura 1.27: Impacto del pH en el coeficiente de dispersión de nanopartículas de TiO_2 con diferente fracción volumétrica de partículas a diferentes longitudes de onda. Imagen extraída de Al-Geroby y Pinar [97].

La variable del pH también afecta a las propiedades termofísicas como la viscosidad y conductividad térmica, esto lo comprobó Xian-Ju y Xin-Fang [98] para los nanofluidos de $Cu - H_2O$ y $Al_2O_3 - H_2O$. En dicho trabajo la viscosidad se redujo con el aumento del pH hasta 8 o 9 donde comenzó a aumentar para ambos fluidos. Para la conductividad térmica se obtuvo que para el nanofluido de $Al_2O_3 - H_2O$ la mejor conductividad fue cerca del pH 7.5 con un 11 % mientras que para el $Cu - H_2O$ fue cerca del pH 9 con una mejora aproximada del 14 %, para las concentraciones de partículas 0.2 %, los resultados se presentan en la Figura 1.28 a y b para la viscosidad y conductividad térmica, respectivamente.

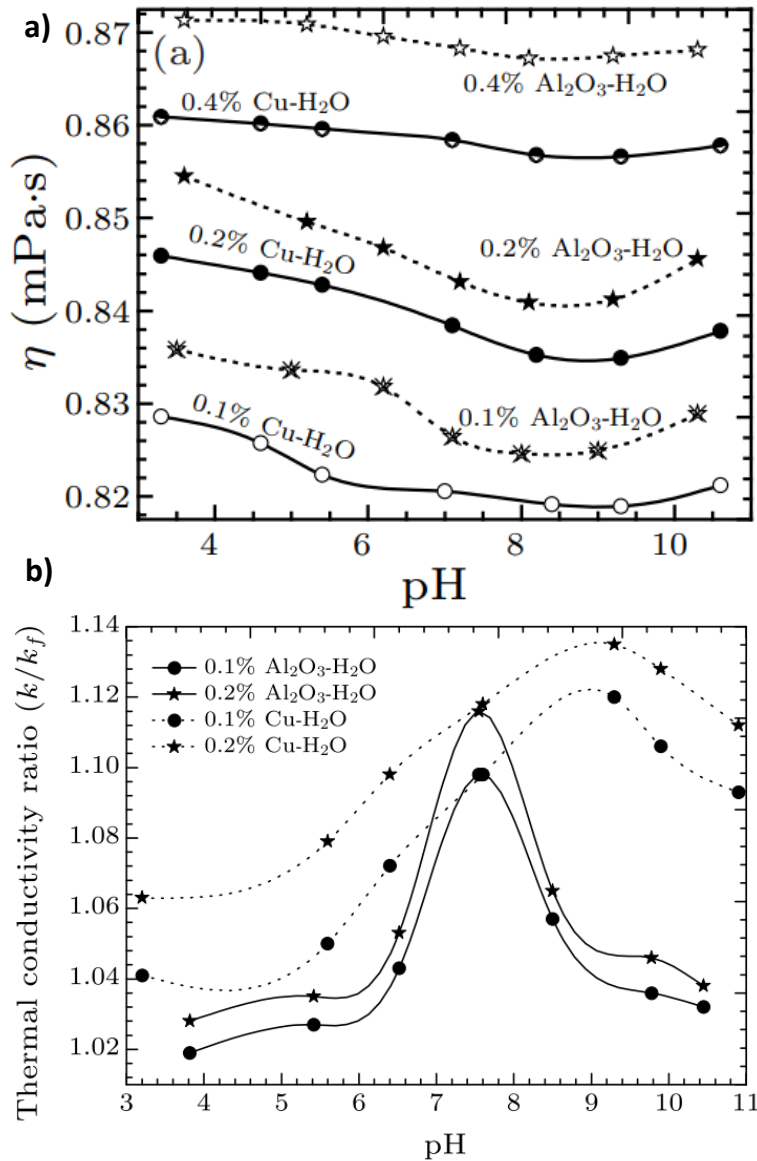


Figura 1.28: a) Variación de la viscosidad de los nanofluidos con diferentes pH y fracciones máxicas a 303K. b) Relación de conductividad térmica de las nanosuspensiones a diferentes valores de pH. Imágenes extraídas de Xian-Ju y Xin-Fang [98].

1.4.7. Nanofluidos en evaporación de agua

A causa de que los nanofluidos pueden ser utilizados para aprovechar la energía solar y aumentar la temperatura de estos, es que también pueden ser utilizados para desalinizar el agua como lo estudian en Wang *et al.* [99]. En dicho trabajo se compara la evaporación de agua pura, nanofluidos de CNT y un film poroso con CNT en la superficie del líquido. La evaporación de agua mejora en ambos casos con CNT, alcanzando 150 y 420 % para el nanofluido y el film, respectivamente. También se estudió la eficiencia de evaporación y de calentamiento, donde se obtuvieron los resultados mostrados en la Figura 1.29 en la cual el nanofluido tiene mayor eficiencia térmica que las otras dos configuraciones, pero en la eficiencia evaporativa es menor a la estructura del film pero mayor

aún así que el agua pura. La eficiencia de calefacción ($\eta_{calefacción}$), de evaporación ($\eta_{evaporación}$) y la total se calcularon con las ecuaciones 1.36, 1.37 y 1.38, respectivamente.

$$\eta_{calefacción} = \frac{C_p m_{rest} \Delta T}{I S t} \quad (1.36)$$

$$\eta_{evaporación} = \frac{\dot{m} h_{fg}}{I} \quad (1.37)$$

$$\eta_{total} = \eta_{calefacción} + \eta_{evaporación} \quad (1.38)$$

y

$$\dot{m} = \frac{\Delta m}{S t} \quad (1.39)$$

Con \dot{m} es la tasa de evaporación, m_{rest} la masa restante de agua después del proceso de evaporación en kg, I la intensidad solar en $W m^{-2}$, S el área expuesta al sol en m^2 , t el tiempo de iluminación en h y Δm es el cambio de masa de agua en kg .

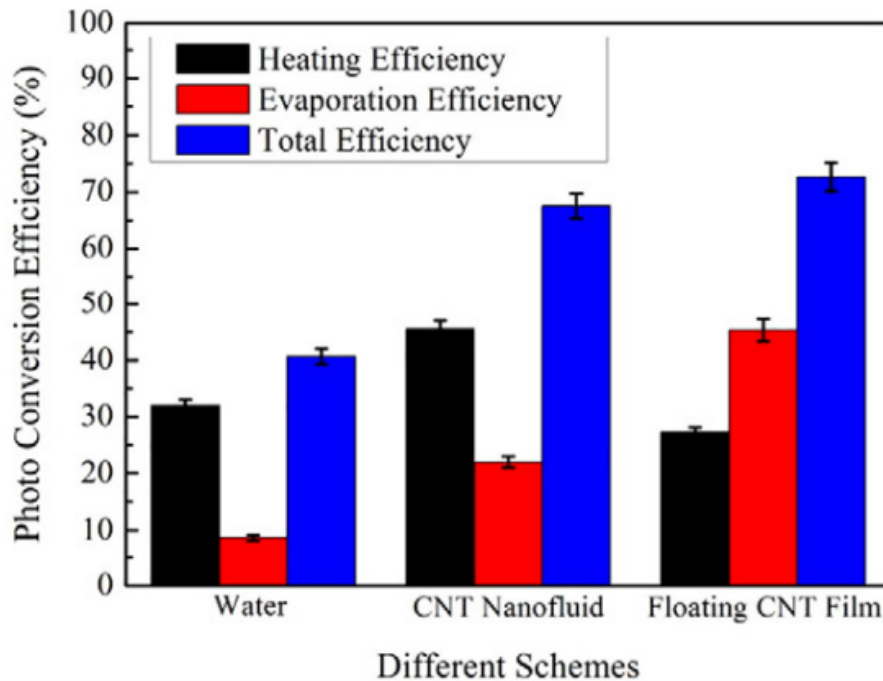


Figura 1.29: Eficiencia fototérmica de calentamiento, evaporación y total de los 3 montajes estudiados bajo el poder de iluminación solar de 5 soles. Imagen extraída de Wang *et al.* [99].

En Liu *et al.* [100] se hizo un estudio similar al anterior de Wang *et al.* [99] pero con un nanofluido de óxido de grafeno reducido (rGO). En este trabajo se obtuvo que la eficiencia de calentamiento promedio para el agua pura y nanofluido de rGO es muy parecido de 40 %, aunque distan bastante cuando se habla de eficiencia evaporativa, siendo el nanofluido de casi 20 % a la potencia de 1 sol, diferencia que iba aumentando a medida que se aumentaba la intensidad de radiación, llegando a casi 40 % para la intensidad de 7 soles. En este trabajo se utilizaron las ecuaciones 1.37 y 1.38 para la eficiencia de evaporación y eficiencia total, respectivamente, mientras que la eficiencia térmica

utilizada se presenta en la ecuación 1.40.

$$\eta_{ft} = \frac{m_{nf}Cp_{nf}\Delta T}{IA\Delta t} = \frac{mCp(T_i - T_o)}{IA(t_i - t_o)} \quad (1.40)$$

Para los 2 estudios de evaporación mencionados anteriormente se utilizó el esquema que se muestra en la Figura 1.30.

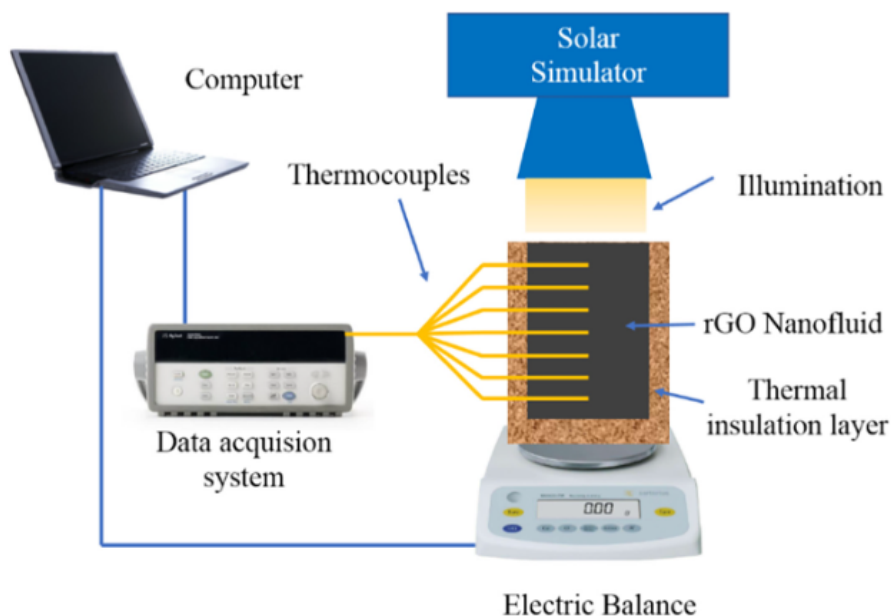


Figura 1.30: Esquema del montaje experimental para la generación de vapor solar. Imagen extraída de Liu *et al.* [100].

1.4.8. Disulfuro de Molibdeno (MoS_2)

El disulfuro de molibdeno es un Dicalcogenuro de Metales de Transición (TMD por sus siglas en inglés) bidimensional (2D) semiconductor que se está estudiando bastante por sus prometedoras propiedades eléctricas, fotocatalíticas y mecánicas. Debido a lo anterior, es que se está considerando para la producción de hidrógeno, baterías[101], paneles fotovoltaicos[102], etc. El MoS_2 es apreciado debido a su bajo costo, su abundancia y no toxicidad en comparación a otros materiales con similares beneficios, tales como el grafeno, óxido de grafeno (GO) y los nanotubos de carbono (CNT)[101] [102] [103].

El MoS_2 presenta 3 fases denominadas 2H, 1T y 3R, donde la única que se puede encontrar en el ambiente de forma natural es la 2H ya que las otras dos no son termodinámicamente estables. El término numérico significa el número de capas en la celda unitaria cristalográfica y la letra implica el tipo de celda unitaria H-hexagonal, T-tetragonal y R-rombohedrica. Los métodos de obtención de estas fases son variados como la exfoliación mecánica, exfoliación por inserción de iones (química) y deposición de capa atómica, aunque cada una de estas técnicas presenta ciertas ventajas como calidad, tamaño o cantidad de una fase por sobre la otra [102]. En la Figura 1.31 se presenta la vista superior de la estructura atómica del MoS_2 para las 3 fases distintas, 2H, 1T y 3R.

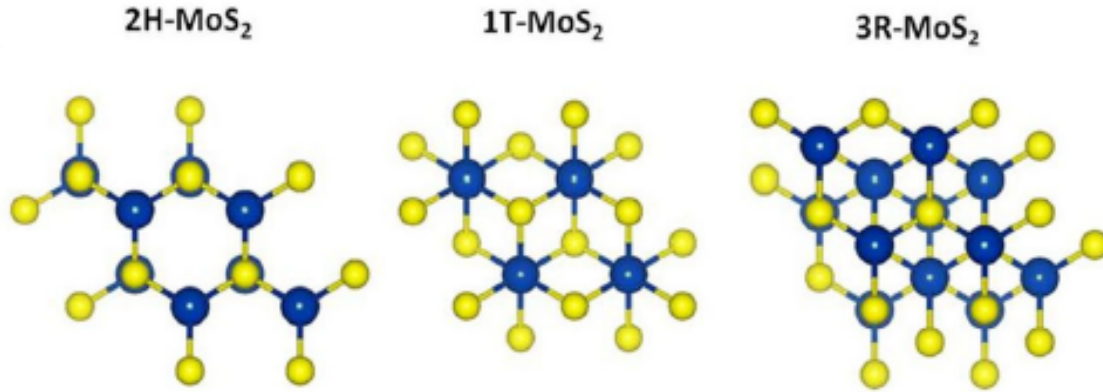


Figura 1.31: Vistas superiores de la estructura atómica de tres fases masivas de MoS_2 , como 2H, 1T y 3R. Imagen extraída de Gajanan y Hussainn [102].

La importancia de las fases de este material es la variación en las propiedades que genera cada una. Mientras que la fase 2H presenta una bandgap indirecta de 1.2 eV y se comporta como un semiconductor, la fase 1T tiene sobrepuesta la banda de valencia con la de conducción haciendo la bandgap igual a 0 eV presentando propiedades metálicas [104].

En el paper de Guo *et al.*[105] se realizó un estudio teórico llevando a cabo cálculos de Teoría Funcional de la Densidad (DFT) para comparar las propiedades electrónicas y mecánicas de las fases 2H, 1T y un híbrido entre ambas del MoS_2 . Respecto a las propiedades mecánicas, se calculó el módulo de Young para ambas fases, obteniendo un valor considerablemente menor para la fase 1T en comparación a la 2H, y lo mismo sucede con el híbrido de ambas fases comparado con la 2H. En relación a las propiedades electrónicas, a medida que pasa de la fase 2H a 1T, presentaba comportamiento desde semiconductor a conductor, pasando de bandgap 1.66 eV a 0 eV, respectivamente.

El disulfuro de molibdeno presenta menor citotoxicidad que el grafeno y sus similares, como se estudió en Wei Zhe *et al.*[103]. En aquel estudio, se analizó la viabilidad celular para 3 dicalcogenuros de metales de transición exfoliados (exTMD por sus siglas en inglés): el MoS_2 , WS_2 y WSe_2 mediante los métodos MTT y WST-8. Para el método MTT se obtuvo que la viabilidad celular se redujo casi al 80, ~ 100 y $<80\%$ para el MoS_2 , WS_2 y WSe_2 cuando la concentración de estos es de $25 \mu\text{g mL}^{-1}$, respectivamente; mientras que para el método WST-8 se obtuvo ~ 100 para el MoS_2 y WS_2 pero para el $\text{WSe}_2 <90\%$ para la misma concentración de estos TMD. A medida que aumenta la concentración de estos materiales, la viabilidad celular fue en descenso para todos los casos. De estos materiales estudiados, el más tóxico resultó ser el WSe_2 , seguido por el MoS_2 y el WS_2 . Finalmente, se concluye que el MoS_2 y WS_2 son menos tóxicos que los análogos orgánicos como el óxido de grafeno y grafeno halogenado, aún así, falta estudiar los efectos de estos materiales en la salud a largo plazo para poder incorporarlos a productos comerciales sin generar riesgos.

En el trabajo de Chou *et al.* [106] se estudió el MoS_2 exfoliado químicamente (ceMoS_2) como agente fototérmico en el infrarrojo cercano (NIR por sus siglas en inglés). Aquí se caracterizó el ceMoS_2 en el NIR, obteniendo que el coeficiente de extinción es de $29.2 \text{ L g}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ para la longitud de onda $\lambda = 800 \text{ nm}$, lo que es ~ 7.8 veces más que el óxido de nanografeno PEGilado, casi 2

veces que las nanovarillas de oro y comparable a las nanofojas de grafeno reducido, que presentan coeficientes de extinción de 3.6, 13.9 y 24.6 $L g^{-1}cm^{-1}$, respectivamente. Además, se estudio la conversión fototérmica del nanofluido de MoS_2 a distintas concentraciones para la misma longitud de onda mencionada anteriormente de $\lambda = 800nm$, obteniendose temperaturas de $20^\circ C$ para el agua pura, $40^\circ C$ para 38 ppm y casi $70^\circ C$ para 300 ppm, estos resultados fueron al cabo de 100 segundos.

Siguiendo la línea del trabajo anterior, en el estudio de [107] se comprobó que la absorbancia de radiación desde la longitud de onda 200 a 1000 nm fue mayor cuando el pH es igual a 4 como se observa a la izquierda en la Figura 1.32, mientras que a la derecha se presenta la relación entre el valor del pH de las nanofojas de MoS_2 y la intensidad de absorción, donde también es posible notar el color más oscuro de la mezcla cuando el pH es igual a 4. En ambos estudios se concluye que el nanofluido de MoS_2 presenta buena absorción en el Infrarrojo Cercano, lo que lo hace buen candidato para aplicaciones que requieran absorber en ese rango.

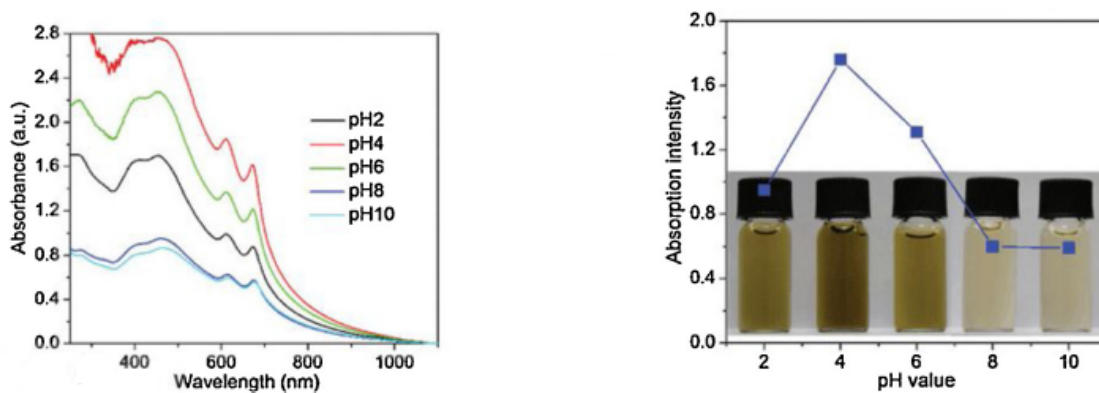


Figura 1.32: A la izquierda se encuentra el espectro de absorción UV-Visible de nanofojas de MoS_2 exfoliadas por $Au_{25} - BSA$ a diferentes valores de pH. A la derecha la relación entre el valor del pH de las nanofojas de MoS_2 y su intensidad de absorción con las imágenes ópticas correspondientes. Imagen extraída de Lu *et al.* [46].

Baby y Rajeev [108] caracterizaron óptica y estructuralmente las nanofojas de MoS_2 hechas con el método hidrotermal. Partiendo por la caracterización óptica, en la Figura 1.33 a, b y c se muestran los resultados obtenidos para el Análisis de Difracción de Rayos X (XRD por sus siglas en inglés), espectroscopia Raman y espectroscopia UV-Visible, respectivamente, donde MoS_2E corresponde al material exfoliado y el MoS_2 al sin exfoliar. El punto más importante de la XRD para verificar si está exfoliado el MoS_2 corresponde a la intensidad 002 que es considerablemente menor en el exfoliado que en el bulk. En la espectroscopia Raman los 2 peak que se presentan se mueven desde 375.88 y 403.47 a los 385.92 y $410.80cm^{-1}$ cuando es exfoliado con éxito el Disulfuro de molibdeno. Por último, en la espectroscopia UV-visible se presentan 5 peak, aunque los más relevantes corresponden a los que se encuentran en las longitudes de 634 y 694 nm que son los que verifican si el MoS_2 está exfoliado.

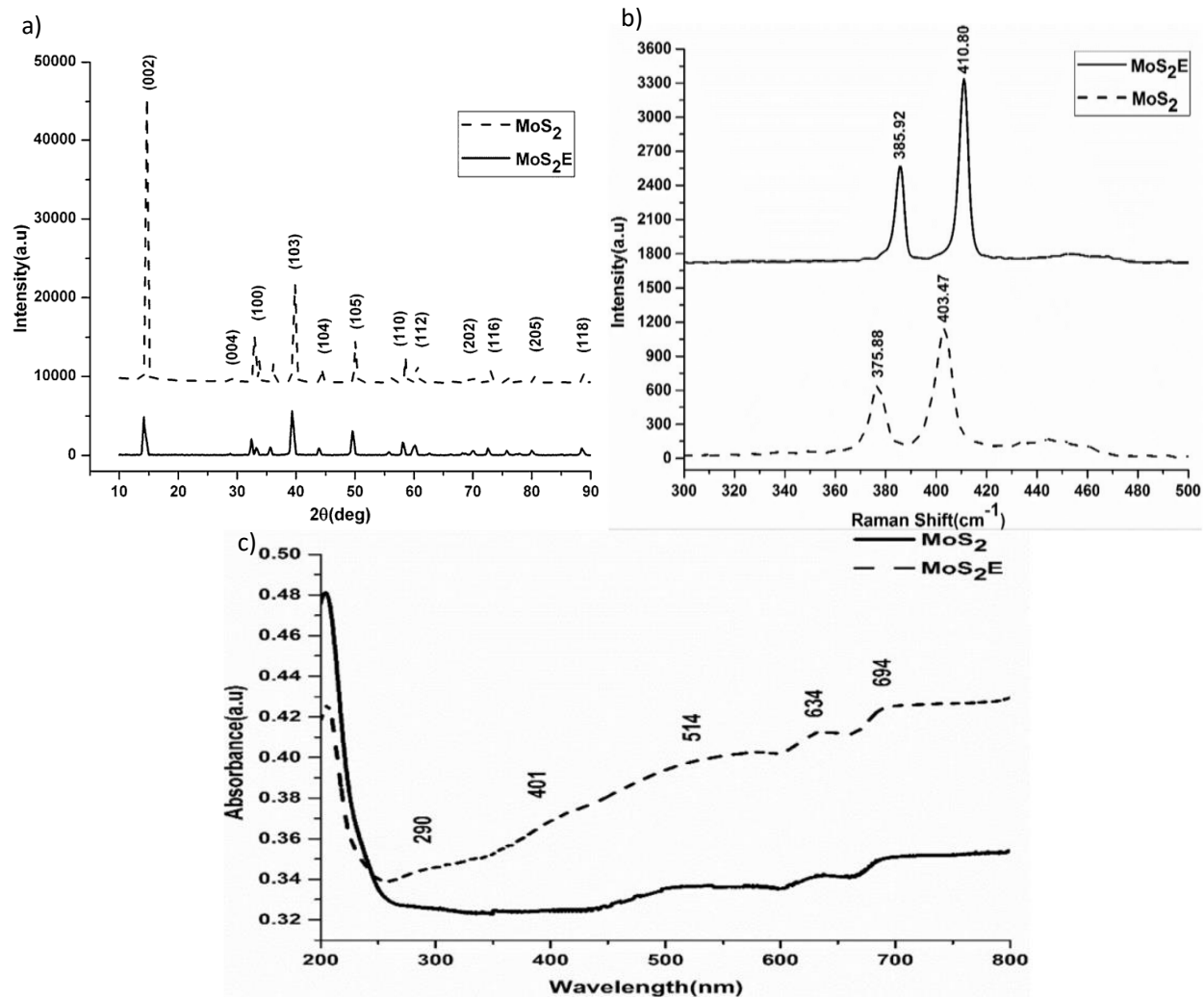


Figura 1.33: a). Patrón de XRD del bulk de MoS_2 (MoS_2) y del MoS_2 exfoliado a $130^\circ C$ por 2 horas (MoS_2E). b) Espectro Raman del bulk de MoS_2 (MoS_2) y del MoS_2 exfoliado a $130^\circ C$ por 2 horas (MoS_2E). c) Espectro de absorción del bulk de MoS_2 (MoS_2) y del MoS_2 exfoliado a $130^\circ C$ por 2 horas (MoS_2E).

Imágenes extraídas de Baby y Rajeev [108].

Continuando con la caracterización del trabajo de Baby y Rajeev [108], utilizando SEM y TEM obtuvieron una imagen de las capas que presentó su MoS_2 exfoliado, que se presentan en la Figura 1.34 y 1.35.

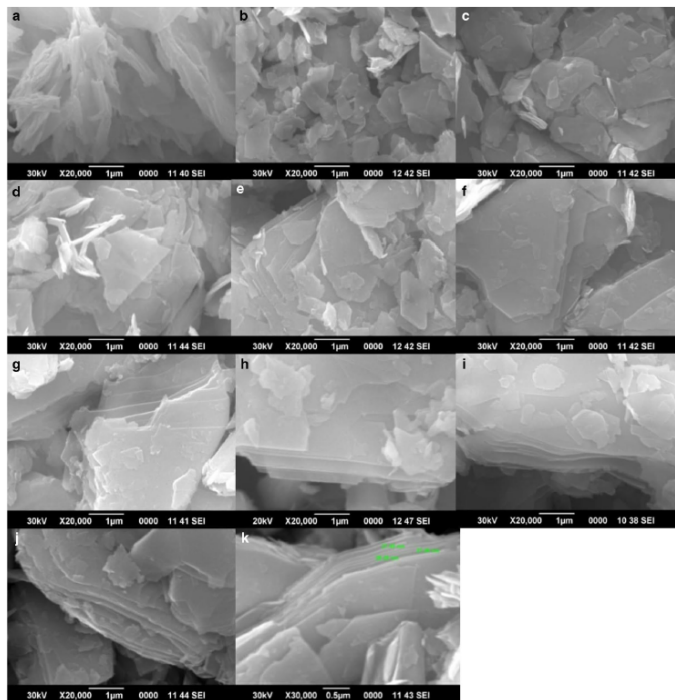


Figura 1.34: a) imagen SEM del bulk de MoS_2 , b-k MoS_2 exfoliado a diferentes temperaturas hidrotermales y tiempos. b) 110 °C por 2 h, c) 110 °C por 4 h, d) 110 °C por 6 h, e) 120 °C por 2 h, f) 120 °C por. Imagen extraída de Baby y Rajeev [108].

1.4.8.1. DASC de MoS_2

Ahora, en Deoukchen Ghim *et al.* [101], se estudiaron estructuras de hidrogel de nanocelulosa bacteriana (BNC por sus siglas en inglés) con Disulfuro de Molibdeno (MoS_2) para purificar agua con energía solar térmica. En dicho estudio se comparó el efecto de polvo de MoS_2 y este exfoliado químicamente (*ce-MoS₂*) para obtener nanohojas 2D. En la estructura sin exfoliar, se obtuvo un coeficiente de extinción (de 400 a 750 nm) del 90% mientras que el exfoliado alcanzó un 96%. Además de lo anterior, se observó la temperatura en un bulk de agua con la estructura de hidrogel de *ce-MoS₂* en la parte superior y un fluido con 100 ppm de *ce-MoS₂* a iluminación de 5.35 kWm^{-2} durante 10 minutos, logrando observar que el fluido con las partículas dispersas lograba una mayor temperatura en todo el fluido. En el fluido con las partículas de *ce-MoS₂* se alcanzó 10°C más que hidrogel en la superficie, además de presentar una reducción de temperatura de 9°C en los 6 mm de altura estudiados, mientras que la estructura de *ce-MoS₂/BNC* exhibió una diferencia de 14°C a los 6 mm.

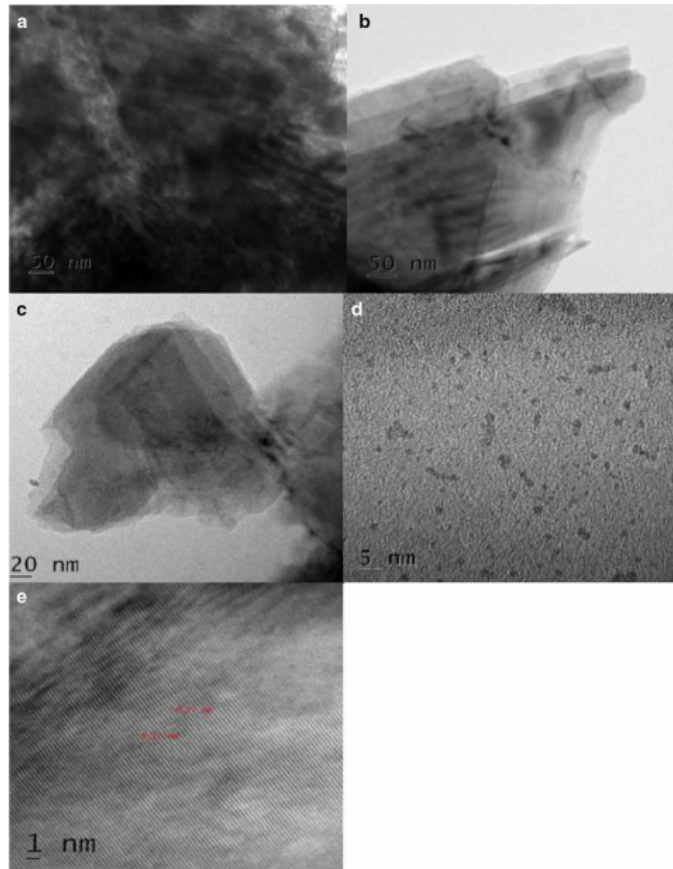


Figura 1.35: a) TEM del bulk de MoS_2 y b-e) MoS_2 exfoliado a $130^\circ C$ durante 2 horas. Imagen extraída de Baby y Rajeev [108].

En el mismo estudio anterior, para examinar que fracción del MoS_2 exfoliado pasó de la fase 2H a 1T, se realizó Espectroscopia de fotoelectrones emitidos por rayos X (XPS spectra) obteniéndose 60.3% de la fase 1T vs el 100% de la fase 2H antes de ser exfoliada. Posteriormente, se llevó a cabo un proceso de lavado para matar y limpiar el hidrogel con ce- MoS_2 de bacterias y residuos. Luego, se quiso estudiar la estabilidad de la fase 1T después de haber sido utilizada la estructura, en la cual se aplicó otra vez XPS obteniendo un valor de 47.8% de fase 1T. Después de emplearlo 20 veces en el proceso de evaporación, se consiguió observar que la estructura se mantuvo estable y hubo una reducción de 0.5% de la fase 1T a 2H.

En Ghim *et al.* [101], se estudió una solución de polvo de disulfuro de molibdeno y una estructura a partir de nanocelulosa bacteriana y nanohojas de disulfuro de molibdeno exfoliadas químicamente. Se comparó el coeficiente de extinción y la eficiencia de evaporación, dónde la estructura presentó un 4% más del coeficiente de extinción y también 19% en la tasa de evaporación comparado a la solución con MoS_2 . También, en dicho estudio se comparó la solución para dos intensidades de luz distintas, 0.76 y 5.35 kWm^{-2} , donde se obtuvo una eficiencia de evaporación solar de $\approx 59\%$ y $\approx 62\%$, respectivamente.

Capítulo 2

Objetivos

2.1. Objetivo General

Evaluar el desempeño del nanofluido de disulfuro de molibdeno (MoS_2) para su uso en Coletores Solares de Absorción Directa (DASC).

2.2. Objetivos específicos

- Estudiar el efecto de la adición de partículas al agua preparando nanopartículas de MoS_2 por exfoliación mecánica, caracterizándolas con técnicas de espectroscopia y difracción de rayos X y produciendo nanofluidos por sonicación.
- Evaluar la potencialidad que tiene el nanofluido de MoS_2 para DASC de bajas y altas temperaturas comparando la estabilidad en el tiempo y estimando el desempeño fototérmico y evaporativo de los fluidos con la adición de partículas de MoS_2 y GO comparados con agua destilada.

Capítulo 3

Materiales y Metodología

3.1. Materiales y Equipos

3.1.1. Materiales

En la Tabla 3.1 se presentan los reactivos utilizados.

Tabla 3.1: Reactivos utilizados. Se presentan sus recipientes en Anexo A.1

Reactivo	Marca
Ácido Acético (glacial) al 100% CH_3COOH	Merck
Agua Destilada 1 vez	-
Polvo de Disulfuro de Molibdeno (MoS_2) $<2\mu m$, 99%	Sigma Aldrich
Quitosano Peso Molecular Medio. Quitina Desacetilada, Poli(D-glucosamina)	Sigma Aldrich

Además de los reactivos fue necesario utilizar los siguientes implementos

- Vaso Precipitado de 1000 y 2000 ml.
- Frascos de polipropileno.
- Frascos de vidrio hermético de 10 y 100 ml.
- Placa petri de 15 ml.
- Placa de vidrio.
- Poliestireno expandido.

3.1.2. Equipos

Se utilizaron distintos equipos para el trabajo de producción del nanofluido y el estudio térmico.

1. **Balanza Analítica** Para poder preparar las nanopartículas de MoS_2 y los nanofluidos, se utilizó la balanza analítica Precisa 100A-300M de la Figura 3.1.



Figura 3.1: Balanza analítica Precisa 100A-300M.

2. **Agitador Magnético** Con el objetivo de mezclar y homogeneizar la mezcla de los materiales lo mejor posible, se utilizó el agitador magnético de la marca DGL modelo MS7-H550-S que se muestra en la Figura 3.2.

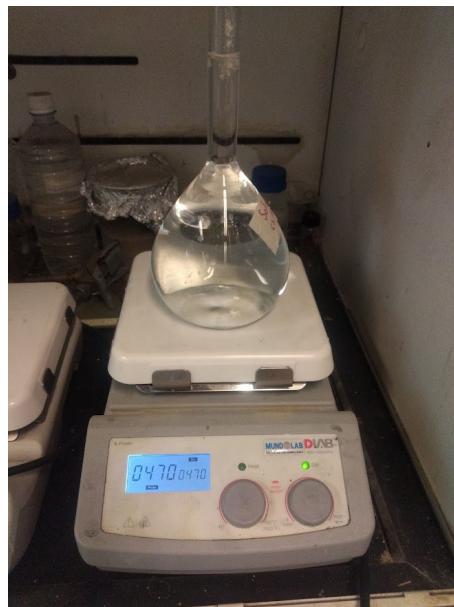


Figura 3.2: Agitador magnético.

3. **Sonicador de cañon** Para la preparación de nanopartículas de MoS_2 , y la posterior dispersión de partículas en los fluidos del mismo y del GO , se utilizó un sonicador de cañon Sonic Vibra-Cell que se muestra en la Figura 3.3. Este tiene una potencia de $500W$ y una frecuencia de ultrasonido de $20kHz \pm 5Hz$.



Figura 3.3: Sonicador de cañon Sonic Vibra-Cell.

4. **Centrífuga** Al momento de preparar las nanopartículas MoS_2 fue necesario preparar las nanopartículas se utilizó la centrífuga Supra R22 de la marca Hanil que se presenta en la Figura 3.4 y sus especificaciones en la Tabla A.1 en Anexo A.2.



Figura 3.4: Centrífuga Supra 22K Hanil.

5. **Baño de ultrasonido** Para dispersar las partículas en el nanofluido, se utilizó el baño de ultrasonido Transsonic T700 que se presenta en la Figura 3.5 que cuenta con un estanque de 9.5L y frecuencia de 35kHz. El resto de especificaciones se presentan en la Tabla A.2 en Anexo A.2.



Figura 3.5: Baño de ultrasonido.

6. **Espectrómetro UV-visible** Para ver el espectro de absorción del agua y de los nanofluidos, se utilizó el Espectrofotómetro Rayleigh UV 1601 de la Figura 3.6 y sus especificaciones están en la Tabla A.3 en Anexo A.2.



Figura 3.6: Termocupla de 4 canales "88598 AZ EB con memoria SD.

7. **Medidor de radiación Solar** Para medir la radiación entregada por el sol, se utiliza el medidor de energía solar Modelo SP505 Extech que mide entre los rangos de 0 a 3999 Wm^{-2} . El equipo se presenta en la Figura 3.7 y las especificaciones técnicas se presentan en la Tabla A.4 en Anexo A.2.



Figura 3.7: Medidor de radiación solar Modelo SP505 Extech.

8. **Simulador solar** Para realizar las pruebas de evolución de la temperatura y evaporación de los líquidos se utilizó un simulador solar SF300B de **SCIENCETECH** que se muestra en la Figura 3.8 con sus especificaciones en la Tabla A.5 en Anexo A.2. Cabe mencionar que el espectro entregado por el equipo no es igual al entregado por el sol por lo que usa un filtro AM1.5G lo que simula el espectro solar a nivel del suelo cuando el ángulo cenital del sol es de 48.2° , espectro que se muestra en la Figura 3.9 de acuerdo al fabricante y una densidad de potencia de 100 mWcm^{-2} .



Figura 3.8: Simulador solar modelo SF300B de **SCIENCETECH**.

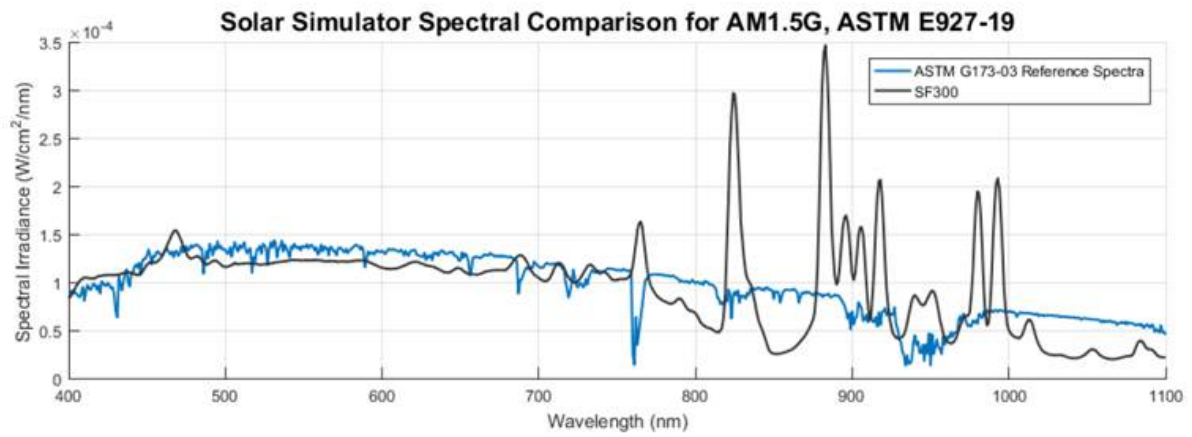


Figura 3.9: Espectro simulador solar SF300 con filtro AM1.5G.

9. **Termocupla** Para medir la evolución de la temperatura en el fluido en la experimentación de absorción de radiación solar con el simulador y concentrador, se utilizó la termocupla Registrador de tarjeta SD termopar de 4 canales K. Este modelo se presenta en la Figura 3.10 y en la Tabla A.6 en Anexo A.2 las especificaciones de este.



Figura 3.10: Termocupla de 4 canales "88598 AZ EB con memoria SD.

3.2. Metodología

3.2.1. Preparación de nanopartículas

Para preparar las nanopartículas de MoS_2 se hizo una mezcla de solución ácida al 1 % v/v de ácido acético (10ml de ácido acético y 990 ml de agua destilada) y se agregó 665 mg de quitosano. Posteriormente se agitó en un agitador magnético hasta que el quitosano queda claramente disuelto en la solución. Después se le agrega 2g del polvo de MoS_2 y agita nuevamente hasta lograr que este material se inmersa completamente en la mezcla y quede de manera homogénea. Finalmente se sonica en el sonicador de cañon durante 2 hora en periodos de 5s a un 40 % de la frecuencia de ultrasonido del equipo para adquirir nanoláminas con quitosano.

Después de la sonicación, se centrifuga la mezcla durante 10 minutos a 1500 RPM para poder separar el MoS_2 no exfoliado, el que queda como precipitado. El sobrenadante se vuelve a centrifugar a 8000 RPM durante 15 minutos, esto con el objetivo de precipitar el $CS - MoS_2$. Seguido a esto, se elimina el sobrenadante y se seca el precipitado en un horno de vacío Heraeus VTR 5022 a $40^\circ C$. El material secado corresponde a las nanolaminas de MoS_2 .

3.2.2. Preparación del nanofluido

- A. **Nanofluido de MoS_2 :** Para la síntesis del nanofluido de MoS_2 se agregó 100mg de las nanopartículas de MoS_2 a 200g de agua destilada con el fin de que la concentración sea de 0.05 % wt o 500ppm. Luego se sonicó en el cañón durante 2 horas para estabilizar las partículas en la solución y se repuso el agua perdida por evaporación. De esta solución se extrajo 10, 20 y 40g, se completaron hasta llegar a 100g con agua destilada y reducir las concentraciones a 50, 100 y 200ppm, respectivamente.
- B. **Nanofluido de óxido de grafeno:** Se agregan 100mg de óxido de grafeno preparado por el método de Hummers adaptado del trabajo de Cortínez *et al.* [109] a 200g de agua destilada (500ppm). Se coloca en el agitador magnético con el objetivo de sumergir todo el óxido de grafeno en el agua para posteriormente sonicar la mezcla en el sonicador de cañón durante 1 hora. Al igual que para el nanofluido de MoS_2 , se repone el agua perdida por evaporación y se extrae 10, 20 y 40g de la mezcla sonicada para completar 100g y reducir las concentraciones a 50, 100 y 200ppm, respectivamente.

3.2.3. Caracterización

Para poder verificar o no que las partículas estuviesen exfoliadas después de la preparación de estas, se utilizó un espectrómetro WITec Alpha 300-RA para ver el espectro Raman y un difractómetro avanzado de rayos X Bruker D8 para Difracción de Rayos-X (XRD).

Para la caracterización del nanofluido se utilizó un espectrómetro UV-visible en el rango máximo del equipo, es decir, desde 200 hasta 1100nm para ver la cantidad de absorción de radiación de los nanofluidos y los peak característicos de cada nanopartícula. Se utilizaron las cubetas de cuarzo de 10mm X 10mm X 40mm para almacenar el fluido a estudiar y la referencia, siendo esta última agua destilada.

3.2.4. Estabilidad

La estabilidad de los fluidos se estudió de forma cualitativa sacando fotografías cada cierto tiempo según la disponibilidad.

3.2.5. Estudio fototérmico de absorción de radiación solar con simulador solar

Para el estudio fototérmico se colocó 6g del fluido a estudiar en una placa petri de 50mm de diámetro durante 60 minutos, la cual se puso en una base aislante de poliestireno expandido recubierta de papel aluminio para reflejar la luz que no es absorbida por el fluido y que la base aislante no se caliente, evitando que el fluido reciba calor por conducción. Además, se colocó una placa plana de borosilicato transparente en la parte superior, a 10.7cm de la fuente de poder para lograr un sistema cerrado en el cual solo haya intercambio de energía, aunque la interfase líquido-aire se encuentra a 11.6cm del simulador solar. El montaje utilizado se presenta en la Figura 3.11.

En esta experiencia, se midió la temperatura en el tiempo y la eficiencia fototérmica que se calcula con la ecuación 1.40.

Cabe mencionar que antes de usar cada solución en los estudios fototérmicos, se sumergen los nanofluidos durante 20 minutos en el baño de ultrasonido para poder dispersar las partículas que hayan decantado y reagrupado en el reposo. En el caso del bulk, se agitó la mezcla hasta que quede homogénea.

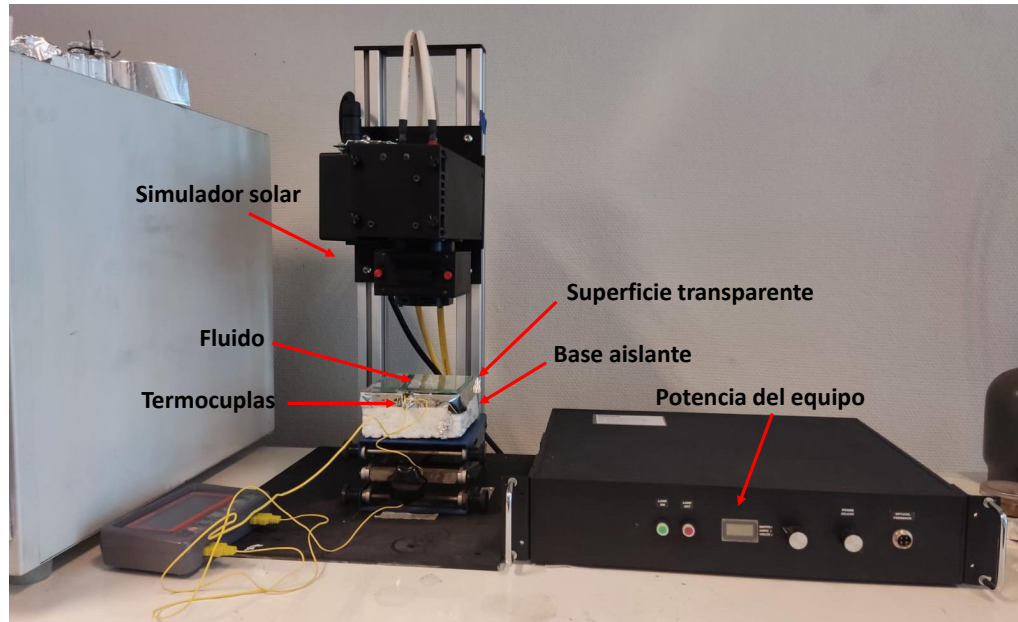


Figura 3.11: Montaje de estudio de medición de evolución de temperatura para fluidos y nanofluidos.

3.2.6. Eficiencia de evaporación

El montaje para la eficiencia de evaporación es similar al anterior que también utiliza el simulador solar aunque con algunas diferencias como la masa inicial es de 40g del fluido a estudiar, se masó antes del experimento y 40 minutos después. El líquido se coloca en un vaso precipitado de 50ml (4mm de diámetro) en una base aislante de poliestireno expandido y recubierta de papel aluminio para reflejar la luz y que el aislante no se caliente por radiación y entregue calor por conducción al fluido. La superficie de la base no está cubierta con la placa de borosilicato y se encuentra a 9.9cm de la fuente de poder, mientras que la interfase líquido-aire se encuentra a 12.7cm del simulador, donde se entrega irradiancia promedio de $1000Wm^{-2}$. El montaje utilizado se muestra en la Figura 3.12 y la eficiencia de evaporación se calcula con la ecuación 1.37 considerando la entalpía de vaporización del agua a 1 atmósfera igual a $2.257 \times 10^6 Jkg^{-1}$ como se hizo en Wang *et al.* [99].

Al igual que para el estudio fototérmico, los nanofluidos fueron puestos en el baño ultrasónico durante 20 minutos antes de utilizar; y en caso del bulk, se agitó la mezcla hasta que quede homo-

génea la mezcla.

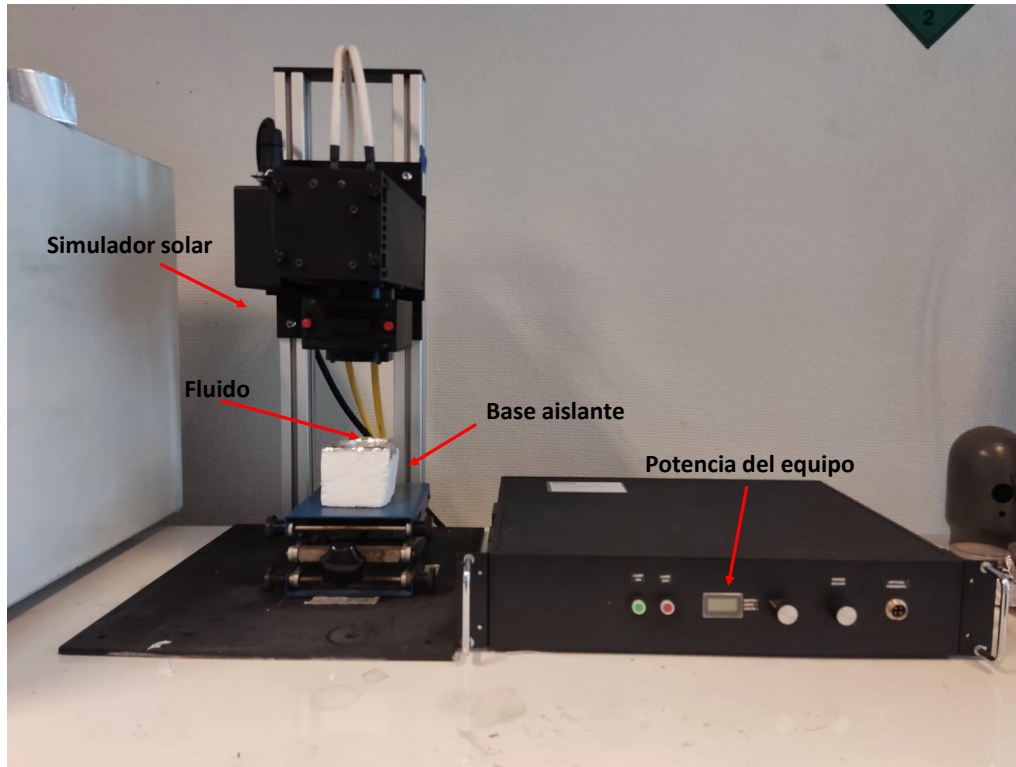


Figura 3.12: Montaje de estudio de eficiencia de evaporación de fluidos y nanofluidos.

3.2.7. Estudio fototérmico de absorción de radiación solar concentrada de 60 soles

Para estudiar el desempeño de los nanofluidos en un colector solar de altas temperaturas es que se utilizó el montaje que se presenta en la Figura 3.13 con 10ml de fluido por medición. En este se empleó un disco parabólico de factor 60, además de una base que pudiera sostenerlo y acomodarlo para recibir luz lo más directo del sol. Las muestras se pusieron en un doble recipiente para evitar las pérdidas de calor por convección que pueden ocurrir, ya que el fluido estaba en el frasco interior y en este mismo habían 2 termocuplas para poder medir la evolución de la temperatura. Las cavidades superiores de los envases se sellaron con espuma de poliuretano envuelta en papel aluminio para evitar lo máximo posible la pérdida de masa y calor por evaporación.

Cabe destacar que, al igual que para el estudio fototérmico con el simulador solar, antes de las mediciones se pusieron los fluidos en el baño ultrasónico durante 20 minutos. En el caso del bulk, se agitó la mezcla hasta que quedó homogénea la mezcla.



Figura 3.13: Montaje de equipo concentrador de radiación solar con un disco parabólico de factor 60.

Capítulo 4

Resultados y Discusiones

4.1. Caracterización de partículas

4.1.1. Difracción de Rayos X (XRD)

Esta caracterización se hizo con las nanoláminas obtenidas por el método mencionado en la sección 3.2. Los resultados se presentan en la Figura 4.1, donde no se logra observar el patrón del trabajo de Baby y Rajeev [108], ya que el peak (002) del exfoliado no disminuye, lo que es característico de las partículas exfoliadas, mostrando que las partículas secas no se encuentran exfoliadas. Que las nanoláminas de MoS_2 producidas no estén exfoliadas se puede deber precisamente a que en la etapa de secado las nanoláminas se reaglomeran [110].

El quitosano es un polímero polielectrolito catiónico que sus grupos aminos están protonados en un medio acuoso ácido [111] el cual se debe unir a las nanoláminas de MoS_2 que tiene cargas negativas en su superficie por los átomos de azufre (-0.25e) mientras que el átomo de molibdeno se encuentra en el interior con carga positiva (+0.5e)[112]. Por la carga negativa presente en los átomos de azufre en la superficie y la carga positiva del quitosano es que este puede agregarse a la superficie de las capas. Este polímero produce cargas positivas al unirse a la superficie de las nanoláminas de MoS_2 , originan repulsión electrostática entre ellas mismas impidiendo que se reaglomeren y dotando estabilidad en la solución. Estas fuerzas de repulsión entre las partículas dominan cuando la solución se encuentra diluida de iones, sin embargo, cuando la concentración de iones aumenta como ocurre en el proceso de secado al eliminar el agua, las fuerzas de corto alcance como las de van der Waals y fuerzas de interacción iónicas comienzan a dominar, produciendo la reaglomeración de las nanoláminas[113][114] siendo la razón de los resultados obtenidos.

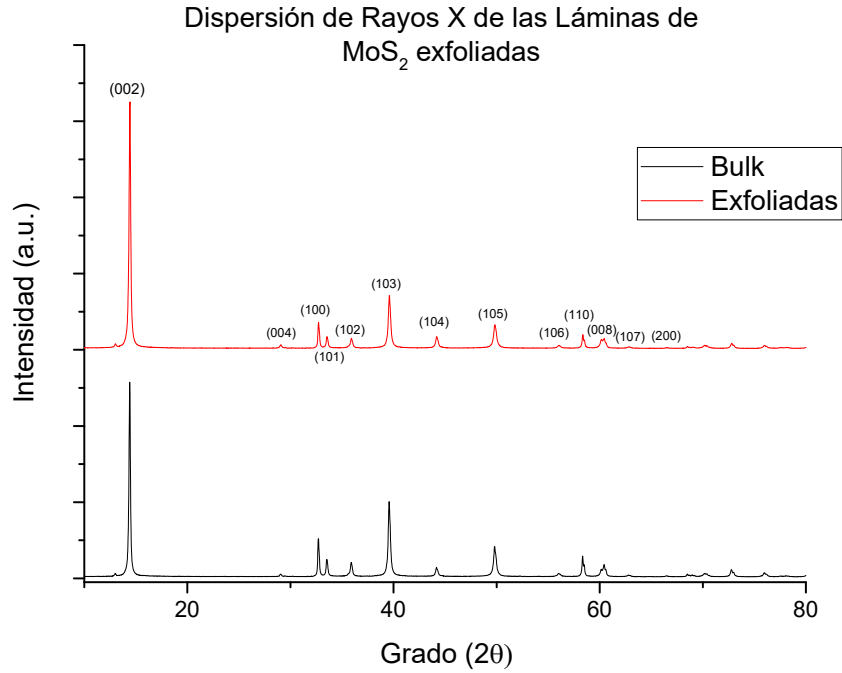


Figura 4.1: Difracción de Rayos X (XRD) para las nanoláminas exfoliadas de MoS_2 .

4.1.2. Espectroscopia Raman

Ahora, en la Figura 4.2 se presentan los resultados espectroscopía Raman para el bulk y las partículas exfoliadas. En ésta se presentan 2 peak, el E_{2g}^1 que se debe por la vibración en el plano de los átomos de Azufre y Molibdeno; y el A_{1g} se debe a las vibraciones fuera del plano de los átomos de Azufre. Se puede observar que los peak de las partículas al exfoliarse sufren un desplazamiento hacia la izquierda desde 378 y 405nm a 374 y 404nm, respectivamente, lo que corresponde a la dirección contraria a los mostrados en Baby y Rajeev [108]. El alejamiento de los peak cuando las partículas están exfoliadas se debe a las grandes interacciones Coulómbicas entre las nanoláminas. Además de lo anterior, tampoco se observa una reducción en el tamaño de los peak, lo que corresponde a otra característica indicativa de que MoS_2 fue exfoliado correctamente [108]. Al igual que en la difracción de rayos X, esto se explica por el secado de las láminas y la presencia de quitosano entre las mismas [110].

Ahora, en la espectroscopía Raman tampoco se tiene un resultado claro que confirme la exfoliación de las partículas, pues en la Figura 4.2 se presenta un desplazamiento del exfoliado hacia la izquierda desde 378 y 405nm a 374 y 404nm, respectivamente, lo que es la dirección contraria al mostrado en Baby y Rajeev [108]. El alejamiento de los peak cuando las láminas están exfoliadas se debe a las grandes interacciones Coulómbicas entre las nanoláminas. Además de lo anterior, tampoco se observa una reducción en el tamaño de los peak, lo que corresponde a otra característica indicativa de que MoS_2 fue exfoliado correctamente [108]. Esto se podría explicar por las mismas razón del secado mencionado en la Difracción de rayos-X.

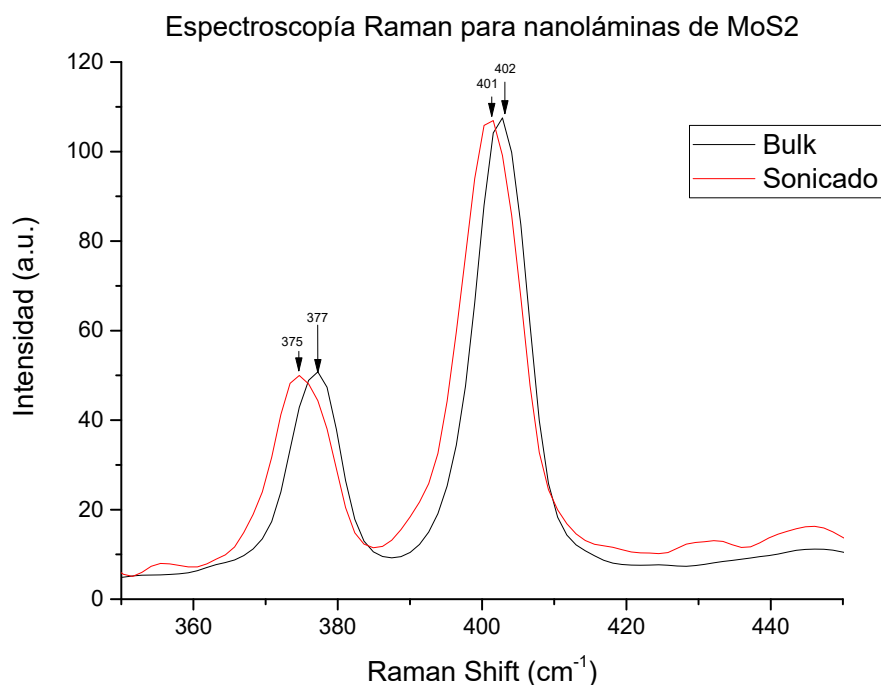


Figura 4.2: Espectroscopía Raman para las nanoláminas exfoliadas de MoS_2 .

4.1.3. Espectroscopia UV-Visible

Disulfuro de molibdeno

Para verificar que las partículas se encuentren exfoliadas en suspensión, se observa el espectro de absorción entre 350 a 800nm como se muestra en la Figura 4.3. Se puede observar que el espectro del material exfoliado es diferente al del bulk a pesar de estar a la misma concentración. Además de esa comparación cualitativa, se puede observar la presencia de 2 peak característicos en 623 y 686nm del material exfoliado, longitudes que se encuentran cerca de 612 y 674nm reportados del MoS_2 exfoliado en agua pura [115] y de los 619 y 677nm cuando este material se encuentra exfoliado con quitosano [116]. Estos peak se producen por la división energética de la banda de valencia y el acoplamiento orbital de espín y concierne a la transición excitónica directa A y B de los dicalcogenuros de metales de transición (TMDC) [117][118].

Óxido de grafeno

También, se realizó el mismo estudio para el óxido de grafeno que se presenta en la Figura 4.4. Se puede observar que hay un peak en 234nm y un “hombro” en 306nm, los que son consistentes con trabajos previos[119] [120] y son característicos del GO. El peak de los 234nm se puede deber a la transición electrónica del orbital $\pi \rightarrow \pi^*$ y el “hombro” en los 306 a la del orbital $n \rightarrow \pi^*$ [119].

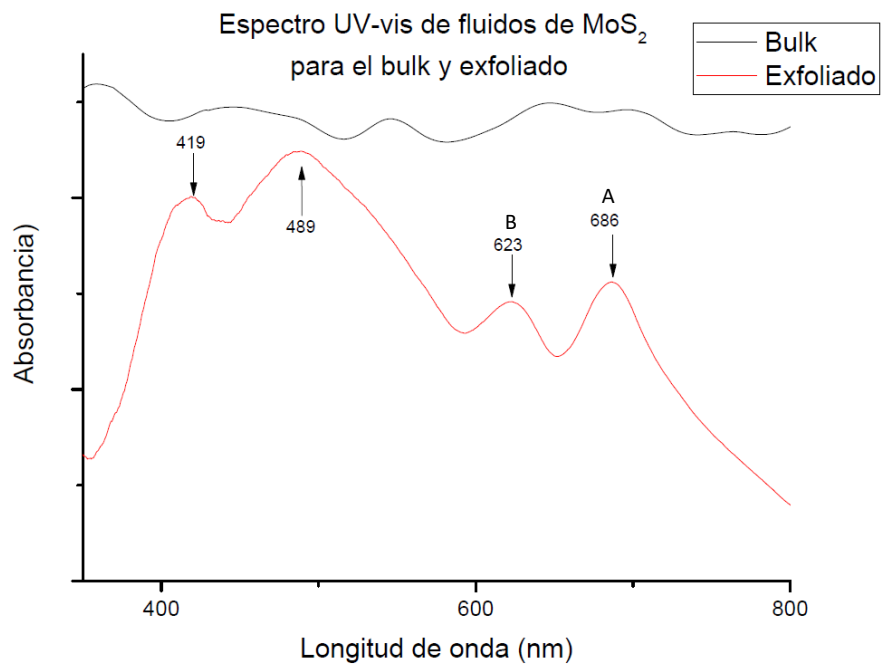


Figura 4.3: Espectro de absorción del bulk de MoS_2 y las partículas exfoliadas de este material en las longitud de onda 350 a 800nm. La medición fue realizada a la concentración de 500ppm aunque normalizado.

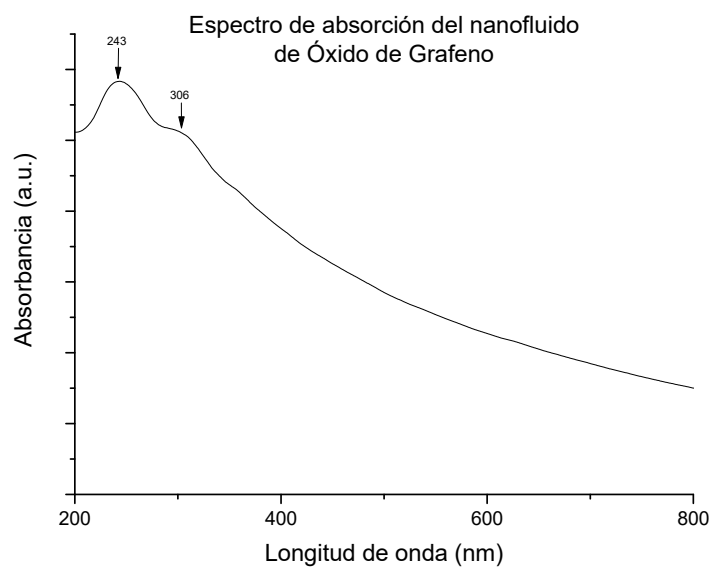


Figura 4.4: Espectro de absorción del GO . La medición fue realizada a la concentración de 50ppm entre 200 y 800nm.

4.2. Estabilidad de fluidos

La estabilidad de los fluidos se estudió por medio de fotografías del bulk y exfoliado de MoS_2 , y el de GO . Sin embargo, con este método no se obtienen resultados cuantitativos.

4.2.1. MoS_2

Para comparar la estabilidad del MoS_2 para el bulk y el exfoliado, se observa en la Figura 4.5a el fluido a 500ppm con el bulk de MoS_2 de la marca Sigma Aldrich en el tiempo 0, mientras que en la Figura 4.5b el mismo fluido 69h y 24 min o 4164 min después, donde se observa claramente la separación de las partículas sólidas del líquido, lo que significa que las partículas del polvo de MoS_2 son muy grandes para ser estables por un periodo prolongado de tiempo. El MoS_2 ha presentado hidrofobicidad [121], lo que puede explicar la rápida separación de las fases y las partículas que quedan en la parte superior del fluido.

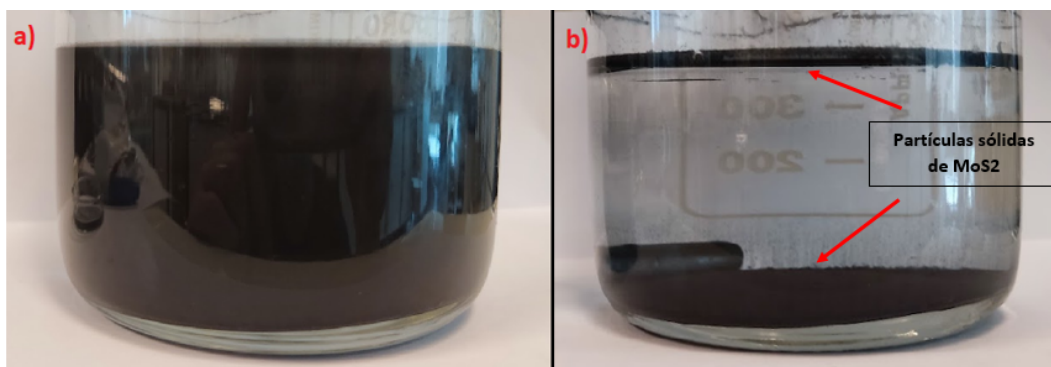


Figura 4.5: Estabilidad de bulk de MoS_2 . La imagen a) corresponde al bulk a 500ppm recién agitado en $t=0$, mientras que b) 69h y 24min o 4164 min después de la imagen a)

A pesar de que el bulk con MoS_2 presentó estabilidad muy baja, cuando las partículas han sido exfoliadas, esta mejora, cómo se presenta la Figura 4.7a, donde se muestra el nanofluido para las concentraciones de 50, 100, 200 y 500ppm de izquierda a derecha en el tiempo $t=0$, los cuales se pueden observar homogéneos, sin embargo, pasado 22 horas los sólidos comienzan a sedimentar como se ve en la Figura 4.7b ya que la superficie es transparente y se va oscureciendo a medida que se baja en la altura. Después, pasadas 90 horas y 42 minutos como en la Figura 4.7c, no hay mucha diferencia respecto que a las 22 horas, aunque es más notorio que el disulfuro de molibdeno ha decantado, principalmente para las 50 y 100ppm en comparación a las mayores concentraciones.

La diferencia entre el exfoliado y el bulk es notoria, pues al cabo de las 90h aún se puede oscuro el seno del fluido, mientras que el bulk está completamente claro pasadas las 69h. Esto podría ser explicado por la velocidad de sedimentación, lo cual es descrito por la ley de Stokes como se menciona en Alshora *et al.* [122] y Blagovidova y Tentsova [123], que relaciona el tamaño de partícula, viscosidad del medio y la densidad. En estas soluciones, la concentración y densidad son las mismas, por lo que el tamaño de partícula que afecta también a la viscosidad son los que puede ver provocar la separación de las partículas que se pudo ver en las imágenes. Por otro lado, el cambio en la concentración con la altura del fluido exfoliado podría explicarse por esto mismo, porque las partículas más pequeñas quedan aún suspendidas mientras que las grandes sedimentan. De esto, se puede deducir que las nanopartículas están parcialmente exfoliadas.

Además de lo mencionado anteriormente, la estabilidad del MoS_2 exfoliado fue mejor que el sin sonicar a causa del quitosano. Este polímero otorga cargas positivas a las láminas del MoS_2 al adicionar múltiples grupos amino e hidroxilos, lo que provoca repulsión entre las láminas que son atraídas por ellas mismas por las fuerzas de Van der Waals las mismas [110].

Para finalizar con la estabilidad del MoS_2 , se ha reportado que a mayor número de capas de MoS_2 presenta una mayor hidrofobicidad [124] [125], lo que puede explicar que el polvo de MoS_2 no sea estable y el exfoliado lo sea parcialmente. Sin embargo, también se ha expuesto que el bulk de MoS_2 es intrínsecamente algo hidrofílico debido a que tiene componentes polares, pero por su capacidad para absorber contaminantes hidrocarburos proporcionan mayor hidrofobicidad, la que ha sido obtenida en otros estudios [126].

4.2.2. GO

En la Figura 4.6a se presenta el nanofluido de GO a distintas concentraciones, de 50, 100, 200 y 500ppm de izquierda a derecha apenas se produjo el nanofluido (sonicado 1h). Mientras que en la Figura 4.6b, se presenta estos mismos fluidos 93 5h después, donde se observa un cambio notorio en la claridad de los fluidos, lo que ocurre por la sedimentación de las partículas.

Estos fluidos, en contraposición al de MoS_2 , se observa homogeneidad en todo el fluido, aunque es posible notar que algunas partículas sedimentaron en el fondo de las 50 y 100ppm, mientras que en las concentraciones más altas no es posible advertirlas por su color oscuro. La sedimentación de algunas partículas no implica que el nanofluido no sea estable como es el caso del GO , mientras que la diferencia en la concentración de partículas con la altura se conoce como parcialmente estable (Véase Figura 1.14), por dicha razón es que se puede afirmar que el nanofluido de GO presenta mejor estabilidad que el de MoS_2 .

La estabilidad que se puede observar de forma cualitativa en este nanofluido se reafirma con los resultados obtenidos por Nuncira *et al.* [127] y Cham sa-ard *et al.* [128], lo que se debe a las altas fuerzas de repulsión electrostática de los grupos funcionales que contienen oxígeno del GO [127]. Además de las altas fuerzas de repulsión electrostática, los grupos funcionales de GO presentan hidrofiliidad, por lo que es un material estable en agua, facilitando la sonicación y estabilizando la estabilidad del nanofluido [125].

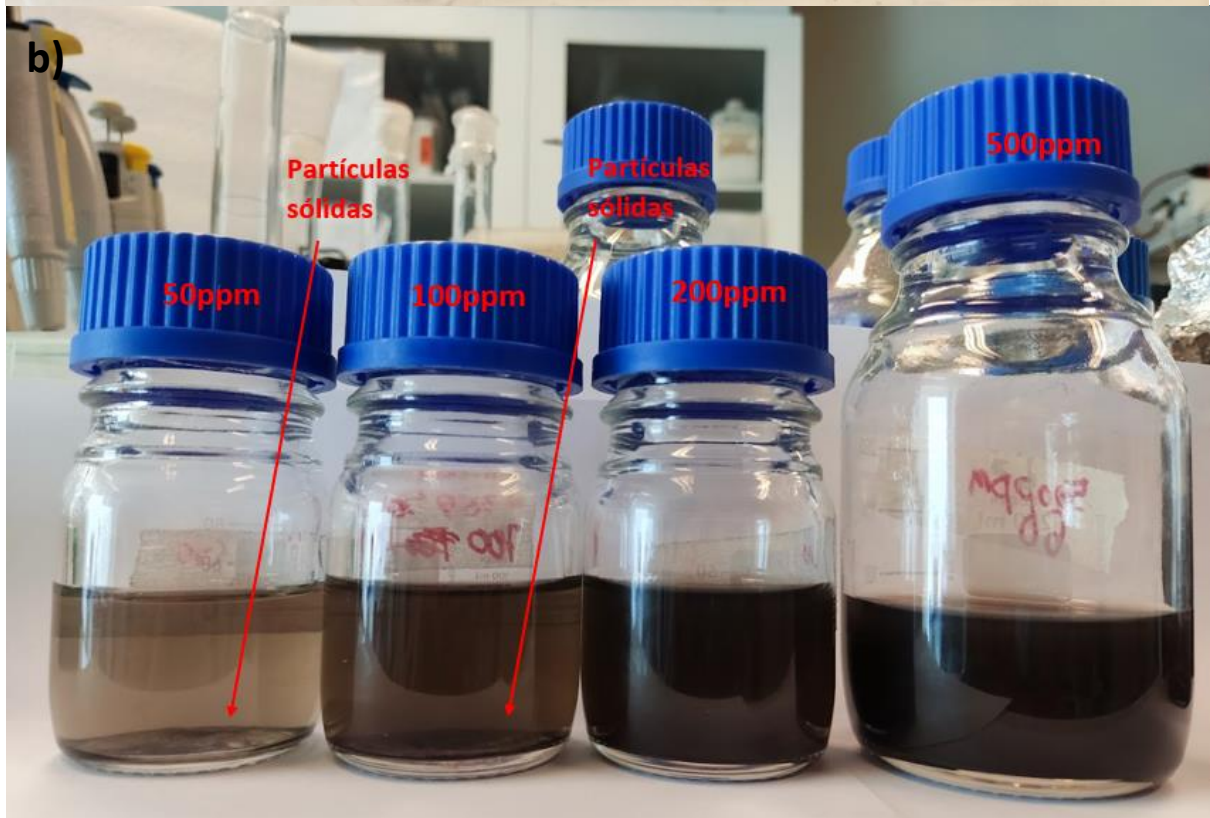
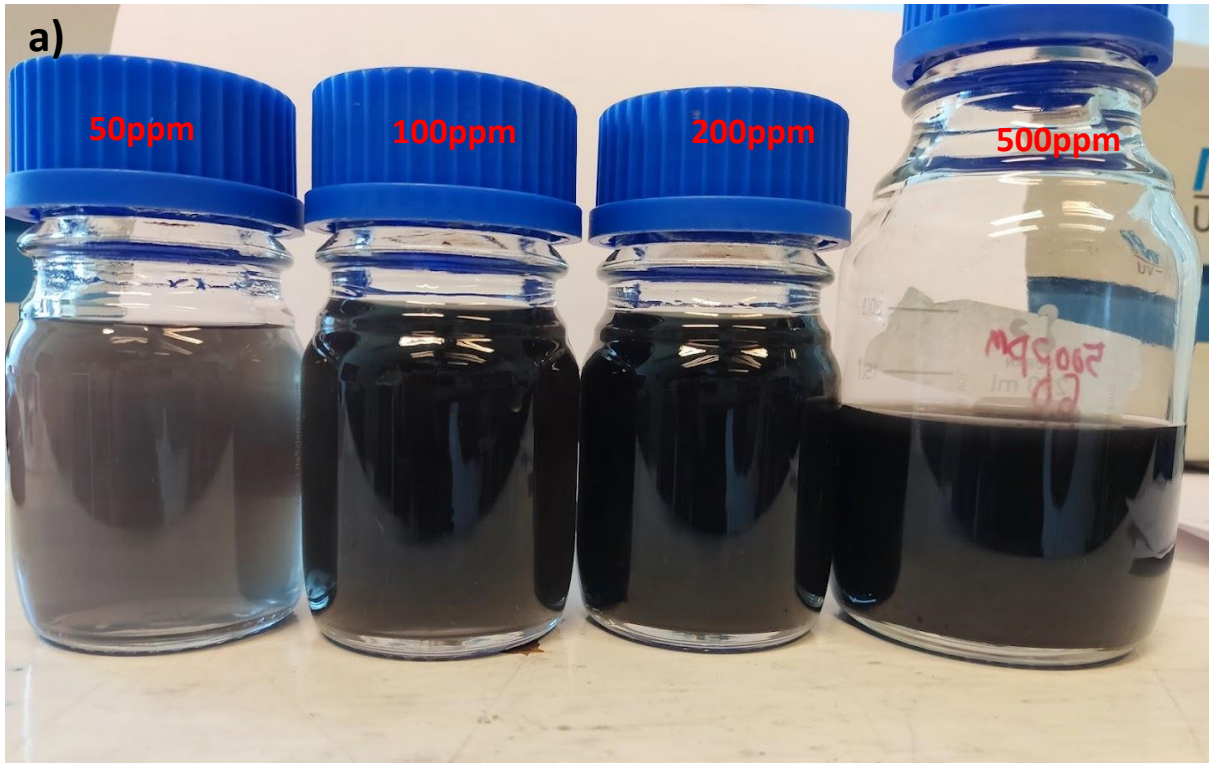


Figura 4.6: Nanofluido de *GO* a distintas concentraciones en tiempo a) $t=0\text{min}$; b) $t=93\text{h}$ y 38min o 5618min después. La concentración es de 50, 100, 200 y 500ppm desde izquierda a derecha.

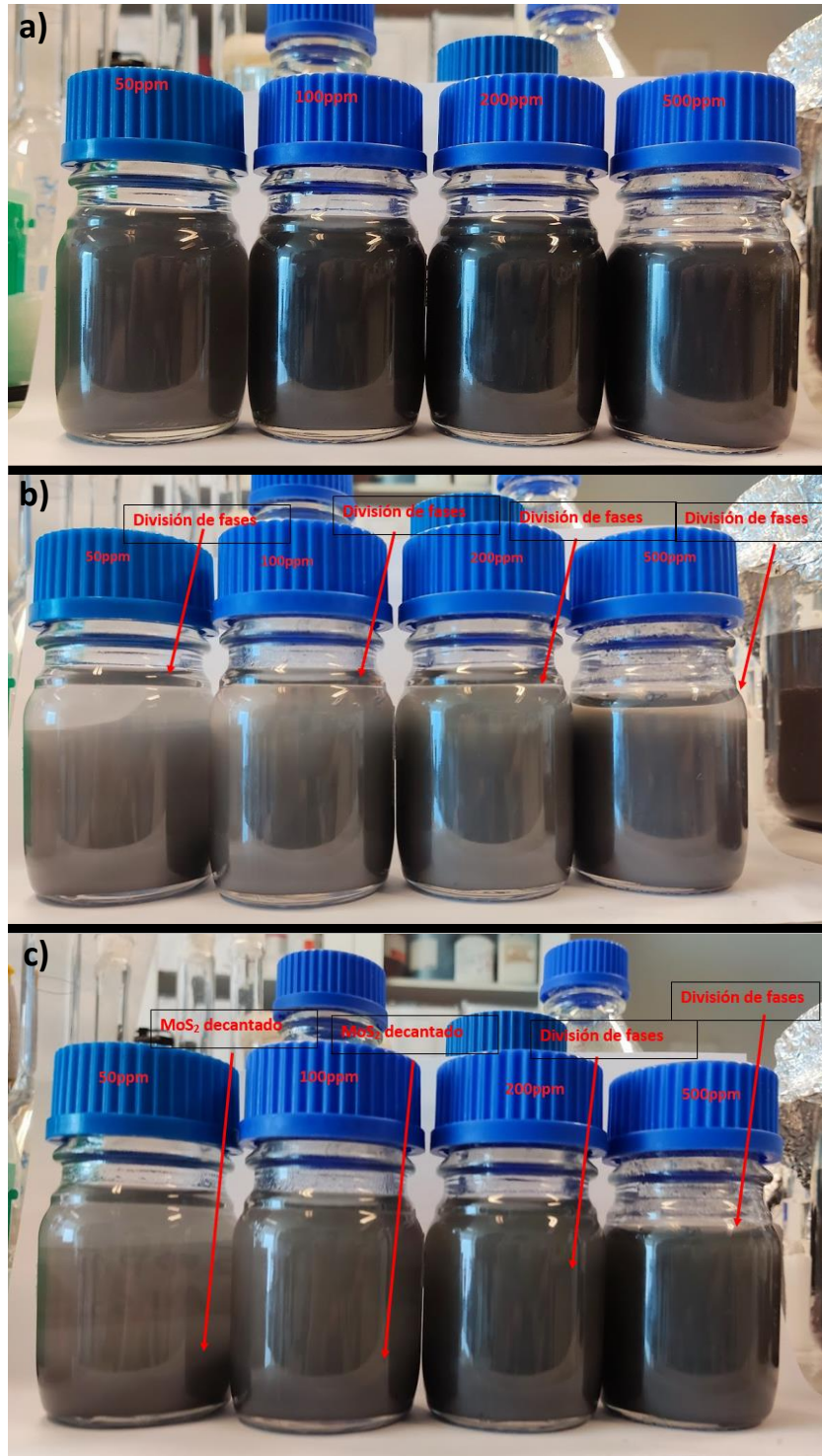


Figura 4.7: Nanofluido de MoS_2 a distintas concentraciones en tiempo a) $t=0\text{min}$; b) $t=22\text{h}$ o 1320min después; y c) $t=90\text{h}$ y 42min o 5442min después. La concentración es de 50, 100, 200 y 500ppm desde izquierda a derecha.

4.3. Absorción de radiación

4.3.1. Transmitancia

Para ver la cantidad de radiación que pueden absorber los fluidos, se estudio la transmitancia de estos en el rango UV-visible de 200 a 1100nm.

MoS₂

En esta parte se puede ver la transmitancia del nanofluido de *MoS₂* a las concentraciones de 50, 100, 200 y 500ppm y la irradiancia solar en la Figura 4.8. Es claro que la transmitancia disminuye al adicionar cualquier número de partículas al agua, de 50 a 500ppm. Pese a esto, cuando la concentración supera los 100ppm, la variación es prácticamente insignificante en el rango estudiado.

La despreciable variación en la transmitancia, después de las 100ppm, se debe a que la radiación deja de absorberse en el seno del líquido y pasa a concentrarse solamente en la superficie [129], produciendo un efecto de sombra dejando de ser un fenómeno de absorción volumétrico para pasar a ser superficial.

Además de lo anterior, se puede ver que el agua presenta transmitancia casi del 100% en el espectro UV-visible estudiado como se ha demostrado[130], no obstante, hay un valle en los 970nm (peak en la absorbancia) que se debe al acomplamiento del primer armónico de la vibración de estiramiento simétrico y el estiramiento antisimétrico fundamental del enlace O-H ligado al hidrógeno [131] [132] el cual es característico del agua entre las moléculas estudiadas. Por dicha razón es que en la transmitancia del nanofluido también se puede ver ese valle y contribuye en la absorción de radiación en ese intervalo del espectro.

Se puede observar que la transmitancia entre los 200 y 300nm no es útil para la absorción de radiación solar pues en ese rango el sol no emite energía. Por otro lado, es importante notar que la transmitancia es baja en el espectro visible (380 a 750nm) que es el intervalo en donde más energía entrega el sol en las longitudes de ondas estudiadas.

Por otra parte, también se muestra para el *MoS₂* sin exfoliar y exfoliado a 500ppm en la Figura 4.9. Es claro observar que la adición de partículas de *MoS₂* disminuye la transmitancia en comparación al agua, mejorando la absorción de radiación en el espectro estudiado, independientemente del proceso de exfoliado. No obstante, es aún más claro que la transmitancia es mucho menor cuando las partículas pasaron por dicho proceso para reducir el número de capas (y tamaño de partícula), lo cual puede deberse a la distribución de tamaño de partícula, ya que se ha demostrado que a mayor tamaño de estas, se reduce la absorción de radiación en ciertas longitudes de onda, mientras que en otras pueden tener similar o igual absorbancia [133].

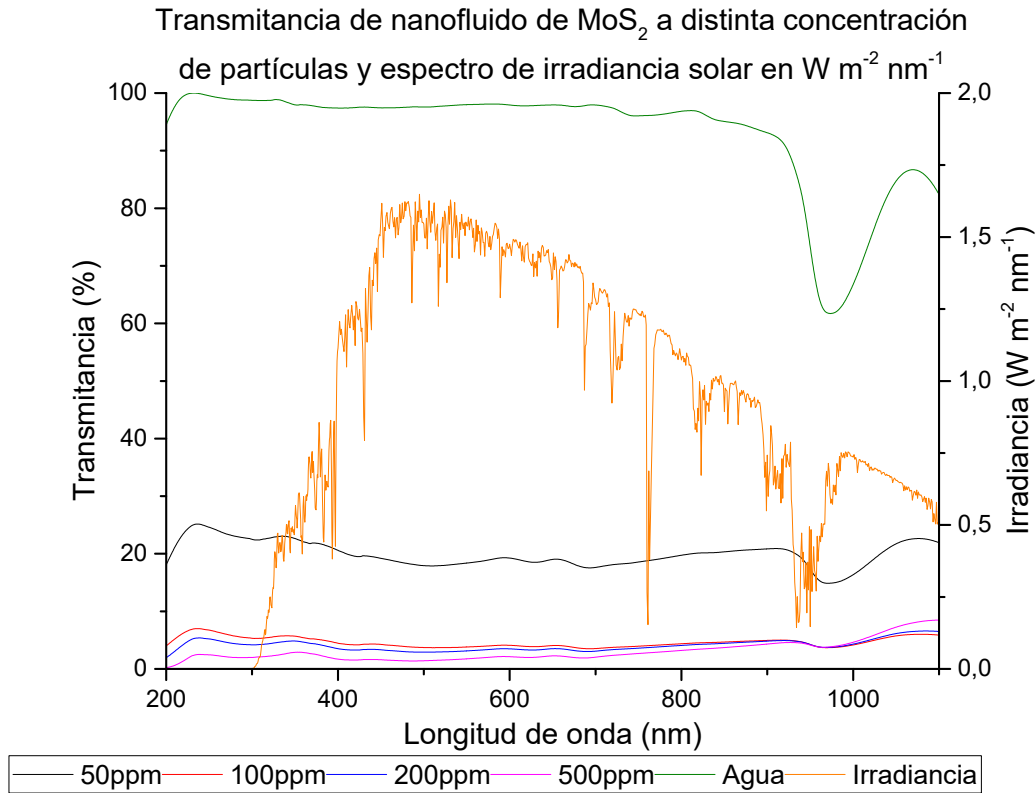


Figura 4.8: Transmitancia de los nanofluido de MoS_2 a distinta concentración de partículas, y la irradiancia solar a nivel de la tierra en el ángulo cenital solar de 48.2° en $\text{W m}^{-2} \text{ nm}^{-1}$.

La estabilidad del fluido también puede explicar la mejor transmitancia para el exfoliado comparado al bulk, ya que las partículas en el bulk tienden a aglomerarse y la mezcla deja de ser homogénea, presentando efectos negativos en la absorción de radiación pues en algunos puntos las partículas son más grandes y presentando menor concentración. Por otro lado, la separación de fases que ocurre entre el agua y el MoS_2 sin exfoliar ocurre en poco tiempo, por lo tanto mientras se hizo la medición, estas pudieron estar decantando y reduciendo la concentración en el seno del fluido, y en consecuencia, aumentando la transmitancia. Finalmente, la razón área/volumen de las partículas exfoliadas debiese ser menor, por lo tanto, presentan mayor área superficial para absorber la radiación que el bulk para la misma masa de partículas[29].

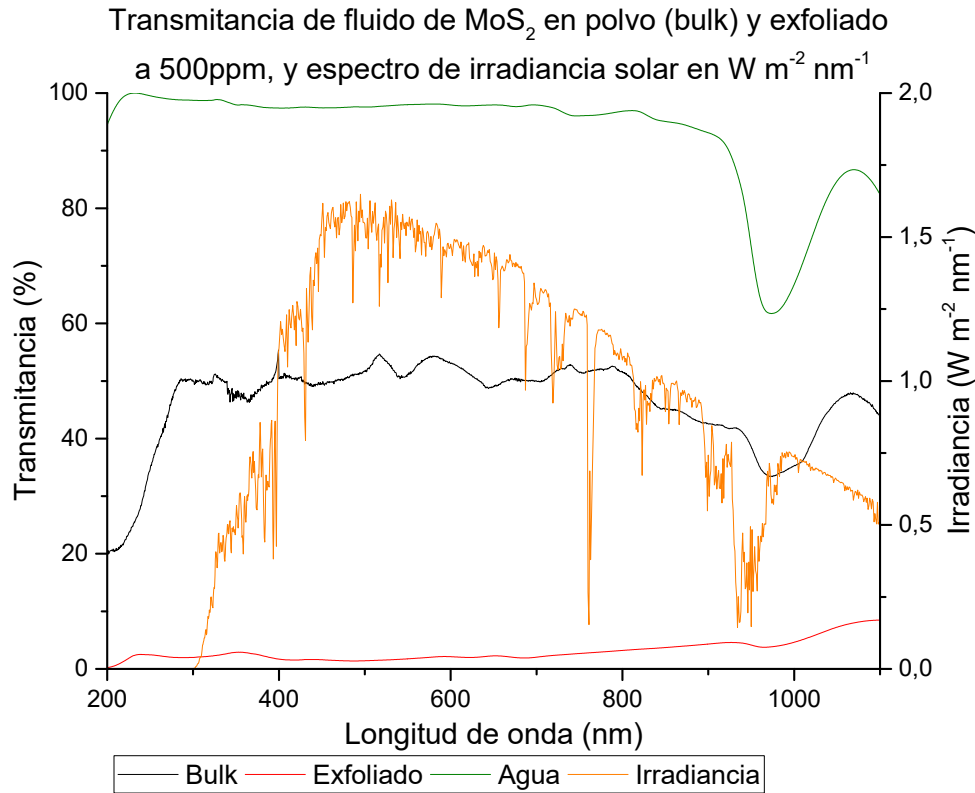


Figura 4.9: Transmitancia de los fluido de MoS_2 a 500ppm de partículas sin exfoliar (bulk) y exfoliadas, y la irradiancia solar a nivel de la tierra en el ángulo cenital solar de 48.2° en $Wm^{-2}nm^{-1}$.

GO

La transmitancia de los nanofluidos de GO a las distintas concentraciones estudiadas se presentan en la Figura 4.10. Es claro que a mayor concentración de partículas la transmitancia se reduce, lo que implica en una mayor absorción de radiación en el espectro de 200 a 1100nm. Esto puede ser explicado por la ley de Lambert-Beer que se presentó su expresión matemática en 1.19, la cual relaciona la absorbancia con la concentración de partículas, longitud atravesada por la luz y la intensidad de luz incidente. Como las mediciones se hicieron a la misma intensidad de luz y misma longitud atravesada por la luz, la única variable fue la concentración desde 50 hasta 500ppm. No obstante, se ha reportado que el comportamiento no siempre es lineal, pues en algunos puntos pueden presentarse como no lineales [134], lo que podría explicar la razón de que el GO presente prácticamente la misma transmitancia en el peak de los 370nm para las 200 y 500ppm, aunque también puede ser atribuido a errores de medición del equipo o dispersión no homogénea de las nanopartículas en el fluido, aunque esta última no toma mucha fuerza a causa de la buena estabilidad del nanofluido.

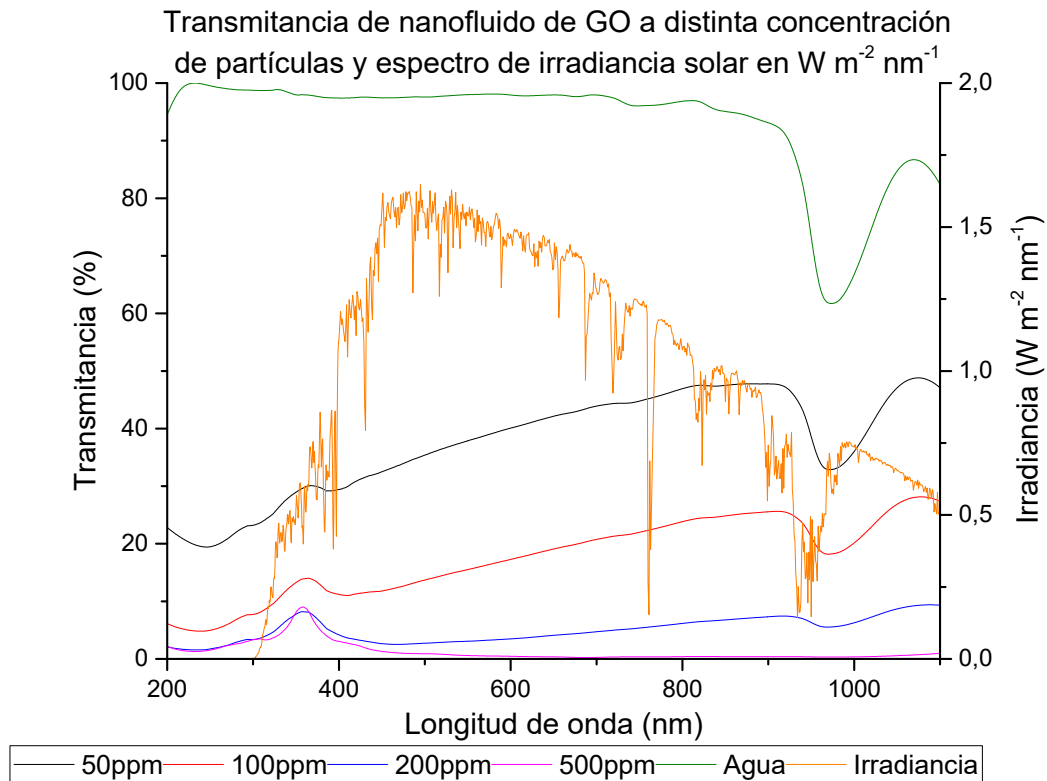


Figura 4.10: Transmitancia de los nanofluidos de GO a las concentraciones de 50, 100, 200 y 500ppm, y la irradiancia solar a nivel de la tierra en el ángulo cenital solar de 48.2° en $Wm^{-2}nm^{-1}$.

Al comparar la transmitancia de las dos especies de nanofluidos a la misma concentración (Véase Anexo B para la comparación de transmitancias de los nanofluidos a las mismas concentraciones), el de MoS_2 presenta mejor rendimiento al tener menor transmitancia que el GO a 50 y 100ppm en el rango de longitud de onda que más radiación entrega el sol (visible-infrarrojo). Al momento de comparar las concentraciones entre 200 y 500ppm entre ambas especies, no se puede apreciar una diferencia significativa en la transmitancia, lo que podría indicar que tienen rendimientos similares a esas concentraciones para la absorción de radiación.

4.3.2. Estudio térmico en Simulador solar

MoS_2

En la Figura 4.11 se presenta la evolución del aumento de temperatura del nanofluido de MoS_2 a distintas concentraciones, donde se puede observar que para cualquier adición de partículas hay un aumento considerable comparado al agua, ya que después de 60 min, alcanzan $35^\circ C$ cuando la concentración es de 50ppm y $38^\circ C$ para el resto de concentraciones 100, 200 y 500ppm, mientras que el agua consigue llegar a un aumento de $30^\circ C$. El aumento de temperatura del agua ocurre principalmente por la absorción de radiación en el infrarrojo que se observa en el rango de 900 y 1000nm de la transmitancia de las Figuras anteriores.

El aumento de temperatura del nanofluido de MoS_2 con respecto al agua se puede explicar con la reducción en la transmitancia que se muestra en la Figura 4.8. También se observa que a 50ppm

la temperatura alcanzada es menor que para el resto de concentraciones, lo que se debe a la menor transmitancia a esta concentración en comparación al resto. Al adicionar nanopartículas, se nota que a partir de las 100ppm el aumento de temperatura máxima alcanzada no varía con el aumento de concentración, lo que se explica por la insignificante variación en la transmitancia de estos con la agregación de partículas.

Siguiendo con el MoS_2 , se realizó una comparación de este con el proceso de exfoliación y con la mezcla de agua con el polvo recién sacado del frasco, es decir, sin sonicar ni mezclar con quitosano. Estos resultados se muestran en la Figura 4.12 dónde es posible notar que las partículas sonicadas alcanzan un aumento de $38^\circ C$, lo que corresponde a $8^\circ C$ y $3^\circ C$ más que el agua y el bulk, respectivamente. Estos resultados pueden explicarse por el mismo fenómeno que para la concentración correspondiente a la diferencia en la transmitancia de cada fluido.

Desde otra perspectiva, la diferencia en dicho resultado puede también explicarse por el tamaño de la partícula, pues se supone que una de las razones de porque el exfoliado llegase a ser más estable es por este mismo fenómeno, ya que el exfoliado debería presentar menor número de capas, lo que se traduce en un menor tamaño de partícula [133]. El tamaño afecta a la conductividad térmica del fluido porque la razón área/volumen es mayor para las partículas más pequeñas, aumentando el área de transferencia de calor por unidad de volumen[91][92].

Cabe destacar que este estudio puede ser engañoso ya que para lograr comparar de manera más exacta el aumento de temperatura, todos deben iniciar a la misma temperatura y en dicho caso, bastaría con estudiar la evolución de temperatura en el tiempo, aunque si sirvió para comparar visualmente la cinética del aumento de temperatura.

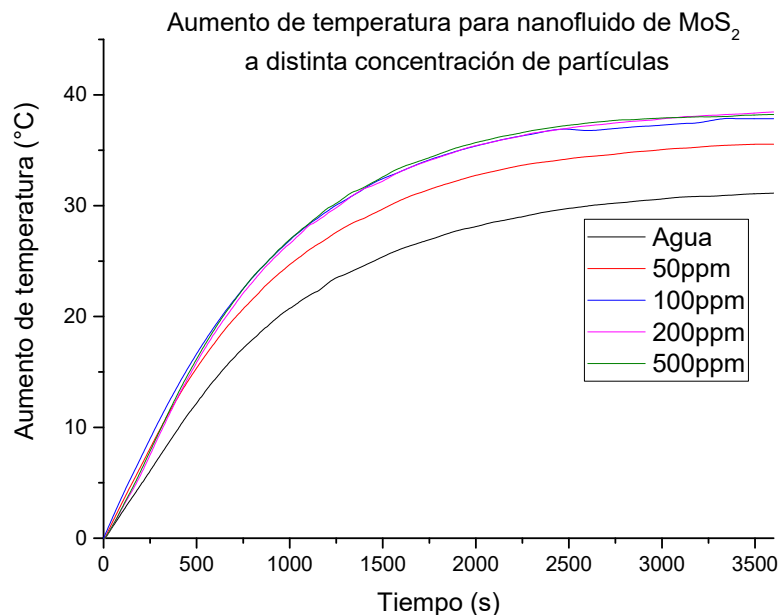


Figura 4.11: Aumento de temperatura para el nanofluido de MoS_2 a distintas concentraciones cuando reciben luz del simulador solar a 1 sol con una diferencia de 11.6cm de la fuente de poder.

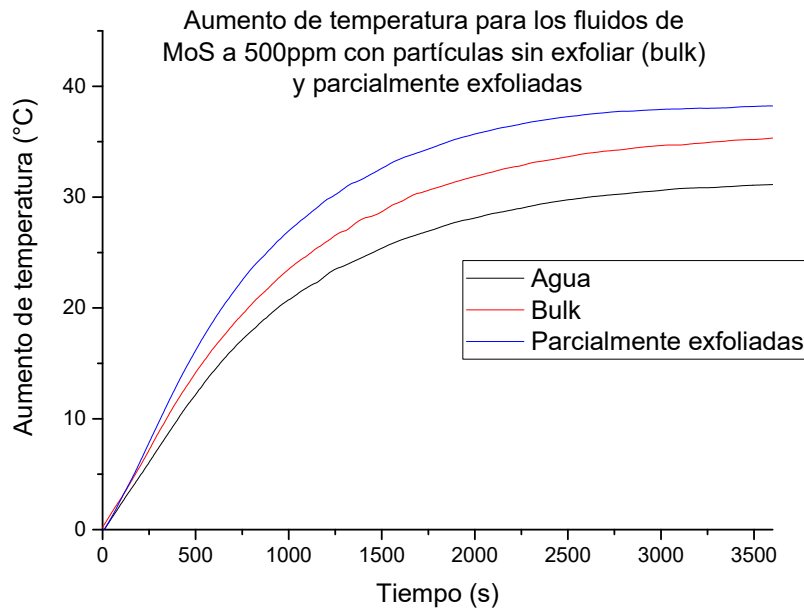


Figura 4.12: Aumento de temperatura para el fluido (bulk) y nanofluido de MoS_2 a la concentración de 500ppm que reciben luz del simulador solar a 1 sol con una diferencia de 11.6cm de la fuente de poder.

Como se mencionó anteriormente, debido al problema de la temperatura inicial, es que se estudia la eficiencia fototérmica del nanofluido a las distintas concentraciones de MoS_2 como se presenta en la Figura 4.13. Estos resultados sirven para ver la tasa de calor absorbido por radiación y el perdido por convección con la temperatura instantánea, es por esa razón que se observa un comportamiento asintótico descendente a mayor temperatura, pues la transferencia de calor depende de la diferencia de temperaturas, y a mayor valor de esta, más calor se transfiere por unidad de tiempo [135][136].

Analizando los resultados de la eficiencia fototérmica, se observa que son consistentes con la evolución de temperatura, ya que a cualquier concentración de partículas la eficiencia fototérmica mejora en comparación al agua que pasa desde 32% a los 30°C hasta un 14% a los 50°C, por lo tanto, el nanofluido absorbe y convierte más energía radiativa en calor que el agua pura. Por otro lado, es claro que la eficiencia fototérmica a 50ppm es menor en todo el rango de temperaturas que a concentraciones más altas alcanzando una eficiencia de 17.5% a los 55°C, mientras que para 100 hasta 500ppm no se presenta una diferencia significativa alcanzando valores de 26% a la misma temperatura de 55°C. Todos estos resultados, al ser consistentes con los de la evolución de temperatura y considerar las mismas variables, se puede explicar por las mismas razones de transmitancia y en consecuencia de todo esto, se puede decir que el nanofluido de MoS_2 a 100ppm es la mejor concentración entre las estudiadas, pues ha exhibido valores similares a las 200 y 500ppm en los estudios previos presentando 2 y 5 veces menos concentración de partículas, respectivamente.

Además, se compara la eficiencia fototérmica del fluido de MoS_2 exfoliado y sin exfoliar en la Figura 4.14 y se reafirman estos resultados con los mostrados anteriormente en la transmitancia y evolución de temperatura, en la cual el exfoliado presenta mayor eficiencia en todo el rango de temperatura alcanzada que el no exfoliado mostrando 2 puntos porcentuales más el exfoliado que

el bulk a los 30°C y 10 puntos porcentuales más cuando la temperatura es de 55°. Por lo tanto, el MoS_2 exfoliado es mejor candidato para su uso en DASC comparado al sin exfoliar.

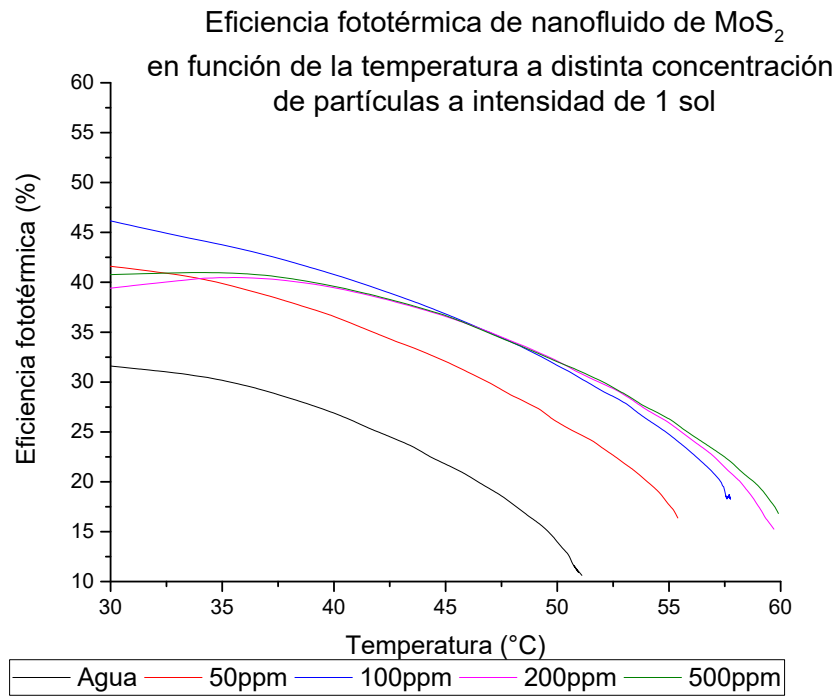


Figura 4.13: Eficiencia fototérmica de nanofluido de MoS_2 a distinta concentración de partícula a la intensidad de 1 sol.

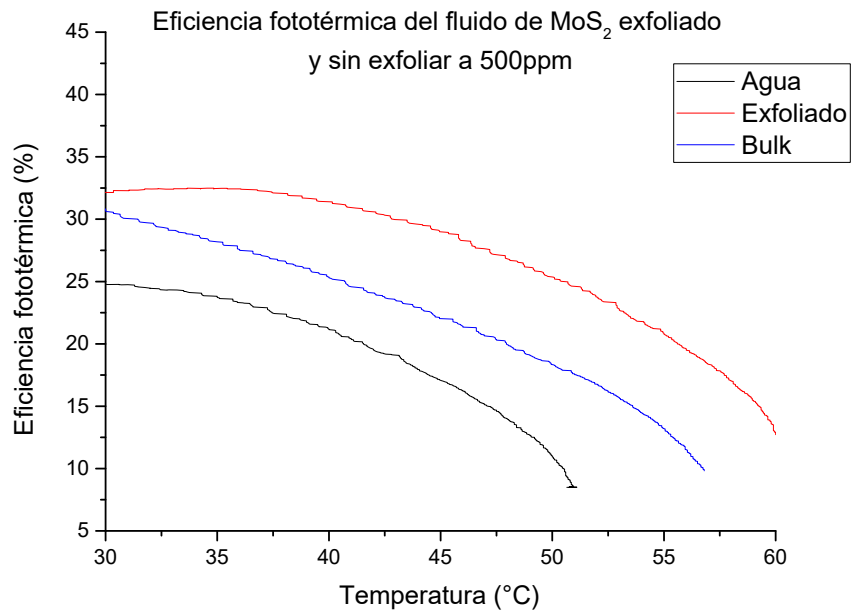


Figura 4.14: Eficiencia fototérmica de fluido de MoS_2 a 500ppm de bulk y exfoliado a la intensidad de 1 sol.

GO

De forma similar a la del MoS_2 , en la Figura 4.15 se presenta el aumento de temperatura en el tiempo para el nanofluido de GO, aunque a diferencia del MoS_2 , si se observa distinto aumento de temperatura alcanzada con el aumento de partículas. En los 60 minutos de estudio, alcanzan un aumento de 30, 32, 36 y 41°C para las 50, 100, 200 y 500ppm, respectivamente.

El aumento de temperatura máxima que alcanzan los nanofluidos para 100, 200 y 500ppm puede ser explicado por la menor transmitancia que presentan a mayor concentración, por lo que absorben más radiación traduciéndose en una mayor temperatura alcanzada.

Para el caso de las 50ppm si bien se nota una diferencia en la cinética del aumento de temperatura alcanzando los 30°C en aproximadamente los 2600segundos (1000s antes que el agua), no es significativo este cambio. Sin embargo, y como ya se mencionó en los resultados del MoS_2 , el aumento de temperatura puede ser engañoso por la temperatura inicial de cada fluido, lo que sería una razón de porque el nanofluido de GO a 50ppm alcanza el mismo aumento de temperatura que el agua, y por dicha razón se presenta la eficiencia fototérmica del nanofluido de GO en la Figura 4.16 donde si se puede observar una mejora significativa en esta eficiencia del GO a 50ppm en comparación al agua al mostrar 3 puntos porcentuales más de eficiencia que el agua a los 30°C y 6 más a los 50°C, lo que indica que efectivamente alcanza mayores temperaturas y más rápido, y como se ha mencionado previamente, la principal razón puede ser la transmitancia que presentan los nanofluidos que son mucho menores que para el agua.

Continuando con la Figura 4.15 y 4.16, el comportamiento de aumento de temperatura alcanzada y eficiencia fototérmica con el incremento de la concentración de GO se explica por la transmitancia de estos fluidos. Además, de estos resultados se puede sugerir que las 500ppm de GO es la mejor concentración al alcanzar 3°C más que a 200ppm pasado los 3600s y 6 puntos porcentuales más de eficiencia fototérmica a los 60°C.

La reducción de la eficiencia con la temperatura se debe a la misma razón que para el nanofluido de MoS_2 y es por el equilibrio térmico que ocurre entre la energía absorbida por radiación y la energía perdida por convección [135][136].

Para comparar el mejor caso de cada material, es que se presenta en la Figura 4.17 el aumento de temperatura para el MoS_2 a 100ppm y GO a 500ppm, donde alcanzan 38 y 41°C al cabo de 3600s, respectivamente. Además, al hacerlo con las eficiencias fototérmicas de ambos materiales a dichas concentraciones, se observa mayor eficiencia en el GO a 500ppm, siendo mejor en 1.5 puntos porcentuales más a los 30°C y llegando casi a 10 puntos más a los 55°C comparado al MoS_2 a 100ppm. Los resultados anteriores pueden explicarse por la transmitancia que presentan ambos (ver Figura B.5 en Anexo B), ya que se puede ver que el GO tiene un 5% menor transmitancia desde aproximadamente los 450nm hasta los 1100nm, que es en el espectro que más energía entrega desde el sol como se muestra en la irradiancia.

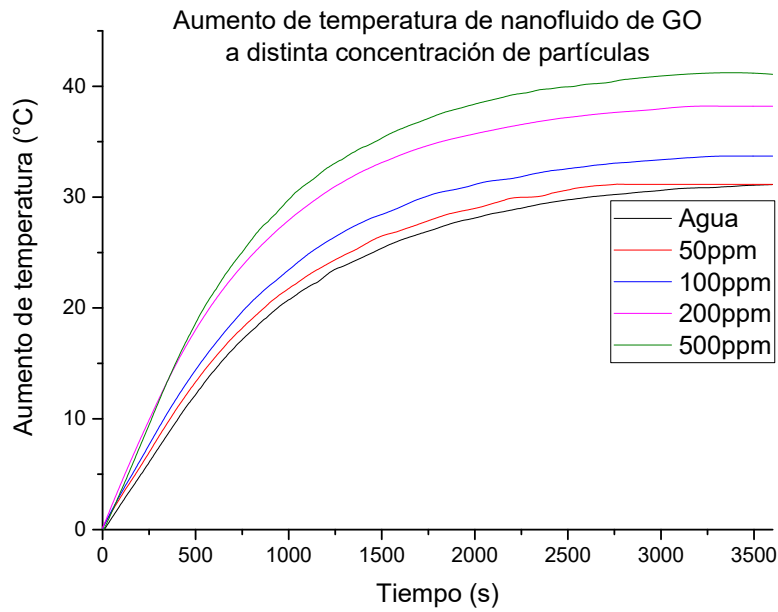


Figura 4.15: Aumento de temperatura para el nanofluido de *GO* a distintas concentraciones cuando reciben luz del simulador solar a 1 sol con una diferencia de 11.6cm de la fuente de poder.

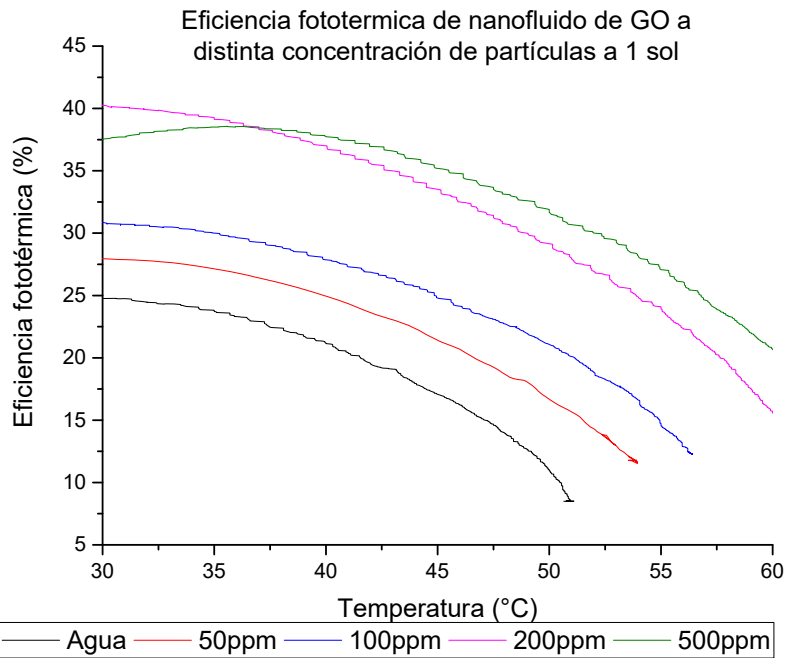


Figura 4.16: Eficiencia fototérmica de nanofluido de *GO* a distinta concentración de partícula a la intensidad de 1 sol.

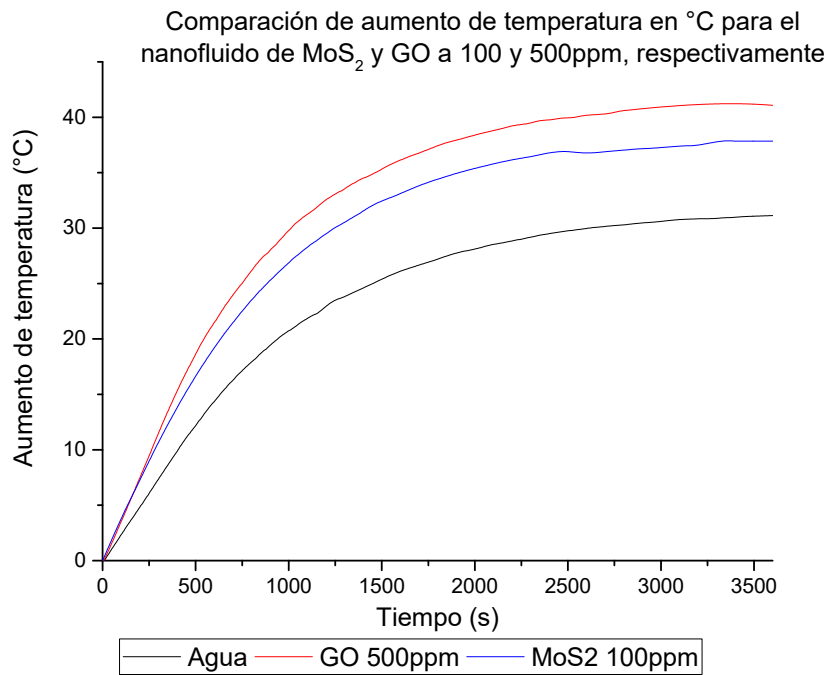


Figura 4.17: Aumento de temperatura para el nanofluido de MoS_2 a 100ppm y de GO a 500ppm cuando reciben luz del simulador solar a 1 sol con una diferencia de 11.6cm de la fuente de poder.

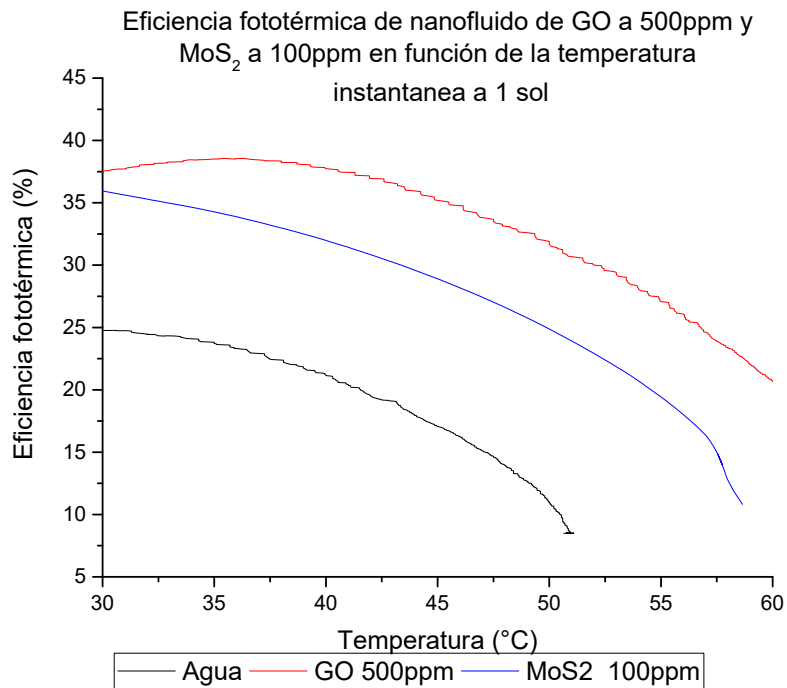


Figura 4.18: Eficiencia fototérmica de nanofluido de MoS_2 a 100ppm y GO a 500ppm a la intensidad de 1 sol.

4.3.3. Evaporación en condiciones de laboratorio a intensidad de 1 sol en simulador solar

Para la evaporación, se midió la eficiencia de evaporación de los nanofluidos de MoS_2 y GO a las concentraciones de 50, 100, 200 y 500ppm, resultados que se presentan en la Figura 4.19. En esta, se aprecia que la adición de partículas (a excepción de las 50ppm de MoS_2) son significativamente diferentes al 28.6 % de eficiencia del agua en algún nivel de significancia (de 0.05 hasta 0.0001), lo que significa que efectivamente las partículas si tienen un efecto en la eficiencia de evaporación.

Para el nanofluido de MoS_2 se puede ver el aumento en la eficiencia de evaporación con el aumento de concentración desde un 34.4 % para las 50ppm alcanzando su máximo de 40.8 % entre 200 y 500ppm sin variación apreciable; mientras que para el GO van desde 38.6 a un 49.5 % de 50 a 500ppm, respectivamente. Por lo tanto, la adición de partículas también favorece la eficiencia evaporativa en comparación al agua.

La principal razón que puede explicar estos resultados se debe al mayor aumento de temperatura que alcanzan los fluidos y fueron demostrados anteriormente. Esto se produce porque el aumento de temperatura del fluido causa un incremento en la presión de vapor del fluido, lo que se ocasiona por el aumento en la energía cinética de las moléculas, la que acrecenta la cantidad de moléculas del líquido que se transforman en vapor [137][138]. Para dejar más claro con un ejemplo práctico, la presión de vapor puede llegar a ser un indicador de la tasa de evaporación de un líquido, pues a menor presión de vapor menor es la tasa de evaporación ya que el líquido es más volátil[137].

Otra de las razones que puede explicar la mayor eficiencia es que la adición de partículas y aumento de temperatura disminuye la entalpía de vaporización [139], por lo que se requiere menos energía para evaporar un gramo del fluido base, que en este caso es agua.

La tasa de evaporación en los nanofluidos también puede deberse a que la radiación se absorbe cerca de la superficie, por lo que el aumento de temperatura ocurre primero ahí. Esto ya fue explicado en el comportamiento de la transmitancia, puesto que la absorbancia depende directamente de la profundidad de la muestra, así que a menor valor de esta, menos radiación penetra al seno y fondo del fluido ya que toda se absorbe cerca de la superficie [99][100]

Ahora, para comparar el efecto de la concentración de nanopartículas en el MoS_2 se realizó un análisis estadístico para la concentración entre ellas donde se observa en la Figura 4.20 que las únicas concentraciones significativamente diferentes con nivel de significancia de 0.05 son las de 50 y 200ppm con una diferencia de 5 % más para las 200ppm, lo que puede indicar que la adición de las 200ppm tiene mayor eficiencia que las 50ppm. La razón que podría explicar esta diferencia es la transmitancia que presenta el nanofluido a las distintas concentraciones.

Comparando la eficiencia de evaporación para las concentraciones de GO , no se pudo observar diferencias estadísticamente significantes entre ellas. Por lo tanto, no se puede asegurar que el aumento en la concentración de partículas incremente la eficiencia evaporativa aunque si se puede observar una tendencia al alza.

Por otro lado, con el fin de comparar el efecto de la especie de nanopartícula, es que también se realizó un estudio estadístico para las mismas concentraciones de cada tipo de nanopartícula,

aunque no se logra apreciar que sean significativamente diferente entre ellos con un nivel de significancia menor o igual al 0.05. Debido a esto, es que se podría mencionar que el MoS_2 no se desempeña significativamente diferente al GO a las mismas concentraciones, por lo tanto el disulfuro de molibdeno podría ser un sustituto al GO en evaporación de agua a 1 sol.

Finalizando con la comparación de los nanofluidos de MoS_2 y GO , se realizó un análisis estadístico de MoS_2 a 100ppm y del GO a 500ppm, que han sido los que han mostrado los mejores resultados en las pruebas de temperatura con respecto al agua, donde se obtuvo que no son significativamente diferentes entre ellos aunque si se puede apreciar mejor rendimiento en promedio del GO . Por lo tanto, el MoS_2 a la concentración estudiada puede posicionarse como sustituto del GO para evaporación del agua debido a su bajo costo de adquisición y producción en comparación al GO [101] [102].

A pesar de lo mencionado anteriormente, se puede observar una tendencia de aumento de evaporación del GO en comparación al MoS_2 en todas sus concentraciones la que podría deberse a la conductividad térmica de los materiales, donde se ha demostrado que para gotas de nanofluidos, a mayor conductividad térmica hay mejor evaporación ocasionado por la reducción de resistencia en la transferencia de calor del mismo fluido [140], el GO ha presentado conductividad térmica desde $72Wm^{-1}K^{-1}$ hasta $670Wm^{-1}K^{-1}$ dependiendo del grado de oxidación del 35 % al 5 %, respectivamente [141], mientras que los TMD han presentado mucho menores en el rango de $\sim 52Wm^{-1}K^{-1}$ [142]. En contraposición a esto, se ha demostrado numéricamente el efecto de la conductividad a bajas presiones (menores a 0.01 atm) para distintas geometrías, donde se tiene una tendencia a la reducción en el flujo de evaporación con el aumento de presión, mostrando que para la máxima presión estudiada de 800Pa y geometría cilíndrica, la conductividad térmica prácticamente no influye en la evaporación [143].

Ahora, enfocándose en la eficiencia evaporativa del tipo de partícula de disulfuro de molibdeno, se presenta en la Figura 4.21 la eficiencia para el exfoliado y el bulk a 500ppm, obteniéndose valores de 40.3 y 36.7 %, respectivamente, lo que es un aumento en la eficiencia de casi 11 y 8 puntos porcentuales de eficiencia evaporativa con respecto al agua con un nivel de significancia de 0.0001 para el exfoliado y 0.001 para el Bulk. Además, se compara directamente el bulk con el exfoliado dónde se obtiene 4 puntos porcentuales más de eficiencia más de eficiencia en el exfoliado con un nivel de significancia de 0.05.

La menor eficiencia del bulk respecto al exfoliado puede deberse a varias situaciones. Primero, el aumento de temperatura de los fluidos, pues el bulk alcanza menos y más lento la temperatura máxima que el exfoliado. Por otro lado, la estabilidad en los fluidos también puede afectar, ya que en el bulk las partículas se separan rápidamente, lo que provoca el decantamiento de la gran mayoría de estas y el resto se encuentra en la superficie a causa de la hidrofobicidad. Esto ocasiona que la radiación absorbida sea mucho menor en la superficie y seno del fluido y la mayoría en la parte inferior de este, provocando 2 situaciones: una pequeña parte de la radiación es absorbida en la parte superior del fluido, calentando esta misma; mientras que la segunda situación es que la radiación es absorbida en el fondo del líquido y para poder calentar la superficie debe transferir primero la energía al resto del fluido. La importancia de este caso es que la evaporación ocurre en la interfase líquido-gas y depende de la presión de saturación del líquido que se ve afectada por la temperatura del líquido en dicha interfase [99].

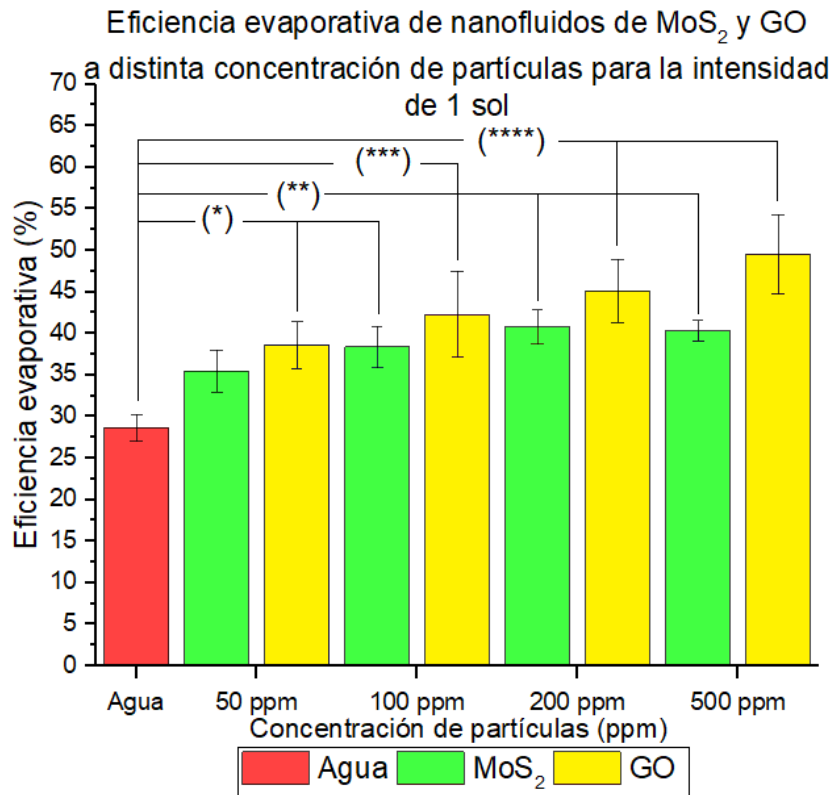


Figura 4.19: Mejora de eficiencia de evaporación en comparación al agua para los nanofluidos de MoS₂ (amarillo) y GO (rojo) a distinta concentración de partículas e intensidad del simulador solar de 1 sol. Nivel de significancia (*)=0.05; (**) =0.01; (***)=0.001; y (****)=0.0001

Cabe tener en cuenta que a medida que se evapora el agua, la concentración de nanopartículas en el fluido va aumentando, lo que se traduce en menor masa del fluido a calentar y disminución en la transmitancia, provocando que el fluido se caliente más y más rápido, aunque dependerá de la concentración actual del fluido pues se ha demostrado que no cualquier aumento de concentración provoca un cambio significativo en la radiación absorbida[144].

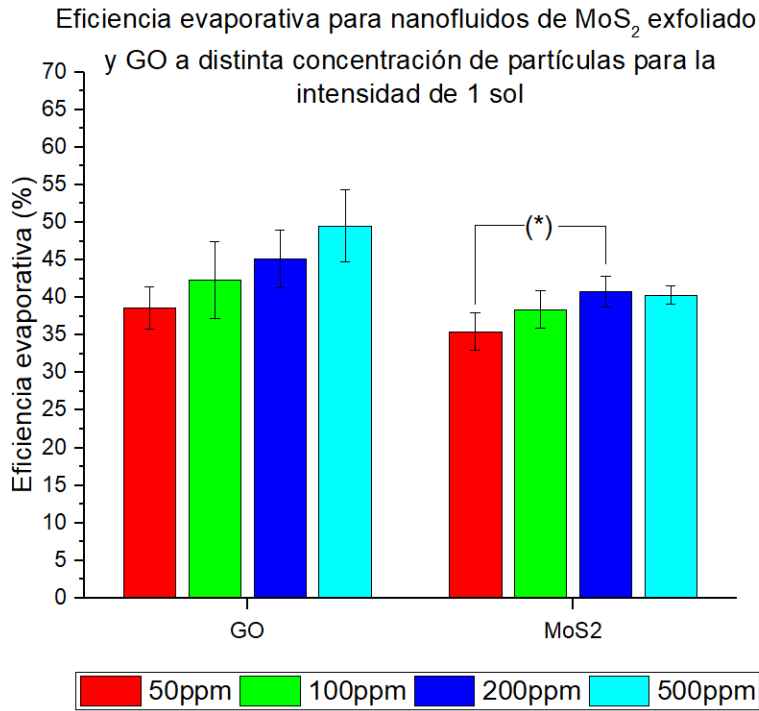


Figura 4.20: Mejora de eficiencia de evaporación en comparación a la concentración de partículas de 50ppm (rojo), 100ppm (verde), 200ppm (azul) y 500ppm (celeste) para los nanofluidos de MoS_2 y GO a la intensidad del simulador solar de 1 sol. Nivel de significancia (*)=0.05; (**)=0.01; (***)=0.001; y (****)=0.0001

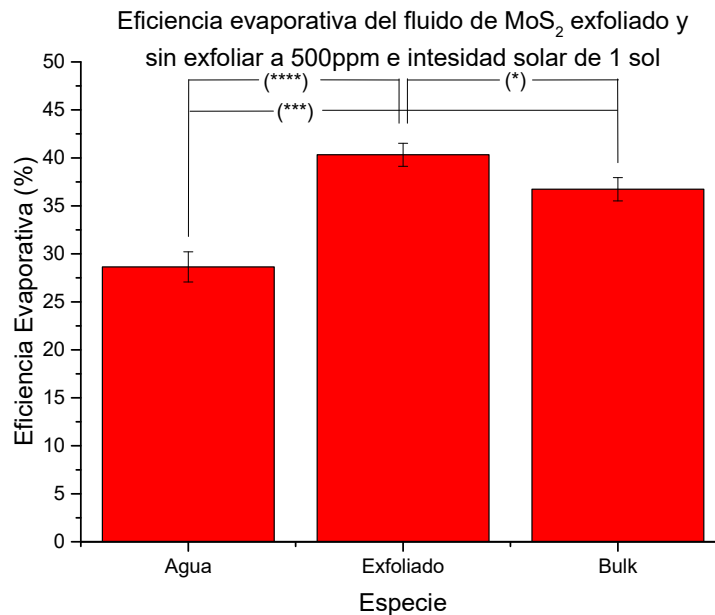


Figura 4.21: Mejora de eficiencia de evaporación en comparación al agua para el fluido de MoS_2 sin exfoliar (bulk) y exfoliado a una concentración de 500ppm e intensidad del simulador solar de 1 sol. Nivel de significancia (*)=0.05; (**)=0.01; (***)=0.001; y (****)=0.0001.

4.3.4. Estudio térmico en condiciones reales a 60 soles en Concentrador solar

En estos resultados trabajo se estudia la temperatura en el tiempo y no el aumento de ésta, pues en este caso queremos comparar el tiempo que toma cada fluido en alcanzar la temperatura de ebullición.

En la Figura 4.22 y 4.23 se presenta la temperatura de los nanofluidos de MoS_2 y GO en el tiempo a 60 soles, respectivamente. La primera observación importante es que alcanzan las temperaturas de ebullición entre 1 y 3 minutos para el GO (dependiendo la concentración) y alrededor de 5 minutos para el MoS_2 , lo que es una temperatura considerablemente mayor que la alcanzada en el simulador solar que se logró 38 y 41°C pasada 1 hora de radiación para el MoS_2 a 100ppm y GO a 500ppm, respectivamente. Esto se debe a la intensidad de radiación que reciben los fluidos, pues mientras en el simulador reciben la potencia de 1 sol ($1000W m^{-2}$), en el concentrador es cercano a 60 soles que corresponde al factor de concentración del disco parabólico, por lo tanto reciben más energía que pueden absorber.

Cambiando el enfoque al comportamiento de las concentraciones del MoS_2 , en la Figura 4.22 se observa el esperado de acuerdo al resto de resultados, donde a mayor concentración alcanzan mayor temperatura y más rápidamente. La temperatura máxima alcanzada por los nanofluidos corresponde a los 100°C ya que es la temperatura de ebullición del agua a 1 atm de presión y lo hacen alrededor de los 250s, mientras que el agua solamente llega a 92°C al cabo de 360s, por lo tanto, el MoS_2 si presenta mejoras considerables respecto al agua pura cuando la intensidad es de 60 soles.

No obstante, se puede ver que la temperatura del agua inicia casi 2°C por debajo que el resto de nanofluidos, lo que puede ser una razón de porque no alcanza la ebullición en el tiempo estudiado. Sin embargo, se puede observar que a los 200s adquiere un comportamiento asintótico cercano a los 85°C y al cabo de los 360s alcanza 92°C, por lo tanto con esos 2°C iniciales menos, no alcanzaría a llegar a la temperatura de ebullición, al menos en los 360 segundos que dura cada medición.

Es posible ver una pendiente pronunciada y casi lineal para todos los nanofluidos hasta los 150s, presentando un coeficiente $R^2 > 0.99$ en todos los casos, la cual se debe a la intensa radiación que recibe antes que las pérdidas de calor sean significativas. Cuando esas pérdidas de calor comienzan a ser significativas, ocurre el comportamiento asintótico que se ve a los 150s, el que podría deberse al efecto de la transmitancia y conductividad térmica del fluido. La baja transmitancia impide que la radiación penetre al seno del fluido provocando que se absorba solamente en la superficie incidente, por lo tanto, este calor absorbido debe transferirse por conducción (que depende de la conductividad térmica) al resto del fluido. Si la transferencia de calor al fluido es más lenta en comparación a la tasa calentamiento por la radiación absorbida, el aumento de temperatura no será homogéneo provocando que la superficie del líquido que absorbe la radiación se caliente más y comience a evaporarse, causando pérdidas de calor por la evaporación del fluido. Como la conductividad térmica es la que juega el papel de que tan rápido se transfiere el calor en el fluido, y en caso de ser baja, el calentamiento del fluido no sera homogéneo y ocurriría lo mencionado. Para el caso del agua es distinto, ya que si bien la conductividad térmica es menor a la de los nanofluidos[145], la transmitancia es casi nula en el espectro UV-vis y la poca radiación que absorbe lo hace en todo el volumen.

Ahora, comparando el efecto de la concentración de los nanofluidos, se puede observar la tenden-

cia de los resultados en el simulador solar, pues a mayor concentración de partículas, la temperatura aumenta más rápido. Si bien se observa que el nanofluido a 50ppm supera la temperatura de las 100ppm y 200ppm a los 110s y 170s, respectivamente, la diferencia en el tiempo que alcanzan la temperatura máxima no es significativa y puede haberse ocasionado por las condiciones ambientales y de operación.

La evolución de la temperatura para el nanofluido de *GO* se muestran en la Figura 4.23. Se puede observar el comportamiento esperado respecto a los resultados previos en el simulador, ya que al aumentar la concentración de partículas, la temperatura aumenta más rápido hasta la ebullición del agua, alcanzando los 100°C en 150, 148, 130 y 85s para las 50, 100, 200 y 500ppm respectivamente. Este comportamiento puede ser explicado por las mismas razones ya mencionadas en los resultados anteriores.

A diferencia de los nanofluidos de *MoS₂*, para el *GO* se puede ver un aumento constante hasta los 100°C (con $R^2 > 0.99$). Esto puede reafirmar el efecto de la conductividad térmica de los nanofluidos, ya que el *GO* presenta valores de hasta 10 veces (dependiendo el grado de oxidación) más que los TMD en la conductividad, ocasionando un aumento homogéneo en la temperatura del fluido y evitando que se evapore fluido en algunas áreas antes que en otras.

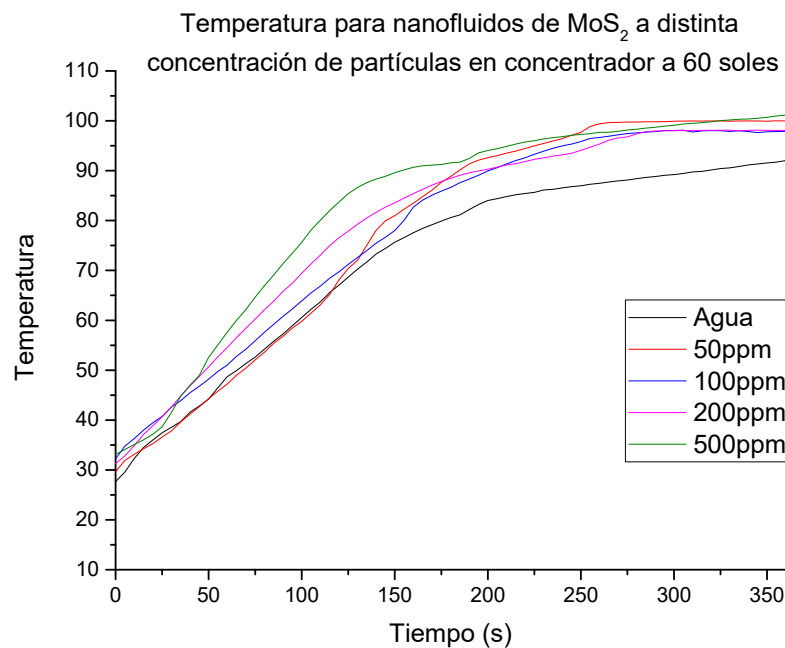


Figura 4.22: Temperatura del nanofluido de *MoS₂* a las concentraciones de 50, 100, 200 y 500ppm a una intensidad de 60 soles.

Por último, en la Figura 4.24 se compara el mejor caso que se obtuvo en el simulador para los nanofluidos, que para el *MoS₂* son las 100ppm y el *GO* las 500ppm. El de *MoS₂* llega a la ebullición a los 280s mientras que el de *GO* lo hace en 85s, lo que equivale a casi 200s antes. Debido a que el *MoS₂* a 100ppm se demora más de 3 veces en llegar a la temperatura de ebullición, es que se puede asegurar que a 60 soles, el *GO* a 500ppm es mejor. Las razones ya han sido mencionadas antes, tales como la transmitancia cercana a 0 en el espectro del *GO* a las 500ppm o la posible

mejora en la conductividad térmica de los nanofluidos que debiese calentar el fluido de manera más uniforme para el GO mientras que el de MoS_2 podría evaporarse en la superficie que recibe la radiación antes de transferirlo al resto del fluido.

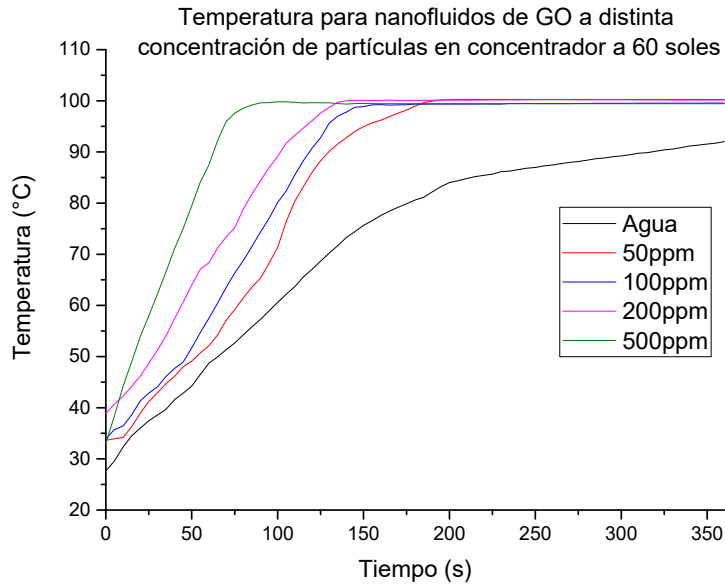


Figura 4.23: Temperatura del nanofluido de GO a las concentraciones de 50, 100, 200 y 500ppm a una intensidad de 60 soles.

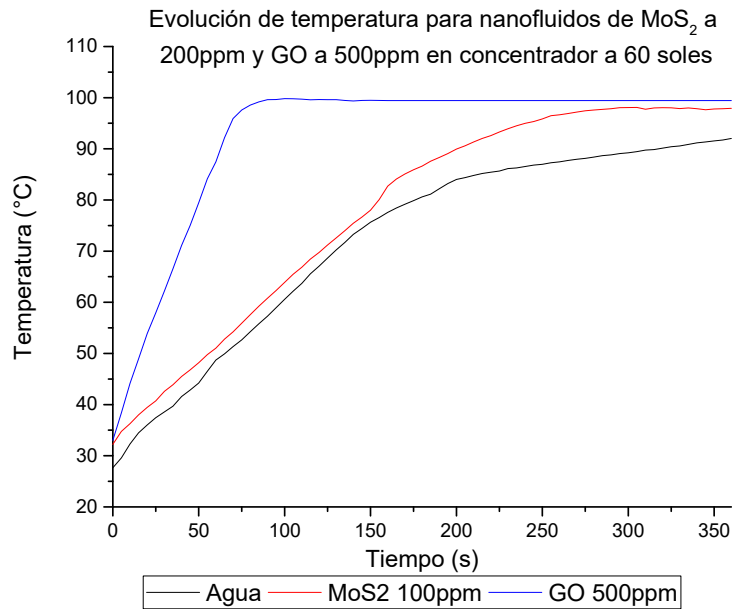


Figura 4.24: Temperatura del nanofluido de MoS_2 y GO a 100ppm y 500ppm a la intensidad de 60 soles, respectivamente.

Capítulo 5

Conclusiones

La difracción de rayos-X y la espectroscopía Raman mostraron que las partículas secas no se encuentran exfoliadas al ser preparadas con la metodología propuesta, sin embargo, la espectroscopía UV-visible exhibió que si lo están en solución, al menos, parcialmente. Por otro lado, se concluye que el incremento de partículas de MoS_2 y GO en el fluido reduce la transmitancia de estos comparados al agua.

El proceso de síntesis de nanopartículas y preparación del nanofluido de MoS_2 tienen un efecto importante de mejoramiento en el desempeño de las pruebas tanto de estabilidad como en las térmicas donde el exfoliado alcanzó 21 % de eficiencia fototérmica a los 55°C vs el bulk que mostró solo un 13 % a la misma temperatura; y el 32 % de eficiencia de evaporación vs el 29 % del bulk, donde esta mejora se debe a que las partículas se encuentran parcialmente exfoliadas.

El nanofluido de MoS_2 es comparable al de GO o incluso mejor para calentar el fluido a la intensidad de 1 sol y baja concentración de partículas alcanzando 35 y 38°C para las 50 y 100ppm siendo mayores a los 30 y 35°C que alcanza el GO a las mismas concentraciones de 50 y 100ppm respectivamente, aunque esto se invierte levemente cuando se compara con los 41°C que alcanza el GO a 500ppm y el MoS_2 a 500ppm sigue en 38°C, situando al MoS_2 como apto para los DASC a bajas temperaturas. No obstante, cuando la irradiancia es de 60 soles, el GO a 500ppm se puede demorar al menos 85s en alcanzar la ebullición y el MoS_2 en 250s a la misma concentración, posicionando como mejor candidato para DASC a altas temperaturas al GO .

La eficiencia evaporativa para el MoS_2 es mejor que el agua destilada presentando desde 34.4 % a 40.7 % para las 50 y 200ppm mientras que el agua logra un 28.6 %. Sin embargo, el GO presentó mejor eficiencia alcanzando un valor de hasta 49.5 % a 500ppm. Al comparar entre los materiales a las mismas concentraciones no se obtuvo diferencias significativas, por lo tanto a la misma concentración el MoS_2 sería un buen sustituto para el GO .

Se puede mencionar que la transmitancia es la principal razón para los resultados obtenidos. Además, de que la concentración óptima de MoS_2 se encuentra entre las 50 y 100ppm para la absorción de radiación (aumento de temperatura y evaporación) por la despreciable diferencia entre las 100 y 500ppm en todos los resultados. Finalmente, es posible concluir que el MoS_2 puede desempeñarse como nanofluido para DASC por las mejoras presentadas en comparación al agua en todos los resultados.

Bibliografía

- [1] “What is climate change?,” *NASA Climate Kids* [En línea]. <<https://climatekids.nasa.gov/climate-change-meaning/>>. [consulta: 20 de diciembre de 2020].
- [2] H. Riebeek, “Global warming,” *NASA Earth Observatory* [En línea]. <<https://earthobservatory.nasa.gov/features/GlobalWarming>>. [consulta: 12 enero 2021].
- [3] IPCC, “Escenarios de emisiones,” *Informe especial Grupo de trabajo III del IPCC*, 2000.
- [4] IPCC, *Cambio climático 2014: Informe de Síntesis*. 2014.
- [5] U. Europea, “Paris agreement,” [En línea]. <https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris_en#:~:text=The%20Paris%20Agreement%20sets%20out,support%20them%20in%20their%20efforts>. [consulta: 20 diciembre 2020].
- [6] Gobierno de Chile, “Contribución Determinada a nivel Nacional (NDC) de Chile,” 2020.
- [7] J. Hanania and J. Donev, “Primary energy,” [En línea]. <https://energyeducation.ca/encyclopedia/Primary_energy>. [consulta: 12 enero 2021].
- [8] ENISCUOLA ENERGY & ENVIRONMENT, “Energy source,” [En línea]. <<http://www.eniscuola.net/en/argomento/energy-knowledge/energy-sources/primary-and-secondary-sources/>>. [consulta: 12 enero 2021].
- [9] H. Ritchie and M. Roser, “Energy,” [En línea]. <<https://ourworldindata.org/energy>>. [consulta: 10 diciembre 2020].
- [10] U.S. Energy Information Administration, 2020, “Electricity explained, use of electricity,” [En línea]. <<https://www.eia.gov/energyexplained/electricity/use-of-electricity.php>>. [consulta: 10 diciembre 2020].
- [11] Noah Long y Kevin Steinberge, 2016, “Renewable energy is key to fighting climate change.,” [En línea]. <<https://www.nrdc.org/experts/noah-long/renewable-energy-key-fighting-climate-change>>. [consulta: 10 diciembre 2020].
- [12] Kerry Thoubboron. 2015., “Advantages and disadvantages of renewable energy,” [En línea]. <<https://news.energysage.com/advantages-and-disadvantages-of-renewable-energy/>>. [consulta: 17 diciembre 2020].
- [13] S. Deolalkar, “Chapter 8 - solar power,” in *Designing Green Cement Plants* (S. Deolalkar, ed.), pp. 251–258, Butterworth-Heinemann, 2016.
- [14] CISION, PR Newswire. 2020., “Solar energy market size is projected to reach usd 223.3 billion by 2026 - valuates reports,” [En línea]. <[https://www.prnewswire.com/news-releases/solar-energy-market-size-is-projected-to-reach-usd-223-3-billion-by-2026--valuates-reports-301097168.html#:~:text=The%20global%20photovoltaic%20market%](https://www.prnewswire.com/news-releases/solar-energy-market-size-is-projected-to-reach-usd-223-3-billion-by-2026--valuates-reports-301097168.html#:~:text=The%20global%20photovoltaic%20market%20size)>.

- 20size,25.1%25%20from%202019%20to%202026>. [consulta: 17 diciembre 2020].
- [15] Solar Energy Industry Association, “Seia solar industry research data.,” [En línea]. <<https://www.seia.org/solar-industry-research-data>>. [consulta: 25 diciembre 2020].
- [16] “Solar energy advantages and disadvantages vs. other renewables.,” *Solar Magazine* [En línea]. <https://solarmagazine.com/solar-energy-advantages-and-disadvantages/#5_major_advantages_of_solar_energy>. [consulta: 10 enero 2021].
- [17] CleanMax. Powering sustainability, “How solar energy compares to other renewable sources of energy,” [En línea]. <<https://www.cleanmax.com/solar-update/how-solar-energy-compares-to-other-renewable-sources-of-energy.php>>. [consulta: 10 enero 2021].
- [18] Alex Fernández. 2006, “Efectos nocivos de los compuestos orgánicos volátiles,” [En línea]. <<https://www.consumer.es/medio-ambiente/efectos-nocivos-de-los-compuestos-organicos-volatiles.html#:~:text=Adem%C3%A1s%20de%20sus%20efectos%20cancer%C3%ADgenos,fatiga%2C%20p%C3%A9rdida%20de%20coordinaci%C3%B3n%2C%20reacciones>>. [consulta: 10 enero 2021].
- [19] I. Wole-osho, E. C. Okonkwo, S. Abbasoglu, and D. Kavaz, *Nanofluids in Solar Thermal Collectors: Review and Limitations*, vol. 41. Springer US, 2020.
- [20] Hannah E. Murdock Duncan Gibb Thomas André, *Renewables 2019 Global Status Report*, vol. 8. 2019.
- [21] Gil Knier. 2008., “How do photovoltaics work?,” [En línea]. <<https://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2002/solarcells>>. [consulta: 10 enero 2021].
- [22] M. H. Rahaman and T. Iqbal, “A Comparison of Solar Photovoltaic and Solar Thermal Collector for Residential Water Heating and Space Heating System,” *European Journal of Engineering Research and Science*, vol. 4, no. 12, pp. 41–47, 2019.
- [23] T. Zhang, M. Wang, and H. Yang, “A review of the energy performance and life-cycle assessment of building-integrated photovoltaic (BIPV) systems,” *Energies*, vol. 11, no. 11, 2018.
- [24] U.S. Energy Information Administration (EIA), “Solar thermal power plants.” <<https://www.eia.gov/energyexplained/solar/solar-thermal-power-plants.php#:~:text=Solar%20thermal%20power%2Felectric%20generation,focus%20sunlight%20onto%20a%20receiver>>. [Consulta: 25 diciembre 2020].
- [25] STEFAN FORTUIN and GERHARD STRYI-HIPP, *Solar Collectors, Non-concentrating*. 2012.
- [26] A. S. Jadhav and J. L. Van Niekerk, “Low concentrating solar collectors for economical generation of low-medium temperature industrial Process heat,” *ISES Solar World Congress 2015, Conference Proceedings*, no. October 2016, pp. 1202–1211, 2015.
- [27] N. Goel, R. A. Taylor, and T. Otanicar, “A review of nanofluid-based direct absorption solar collectors: Design considerations and experiments with hybrid PV/Thermal and direct steam generation collectors,” *Renewable Energy*, vol. 145, pp. 903–913, 2020.
- [28] “Flat plate collector for use in solar hot water systems.” <https://www.alternative-energy-tutorials.com/solar-hot-water/flat-plate-collector.html>. [Consulta: 22 Febrero 2022].
- [29] S. K.R.V, T. Rao, and A. Balakrishnan, *Nanofluids and Their Engineering Applications*. 06 2019.

- [30] T. B. Gorji and A. A. Ranjbar, “A review on optical properties and application of nanofluids in direct absorption solar collectors (DASCs),” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 72, no. November 2016, pp. 10–32, 2017.
- [31] N. H. Thomas, Z. Chen, S. Fan, and A. J. Minnich, “Semiconductor-based Multilayer Selective Solar Absorber for Unconcentrated Solar Thermal Energy Conversion,” *Scientific Reports*, vol. 7, no. 1, pp. 3–8, 2017.
- [32] S. B. y Jim Clark, “6.8b: Band theory of metals and insulators - chemistry libretexts.” [https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Inorganic_Chemistry/Map%3A_Inorganic_Chemistry_\(Housecroft\)/06%3A_Structures_and_energetics_of_metallic_and_ionic_solids/6.08%3A_Bonding_in_Metals_and_Semiconductors/6.8B%3A_Band_Theory_of_Metals_and_Insulators#:~:text=A.,-Conductors&text=Metals%20are%20conductors,in%20these%20closely%20spaced%20orbitals](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Inorganic_Chemistry/Map%3A_Inorganic_Chemistry_(Housecroft)/06%3A_Structures_and_energetics_of_metallic_and_ionic_solids/6.08%3A_Bonding_in_Metals_and_Semiconductors/6.8B%3A_Band_Theory_of_Metals_and_Insulators#:~:text=A.,-Conductors&text=Metals%20are%20conductors,in%20these%20closely%20spaced%20orbitals). [Consulta: 21 enero 2021].
- [33] J. Wu and X. Cheng, “Generalized thermal resistance and its application to thermal radiation based on entransy theory,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 58, no. 1-2, pp. 374–381, 2013.
- [34] Y. Çengel, *Lipase-catalyzed resolution of primary alcohol containing quaternary chiral carbon*, vol. 18. 1996.
- [35] M. U. Joardder, P. K. Halder, M. A. Rahim, and M. H. Masud, *Solar pyrolysis: Converting waste into asset using solar energy*. Elsevier Inc., 2017.
- [36] D. of Energy, “Heat transfer fluids for solar water heating systems.” <https://www.energy.gov/energysaver/solar-water-heaters/heat-transfer-fluids-solar-water-heating-systems>. [Consulta: 15 Mayo 2021].
- [37] D. Ghim, Q. Jiang, S. Cao, S. Singamaneni, and Y.-S. Jun, “Mechanically interlocked 1t/2h phases of mos2 nanosheets for solar thermal water purification,” *Nano Energy*, vol. 53, pp. 949–957, 2018.
- [38] Y. Lin, H. Xu, X. Shan, Y. Di, A. Zhao, Y. Hu, and Z. Gan, “Solar steam generation based on the photothermal effect: From designs to applications, and beyond,” *Journal of Materials Chemistry A*, vol. 7, no. 33, pp. 19203–19227, 2019.
- [39] T.-P. Teng, Y.-H. Hung, T.-C. Teng, H.-E. Mo, and H.-G. Hsu, “The effect of alumina/water nanofluid particle size on thermal conductivity,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 30, no. 14, pp. 2213–2218, 2010.
- [40] O. Hozien, W. M. El-Maghlany, M. M. Sorour, and Y. S. Mohamed, “Experimental study on thermophysical properties of tio₂, zno and ag water base nanofluids,” *Journal of Molecular Liquids*, vol. 334, p. 116128, 2021.
- [41] A. J. Moghadam, M. Farzane-Gord, M. Sajadi, and M. Hoseyn-Zadeh, “Effects of CuO/water nanofluid on the efficiency of a flat-plate solar collector,” *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 58, pp. 9–14, 2014.
- [42] S. Parvin, R. Nasrin, and M. A. Alim, “Heat transfer and entropy generation through nanofluid filled direct absorption solar collector,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 71, pp. 386–395, 2014.
- [43] L. Chen, J. Liu, X. Fang, and Z. Zhang, “Reduced graphene oxide dispersed nanofluids with improved photo-thermal conversion performance for direct absorption solar collectors,” *Solar*

Energy Materials and Solar Cells, vol. 163, no. June 2016, pp. 125–133, 2017.

- [44] P. Raj and S. Subudhi, “A review of studies using nanofluids in flat-plate and direct absorption solar collectors,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 84, no. August 2017, pp. 54–74, 2018.
- [45] M. Chen, Y. He, J. Zhu, and D. Wen, “Investigating the collector efficiency of silver nanofluids based direct absorption solar collectors,” *Applied Energy*, vol. 181, pp. 65–74, 2016.
- [46] T. B. Gorji and A. Ranjbar, “A numerical and experimental investigation on the performance of a low-flux direct absorption solar collector (dasc) using graphite, magnetite and silver nanofluids,” *Solar Energy*, vol. 135, pp. 493–505, 2016.
- [47] S. M. Ladjevardi, A. Asnaghi, P. S. Izadkhast, and A. H. Kashani, “Applicability of graphite nanofluids in direct solar energy absorption,” *Solar Energy*, vol. 94, pp. 327–334, 2013.
- [48] W. Yu and H. Xie, “A review on nanofluids: Preparation, stability mechanisms, and applications,” *Journal of Nanomaterials*, vol. 2012, 2012.
- [49] A. Ghadimi, R. Saidur, and H. S. Metselaar, “A review of nanofluid stability properties and characterization in stationary conditions,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 54, no. 17-18, pp. 4051–4068, 2011.
- [50] C. H. Lo, T. T. Tsung, and L. C. Chen, “Shape-controlled synthesis of Cu-based nanofluid using submerged arc nanoparticle synthesis system (SANSS),” *Journal of Crystal Growth*, vol. 277, no. 1-4, pp. 636–642, 2005.
- [51] H. T. Zhu, Y. S. Lin, and Y. S. Yin, “A novel one-step chemical method for preparation of copper nanofluids,” *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 277, no. 1, pp. 100–103, 2004.
- [52] M. U. Sajid and Y. Bicer, “Nanofluids as solar spectrum splitters: A critical review,” *Solar Energy*, vol. 207, no. June, pp. 974–1001, 2020.
- [53] J. Shen, Y. He, J. Wu, C. Gao, K. Keyshar, X. Zhang, Y. Yang, M. Ye, R. Vajtai, J. Lou, and P. M. Ajayan, “Liquid Phase Exfoliation of Two-Dimensional Materials by Directly Probing and Matching Surface Tension Components,” *Nano Letters*, vol. 15, no. 8, pp. 5449–5454, 2015.
- [54] X. Feng, H. Ma, S. Huang, W. Pan, X. Zhang, F. Tian, C. Gao, Y. Cheng, and J. Luo, “Aqueous-organic phase-transfer of highly stable gold, silver, and platinum nanoparticles and new route for fabrication of gold nanofilms at the oil/water interface and on solid supports,” *Journal of Physical Chemistry B*, vol. 110, no. 25, pp. 12311–12317, 2006.
- [55] H. T. Zhu, C. Y. Zhang, Y. M. Tang, and J. X. Wang, “Novel synthesis and thermal conductivity of CuO nanofluid,” *Journal of Physical Chemistry C*, vol. 111, no. 4, pp. 1646–1650, 2007.
- [56] N. Arora and M. Gupta, “An updated review on application of nanofluids in flat tubes radiators for improving cooling performance,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 134, no. January, p. 110242, 2020.
- [57] D. Chimene, D. L. Alge, and A. K. Gaharwar, “Two-Dimensional Nanomaterials for Bio-medical Applications: Emerging Trends and Future Prospects,” *Advanced Materials*, vol. 27, no. 45, pp. 7261–7284, 2015.

- [58] T. Hu, X. Mei, Y. Wang, X. Weng, R. Liang, and M. Wei, “Two-dimensional nanomaterials: fascinating materials in biomedical field,” *Science Bulletin*, vol. 64, no. 22, pp. 1707–1727, 2019.
- [59] M. Bernardi, C. Ataca, M. Palumbo, and J. C. Grossman, “Optical and Electronic Properties of Two-Dimensional Layered Materials,” *Nanophotonics*, vol. 6, no. 2, pp. 479–493, 2017.
- [60] C. J. Bullock and C. Bussy, “Biocompatibility Considerations in the Design of Graphene Biomedical Materials,” *Advanced Materials Interfaces*, vol. 6, no. 11, 2019.
- [61] C. P. Bergmann, V. Sharma, K. Nor, and H. B. Hamid, *Topics in Mining, Metallurgy and Materials Engineering Series Editor: Engineering Applications of Nanotechnology From Energy to Drug Delivery*. 2017.
- [62] S. H. Ahmad, R. Saidur, I. M. Mahbubul, and F. A. Al-Sulaiman, “Optical properties of various nanofluids used in solar collector: A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 73, no. October 2016, pp. 1014–1030, 2017.
- [63] L. Mercatelli, E. Sani, D. Fontani, G. Zaccanti, F. Martelli, and P. di Ninni, “Scattering and absorption properties of carbon nanohorn-based nanofluids for solar energy applications,” *Journal of the European Optical Society*, vol. 6, no. May 2014, p. 36, 2011.
- [64] A. Höpe, *Diffuse Reflectance and Transmittance*, vol. 46. 2014.
- [65] “What is a molar extinction coefficient? | aat bioquest.” <https://www.aatbio.com/resources/faq-frequently-asked-questions/What-is-a-molar-extinction-coefficient>. [Consulta: 06 junio 2021].
- [66] S. H. Lee and S. P. Jang, “Extinction coefficient of aqueous nanofluids containing multi-walled carbon nanotubes,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 67, pp. 930–935, 2013.
- [67] A. Menbari, A. A. Alemrajabi, and Y. Ghayeb, “Investigation on the stability, viscosity and extinction coefficient of $\text{CuO-Al}_2\text{O}_3/\text{water}$ binary mixture nanofluid,” *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 74, pp. 122–129, 2016.
- [68] T. J. Choi, S. H. Kim, S. P. Jang, L. Lin, and M. Kedzierski, “Aqueous nanofluids containing paraffin-filled mwcnts for improving effective specific heat and extinction coefficient,” *Energy*, vol. 210, p. 118523, 2020.
- [69] S. K. Verma and A. K. Tiwari, “Progress of nanofluid application in solar collectors: A review,” *Energy Conversion and Management*, vol. 100, pp. 324–346, 2015.
- [70] “What is thermal conductivity? an overview - thermtest.” <https://thermtest.com/what-is-thermal-conductivity>. [Consulta: 7 abril 2021].
- [71] P. Keblinski, S. Phillpot, S. Choi, and J. Eastman, “Mechanisms of heat flow in suspensions of nano-sized particles (nanofluids),” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 45, no. 4, pp. 855–863, 2002.
- [72] R. L. Hamilton and O. K. Crosser, “Thermal conductivity of heterogeneous two-component systems,” *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, vol. 1, no. 3, pp. 187–191, 1962.
- [73] D. Wang and L.-S. Fan, “2 - particle characterization and behavior relevant to fluidized bed combustion and gasification systems,” in *Fluidized Bed Technologies for Near-Zero Emission Combustion and Gasification* (F. Scala, ed.), Woodhead Publishing Series in Energy, pp. 42–

76, Woodhead Publishing, 2013.

- [74] H. Fricke, "A mathematical treatment of the electric conductivity and capacity of disperse systems i. the electric conductivity of a suspension of homogeneous spheroids," *Phys. Rev.*, vol. 24, pp. 575–587, Nov 1924.
- [75] J. Carvill, "3 - thermodynamics and heat transfer," in *Mechanical Engineer's Data Handbook* (J. Carvill, ed.), pp. 102–145, Oxford: Butterworth-Heinemann, 1993.
- [76] Y. Xuan and W. Roetzel, "Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 43, no. 19, pp. 3701–3707, 2000.
- [77] S. K.R.V, T. Rao, and A. Balakrishnan, *Nanofluids and Their Engineering Applications*. 06 2019.
- [78] E. Anczurowski and S. G. Mason, "The kinetics of flowing dispersions. III. Equilibrium orientations of rods and discs (experimental)," *Journal of Colloid And Interface Science*, vol. 23, no. 4, pp. 533–546, 1967.
- [79] W. Pabst, E. Gregorová, and C. Berthold, "Particle shape and suspension rheology of short-fiber systems," *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 26, no. 1-2, pp. 149–160, 2006.
- [80] S. Mueller, E. W. Llewellyn, and H. M. Mader, "The rheology of suspensions of solid particles," *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 466, no. 2116, pp. 1201–1228, 2010.
- [81] R. Roscoe, "The viscosity of suspensions of rigid spheres," *British Journal of Applied Physics*, vol. 3, no. 8, pp. 267–269, 1952.
- [82] H. Xie, W. Yu, and W. Chen, "MgO nanofluids: Higher thermal conductivity and lower viscosity among ethylene glycol-based nanofluids containing oxide nanoparticles," *Journal of Experimental Nanoscience*, vol. 5, no. 5, pp. 463–472, 2010.
- [83] C. Campos, D. Vasco, C. Angulo, P. A. Burdiles, J. Cardemil, and H. Palza, "About the relevance of particle shape and graphene oxide on the behavior of direct absorption solar collectors using metal based nanofluids under different radiation intensities," *Energy Conversion and Management*, vol. 181, no. August 2018, pp. 247–257, 2019.
- [84] J. Jeong, C. Li, Y. Kwon, J. Lee, S. H. Kim, and R. Yun, "Particle shape effect on the viscosity and thermal conductivity of ZnO nanofluids," *International Journal of Refrigeration*, vol. 36, no. 8, pp. 2233–2241, 2013.
- [85] E. V. Timofeeva, J. L. Routbort, and D. Singh, "Particle shape effects on thermophysical properties of alumina nanofluids," *Journal of Applied Physics*, vol. 106, no. 1, 2009.
- [86] A. V. Minakov, D. V. Guzei, M. I. Pryazhnikov, V. A. Zhigarev, and V. Y. Rudyak, "Study of turbulent heat transfer of the nanofluids in a cylindrical channel," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 102, pp. 745–755, 2016.
- [87] K. Yapici, O. Osturk, and Y. Uludag, "Dependency of nanofluid rheology on particle size and concentration of various metal oxide nanoparticles," *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, vol. 35, no. 2, pp. 575–586, 2018.
- [88] X. Li, W. Chen, and C. Zou, "An experimental study on β -cyclodextrin modified carbon nanotubes nanofluids for the direct absorption solar collector (DASC): Specific heat capacity and photo-thermal conversion performance," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 204,

no. 1, p. 110240, 2020.

- [89] A. Mahajan and E. Ramana, "Patents on Magnetoelectric Multiferroics and their Processing by Electrophoretic Deposition," *Recent Patents on Materials Science*, vol. 7, no. 2, pp. 109–130, 2014.
- [90] J. Ding, H. Zhao, and H. Yu, "Graphene nanofluids based on one-step exfoliation and edge-functionalization," *Carbon*, vol. 171, pp. 29–35, 2021.
- [91] M. Chopkar, S. Sudarshan, P. K. Das, and I. Manna, "Effect of Particle Size on Thermal Conductivity of Nanofluid," vol. 39, no. July, 2008.
- [92] K. B. Anoop, T. Sundararajan, and S. K. Das, "Effect of particle size on the convective heat transfer in nanofluid in the developing region," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 52, no. 9-10, pp. 2189–2195, 2009.
- [93] T. Aguilar, E. Sani, L. Mercatelli, I. Carrillo-Berdugo, E. Torres, and J. Navas, "Exfoliated graphene oxide-based nanofluids with enhanced thermal and optical properties for solar collectors in concentrating solar power," *Journal of Molecular Liquids*, vol. 306, p. 112862, 2020.
- [94] D. Sharma and A. K. Tiwari, "Thermal performance of CeO₂-Water nanofluid in flat plate solar collector," *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, vol. 9, no. 9, pp. 552–558, 2018.
- [95] H. Kaya and K. Arslan, "Numerical investigation of efficiency and economic analysis of an evacuated U-tube solar collector with different nanofluids," *Heat and Mass Transfer/Waerme- und Stoffuebertragung*, vol. 55, no. 3, pp. 581–593, 2019.
- [96] C. Jin, Q. Wu, G. Yang, H. Zhang, and Y. Zhong, "Investigation on hybrid nanofluids based on carbon nanotubes filled with metal nanoparticles: Stability, thermal conductivity, and viscosity," *Powder Technology*, vol. 389, pp. 1–10, 2021.
- [97] L. Al-Gebory and M. P. Mengüç, "The effect of pH on particle agglomeration and optical properties of nanoparticle suspensions," *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, vol. 219, pp. 46–60, 2018.
- [98] W. Xian-Ju and L. Xin-Fang, "Influence of pH on Nanofluids' Viscosity and Thermal Conductivity," *Chinese Physics Letters*, vol. 26, no. 5, p. 056601, 2009.
- [99] X. Wang, Y. He, X. Liu, and J. Zhu, "Enhanced direct steam generation via a bio-inspired solar heating method using carbon nanotube films," *Powder Technology*, vol. 321, pp. 276–285, 2017.
- [100] X. Liu, X. Wang, J. Huang, G. Cheng, and Y. He, "Volumetric solar steam generation enhanced by reduced graphene oxide nanofluid," *Applied Energy*, vol. 220, no. February, pp. 302–312, 2018.
- [101] D. Ghim, Q. Jiang, S. S. Cao, S. Singamaneni, and Y. S. Jun, "Mechanically interlocked 1T/2H phases of MoS₂ nanosheets for solar thermal water purification," *Nano Energy*, vol. 53, no. June, pp. 949–957, 2018.
- [102] S. G. Naik and M. H. K. Rabinal, "Molybdenum Disulphide Heterointerfaces as Potential Materials for Solar Cells, Energy Storage, and Hydrogen Evolution," *Energy Technology*, vol. 8, no. 6, pp. 1–56, 2020.

- [103] W. Z. Teo, E. L. K. Chng, Z. Sofer, and M. Pumera, “Cytotoxicity of exfoliated transition-metal dichalcogenides (MoS₂, WS₂, and WSe₂) is lower than that of graphene and its analogues,” *Chemistry - A European Journal*, vol. 20, no. 31, pp. 9627–9632, 2014.
- [104] M. Zhang, K. Wang, S. Zeng, Y. Xu, W. Nie, P. Chen, and Y. Zhou, “Visible light-induced antibacterial effect of MoS₂: Effect of the synthesis methods,” *Chemical Engineering Journal*, vol. 411, no. January, p. 128517, 2021.
- [105] X. Guo, G. Yang, J. Zhang, and X. Xu, “Structural, mechanical and electronic properties of in-plane 1T/2H phase interface of MoS₂ heterostructures,” *AIP Advances*, vol. 5, no. 9, 2015.
- [106] S. S. Chou, B. Kaehr, J. Kim, B. M. Foley, M. De, P. E. Hopkins, J. Huang, C. J. Brinker, and V. P. Dravid, “Chemically exfoliated MoS₂ as near-infrared photothermal agents,” *Angewandte Chemie - International Edition*, vol. 52, no. 15, pp. 4160–4164, 2013.
- [107] J. Lu, M. Chen, L. Dong, L. Cai, M. Zhao, Q. Wang, and J. Li, “Molybdenum disulfide nanosheets: From exfoliation preparation to biosensing and cancer therapy applications,” *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, vol. 194, no. March, 2020.
- [108] M. Baby and K. Rajeev Kumar, “Structural and optical characterization of stacked MoS₂ nanosheets by hydrothermal method,” *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, vol. 29, no. 6, pp. 4658–4667, 2018.
- [109] D. Cortinez, P. Palma, R. Castro, and H. Palza, “A multifunctional bi-phasic graphene oxide/chitosan paper for water treatment,” *Separation and Purification Technology*, vol. 235, p. 116181, 2020.
- [110] D. Wang, L. Song, K. Zhou, X. Yu, Y. Hu, and J. Wang, “Anomalous nano-barrier effects of ultrathin molybdenum disulfide nanosheets for improving the flame retardance of polymer nanocomposites,” *J. Mater. Chem. A*, vol. 3, pp. 14307–14317, 2015.
- [111] J. Feria, T. Mercado, and F. Jove, “Uso del quitosano como cuagulante natural en el tratamiento de aguas: una breve revisión,” *Revista Espacios*, vol. 41, no. 32, pp. 106 – 116, 2020.
- [112] J. Liu, J. Zeng, C. Zhu, J. Miao, Y. Huang, and H. Heinz, “Interpretable molecular models for molybdenum disulfide and insight into selective peptide recognition,” *Chemical Science*, vol. 11, no. 33, pp. 8708–8722, 2020.
- [113] A. Vertanessian, A. Allen, and M. J. Mayo, “Agglomerate formation during drying,” *Journal of Materials Research*, vol. 18, no. 2, pp. 495–506, 2003.
- [114] Y. Zhao, M. Wang, Y. Liu, and H. Cui, “Redispersity/Solubility of Nanopowder in Solvents,” *Recent Patents on Nanotechnology*, vol. 8, no. 1, pp. 18–30, 2014.
- [115] V. Forsberg, R. Zhang, J. Bäckström, C. Dahlström, B. Andres, M. Norgren, M. Andersson, M. Hummelgård, and H. Olin, “Exfoliated MoS₂ in water without additives,” *PLoS ONE*, vol. 11, no. 4, 2016.
- [116] J. Wang, W. Zhang, Y. Wang, W. Zhu, D. Zhang, Z. Li, and J. Wang, “Enhanced Exfoliation Effect of Solid Auxiliary Agent On the Synthesis of Biofunctionalized MoS₂ Using Grindstone Chemistry,” *Particle and Particle Systems Characterization*, vol. 33, no. 11, pp. 825–832, 2016.

- [117] N. Dong, Y. Li, Y. Feng, S. Zhang, X. Zhang, C. Chang, J. Fan, L. Zhang, and J. Wang, “Optical limiting and theoretical modelling of layered transition metal dichalcogenide nanosheets,” *Scientific Reports*, vol. 5, pp. 1–10, 2015.
- [118] “Cost effective liquid phase exfoliation of MoS₂ nanosheets and photocatalytic activity for wastewater treatment enforced by visible light,” *Scientific Reports*, vol. 10, no. 1, pp. 1–12, 2020.
- [119] A. K. Arinta W Rokmana, A Asriani, H Suhendar, K Triyana, Santoso, and I, “The Optical Properties of Thin Film Reduced Ethylenedioxythiophene): Poly (Styrene Sulfonate)(PEDOT : PSS) Fabricated by Spin Coating The Optical Properties of Thin Film Reduced Graphene Oxide / Poly (3 , 4 Ethylenedioxythiophene): Poly (Styrene Sul,” *The International Conference on Theoretical and Applied Physics*, pp. 1–6.
- [120] Q. Lai, S. Zhu, X. Luo, M. Zou, and S. Huang, “Ultraviolet-visible spectroscopy of graphene oxides,” *AIP Advances*, vol. 2, no. 3, pp. 2–7, 2012.
- [121] J. Lee, P. Dak, Y. Lee, H. Park, W. Choi, M. A. Alam, and S. Kim, “Two-dimensional layered MoS₂ biosensors enable highly sensitive detection of biomolecules,” *Scientific Reports*, vol. 4, pp. 1–7, 2014.
- [122] D. H. Alshora, M. A. Ibrahim, and F. K. Alanazi, *Nanotechnology from particle size reduction to enhancing aqueous solubility*. Elsevier Inc., 2016.
- [123] I. A. BLAGOVIDOVA and A. I. TENTSOVA, *Pharmaceutical suspensions.*, vol. 10. 1961.
- [124] V. Putritama, V. Fauzia, and A. Supangat, “The effect of the layer number of MoS₂ nanosheets on the photocatalytic efficiency of ZnO/MoS₂,” *Surfaces and Interfaces*, vol. 21, no. August, 2020.
- [125] S. Stankovich, D. A. Dikin, R. D. Piner, K. A. Kohlhaas, A. Kleinhammes, Y. Jia, Y. Wu, S. B. T. Nguyen, and R. S. Ruoff, “Synthesis of graphene-based nanosheets via chemical reduction of exfoliated graphite oxide,” *Carbon*, vol. 45, no. 7, pp. 1558–1565, 2007.
- [126] A. Kozbial, X. Gong, H. Liu, and L. Li, “Understanding the Intrinsic Water Wettability of Molybdenum Disulfide (MoS₂),” *Langmuir*, vol. 31, no. 30, pp. 8429–8435, 2015.
- [127] J. Nuncira, L. M. Seara, R. D. Sinisterra, V. Caliman, and G. G. Silva, “Long-term colloidal stability of graphene oxide aqueous nanofluids,” *Fullerenes Nanotubes and Carbon Nanostructures*, vol. 28, no. 5, pp. 407–417, 2020.
- [128] W. Cham sa ard, D. Fawcett, C. C. Fung, P. Chapman, S. Rattan, and G. E. J. Poinern, “Synthesis, characterisation and thermo-physical properties of highly stable graphene oxide-based aqueous nanofluids for potential low-temperature direct absorption solar applications,” *Scientific Reports*, vol. 11, no. 1, pp. 1–13, 2021.
- [129] O. Z. Sharaf, N. Rizk, C. P. Joshi, M. Abi Jaoudé, A. N. Al-Khateeb, D. C. Kyritsis, E. Abu-Nada, and M. N. Martin, “Ultrastable plasmonic nanofluids in optimized direct absorption solar collectors,” *Energy Conversion and Management*, vol. 199, p. 112010, 2019.
- [130] B. Li, Y. Zhang, R. Zou, Q. Wang, B. Zhang, L. An, F. Yin, Y. Hua, and J. Hu, “Self-assembled WO₃-x hierarchical nanostructures for photothermal therapy with a 915 nm laser rather than the common 980 nm laser,” *Dalton Transactions*, vol. 43, no. 16, pp. 6244–6250, 2014.

- [131] S. H. Chung, A. Cerussi, S. Merritt, J. Ruth, and B. Tromberg, “Non-invasive tissue temperature measurements based on quantitative diffuse optical spectroscopy (dos) of water,” *Physics in medicine and biology*, vol. 55, pp. 3753–65, 07 2010.
- [132] M. F. Bakhsheshi and T. Y. Lee, “Non-invasive monitoring of brain temperature by near-infrared spectroscopy,” *Temperature*, vol. 2, no. 1, pp. 31–32, 2015.
- [133] B. Hołyńska, “Study of the effect of grain size heterogeneity in the X-ray absorption analysis of simulated aqueous slurries,” *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, vol. 27, no. 6, pp. 237–245, 1972.
- [134] T. G. Mayerhöfer, A. V. Pipa, and J. Popp, “Beer’s Law-Why Integrated Absorbance Depends Linearly on Concentration,” *ChemPhysChem*, vol. 20, no. 21, pp. 2748–2753, 2019.
- [135] N. Chen, H. Ma, Y. Li, J. Cheng, C. Zhang, D. Wu, and H. Zhu, “Complementary optical absorption and enhanced solar thermal conversion of CuO-ATO nanofluids,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 162, no. December 2016, pp. 83–92, 2017.
- [136] L. Chen, J. Liu, X. Fang, and Z. Zhang, “Reduced graphene oxide dispersed nanofluids with improved photo-thermal conversion performance for direct absorption solar collectors,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 163, no. June 2016, pp. 125–133, 2017.
- [137] J. G. Speight, *The properties of water*. No. ii, 2020.
- [138] Y. Çengel, *TERMODINAMICA*. McGraw-Hill Interamericana de España S.L., 2012.
- [139] C. Y. Tso and C. Y. Chao, “Study of enthalpy of evaporation, saturated vapor pressure and evaporation rate of aqueous nanofluids,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 84, pp. 931–941, 2015.
- [140] S. U. Choi, “Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles,” *American Society of Mechanical Engineers, Fluids Engineering Division (Publication) FED*, vol. 231, pp. 99–105, 1995.
- [141] J. Chen and L. Li, “Effect of oxidation degree on the thermal properties of graphene oxide,” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 9, no. 6, pp. 13740–13748, 2020.
- [142] S. Sahoo, A. P. Gaur, M. Ahmadi, M. J. Guinel, and R. S. Katiyar, “Temperature-dependent Raman studies and thermal conductivity of few-layer MoS₂,” *Journal of Physical Chemistry C*, vol. 117, no. 17, pp. 9042–9047, 2013.
- [143] M. A. Kazemi, J. A. Elliott, and D. S. Nobes, “The influence of container geometry and thermal conductivity on evaporation of water at low pressures,” *Scientific Reports*, vol. 8, no. 1, pp. 1–7, 2018.
- [144] A. S. Lobasov and A. V. Minakov, “The experimental investigation of the evaporation rate of nanofluids based on different fluids,” *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1382, no. 1, 2019.
- [145] S. Simpson, A. Schelfhout, C. Golden, and S. Vafaei, “Nanofluid thermal conductivity and effective parameters,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 9, no. 1, 2018.

Anexos

Anexo A

Reactivos y especificaciones de equipos

A.1. Reactivos

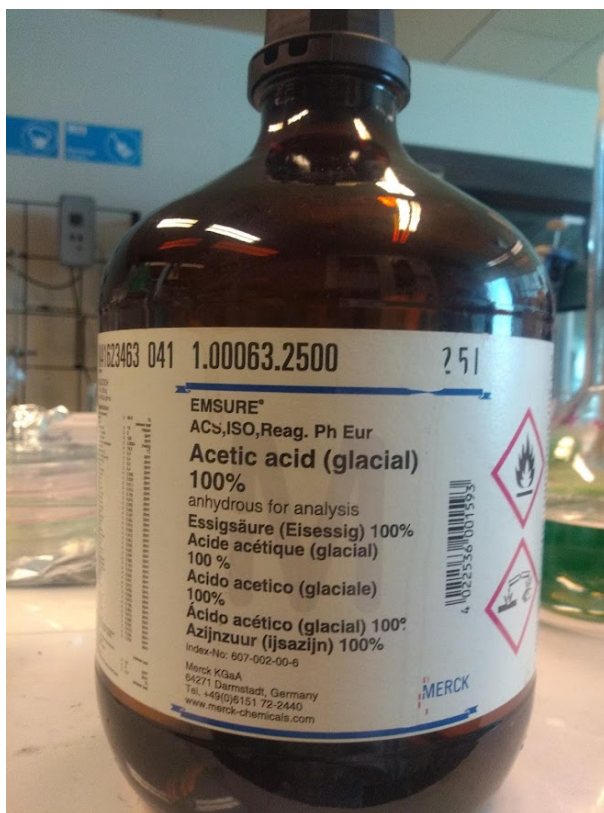


Figura A.1: Ácido Acético (glacial) al 100% (CH_3COOH). Marca Merck

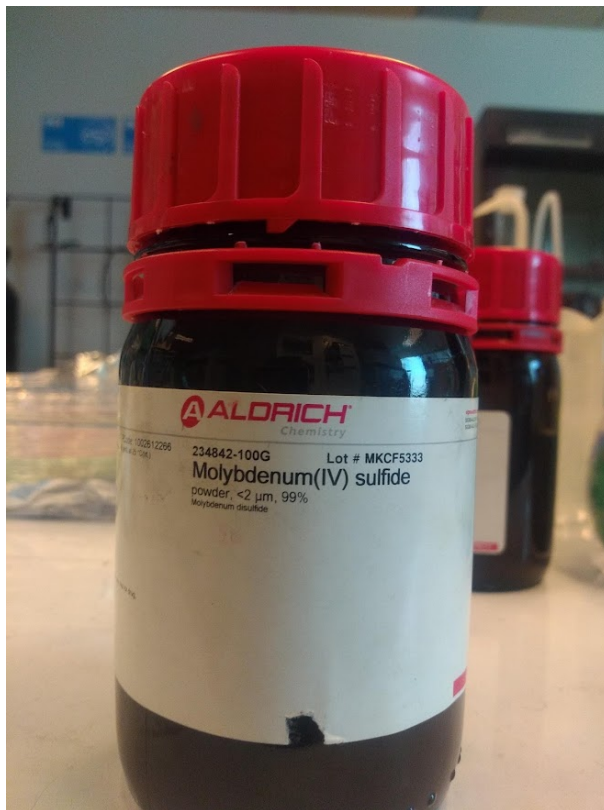


Figura A.2: Polvo de Disulfuro de Molibdeno (MoS_2) $<2\mu m$, 99%. Marca Sigma Aldrich

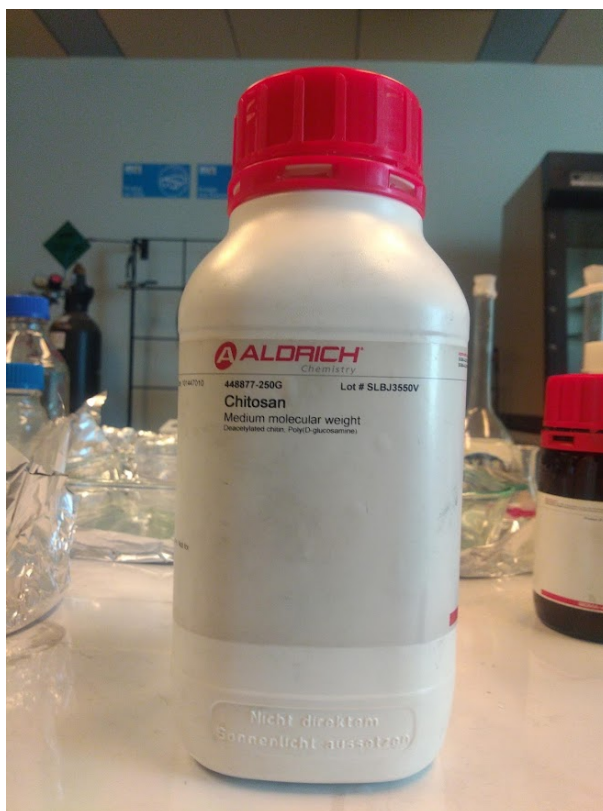


Figura A.3: Quitosano Peso Molecular Medio. Quitina Desacetilada, Poli(D-glucosamina). Marca Sigma Aldrich.

A.2. Especificaciones de equipos

Tabla A.1: Especificaciones técnicas de la centrífuga Supra R22

Max. RPM	22,000 rpm
Max. RCF	57,358 xg
Max. capacity	4 x 1,000 mL
ACC/DEC ramps	10/10 steps
Temperature range	-10°C to 40°C
Time control	<100 hr, continuous, pulse
Program memory	100
Imbalance cutoff / tracking	Yes
Rotor identification	Automatic
Dimension (W x D x H, mm)	668.7 x 800.6 x 891.3
Weight without rotor	230 kg
Noise level	65dB
Power requirement (VA)	3.4 kVA
Power input (V, Hz)	210~240V 60 Hz (110V, 50 Hz optional)
Cat. No.	SU-R22

Tabla A.2: Especificaciones de la unidad análoga de ultrasonidos Transsonic T700.

	T 700
Dimensión interna del tanque W x D x H	300x200x150
Dimensiones exteriores de la unidad W x D x H	395x290x375
Volumen/litro	9,5
PEso/kg	6,7 (6,9)
Frecuencia/kHz	35
HF peak/W	320
Carga conectada/VA	160 (560)
Cubierta	Acero inoxidable
Temporizador	Si
Drenaje	Si
Order No.	T 700/H 295 400 2000

Tabla A.3: Especificaciones técnicas del espectrofotómetro Rayleigh UV-1601.

ESPECIFICACIONES:	
Gama de longitud de onda:	190-1100nm
Anchura de banda espectral:	2nm (5nm, 4nm, 1nm opcionales)
Exactitud de la longitud de onda:	±0.3nm
Reproductibilidad de la longitud de onda:	0.15nm
Sistema fotométrico:	supervisión del cociente de la Plit-viga; Exploración auto; Detectores duales
Exactitud fotométrica:	± 0.3 %T (0-100 %T); ±0.002A(0~0.5A); ± 0.004A (0.5A~1A)
Reproductibilidad fotométrica:	0.2 %T
Modo de trabajo:	T, A, C, E
Gama fotométrica:	-0.3-3A
Luz externa:	≤0.1 %T(NaI, 220nm, NaNO ₂ 340nm)
Llanura de la línea de fondo:	\pm 0.002A
Estabilidad:	0.001A/30min (en 500nm, después de calentar)
Ruido:	± 0.001A (en 500nm, después de calentar)
Exhibición:	6 pulgadas de alto LCD azul claro
Detector:	Fotodiodo del silicio
Energía:	CA: 220V/50Hz, 110V/60Hz, 180W
Dimensiones:	630 x 470 x 210mm
Peso:	26kg

Tabla A.4: Especificaciones técnicas del Medidor de energía solar Modelo SP505.

Especificaciones			
Pantalla	Panalla LCD con dígitos de $3 \frac{3}{4}$ (3999 cuentas)		
Mediciones	Potencia de la radiación solar		
Frecuencia de muestreo	Aproximadamente 0.25 segundos		
Indicador de sobre escala	"OL"		
Montaje de trípode	Panel Posterior		
Tensión	2 baterías AAA de 1.5V		
Vida de la batería	Aprox. 50 horas		
Apagado automático (APO)	Después de aprox. 10 minutos de inactividad		
Temperatura de operación/humedad	5 a 40°C (41 a 104°F) 80 %HR Máx.		
Altitud de operación	2000 metros (7000 ft.) máximo		
Temperatura y humedad de almacenamiento	-10 a 60° (14 a 140 °F) / 70 %HR Máx.		
Dimensiones / peso	108 x 48 x 23mm (4.3 x 1.9 x 0.9")/80g (2.8oz)		
Seguridad	Para uso en interiores solamente. EMC: EN61326 (1997), A1 (1998), A2 (2001); Grado de contaminación 2		
Especificaciones eléctricas ($25 \pm 5^\circ\text{C}$)			
Potencia solar			
Unidad	Escala	Resolución	Precisión*
W/m^2	0 a 3999	0.1	$\pm 10W/m^2$ o $\pm 5\%$ lect; la que sea mayor
BTU ($ft^2 * h$)	0 a 634	0.1	$\pm 3\text{BTU} (ft^2 * h)$ o $\pm 5\%$ lect; la que sea mayor
*error adicional de temperatura: $\pm 0.38 W/m^2$ o $\pm 0.12 \text{BTU} ft^2 * h$ por °C desde 25°C			

Tabla A.5: Especificaciones técnicas del simulador solar SF300B

Model	SF300B
Part number	160-9011
Uniformity	<5 %
Uniformity Classification	B
Spectral Match Classification	A
Spectral Range (nm)*	250-2000
Temporal Stability Classification	A
Target diameter (mm)	50
Working Distance (mm)	100-130
Working Distance (mm) (with Beam Turning Option 160-9005)	40-50
Collimation	1,0 degree half angle
Power Level at Target (AM1.5G Standard- $100mW/cm^2$)	1 sun
Center Beam Line Height (mm)	137
Lamp Power (W)	300
Power Supply Model	601-300
Dimensions (LxWxH) (mm)	305 x 205 x 276
Weight (kg) Without power Supply	6
Power Supply Input	110-240V, 50Hz/60hZ, 250W 110-240V, 50Hz/60Hz, 450W
Output power (W)	100-150
Operation Current (A)	5-20
Stability / Rippie /Regulation	0,05 %/ <0,02 % curren variation for 5V line charge

Tabla A.6: Especificaciones técnicas de la termocupla 88598 4ch K SD Logger

Modelo	88598
Rango de temperatura K	-200 ~1370 °C, -328 ~2498 °F
K Resolución de temperatura	0.1 °C, 0.1 °F
Precisión de temperatura K	± (0.3% lectura + 1 °C)
Tarjeta SD	Tarjeta SD o tarjeta SDHC (las tarjetas MMC y SDXC no son compatibles)
Tasa de muestreo	Programable desde 1 segundo
Tamaño LCD	104 (L) * 47 (W) mm
Temperatura de funcionamiento	0 ~50 °
HR de funcionamiento %	Humedad 80 %
Temperatura de almacenamiento	-20 ~50 °C
Almacenamiento HR %	Humedad 90 %
Medidor de tamaño	152 (L) * 100 (W) * 39 (H) mm
Peso	~300g
Batería	Pilas alcalinas AA de 4 piezas o adaptador de CC de 9 V
Paquete estándar	Medidor, 2 piezas de termopar tipo K de cuentas, Batería, Manual, Tarjeta SD, Caja Sencilla
Accesorio opcional	Termopar tipo K (hecho a medida El termopar está disponible a pedido)

Anexo B

Comparación de transmitancia de nanofluidos por su concentración

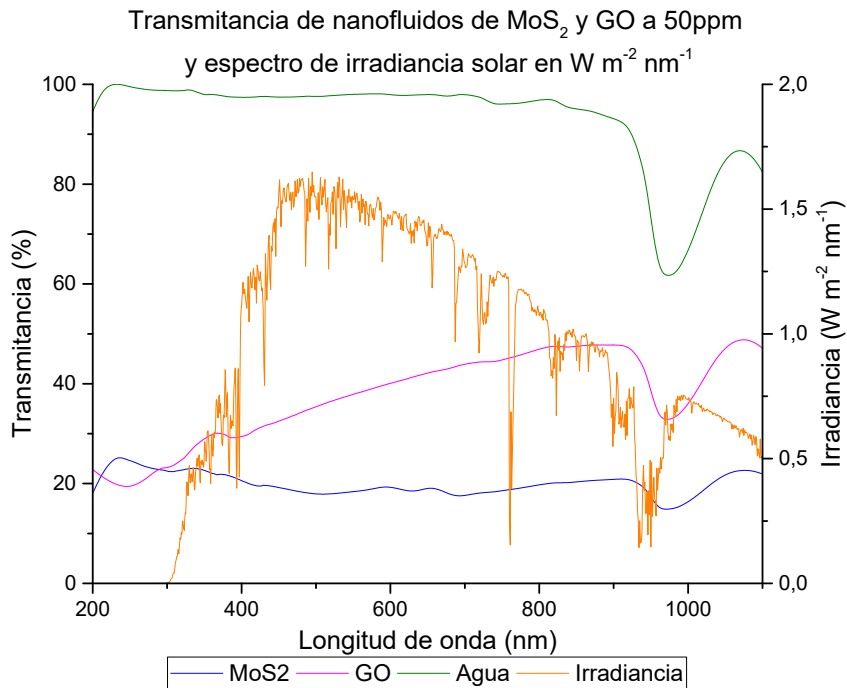


Figura B.1: Transmitancias de nanofluidos de MoS_2 y GO a 50ppm, y la irradiancia solar a nivel de la tierra en el ángulo cenital solar de 48.2° en $\text{W m}^{-2} \text{nm}^{-1}$.

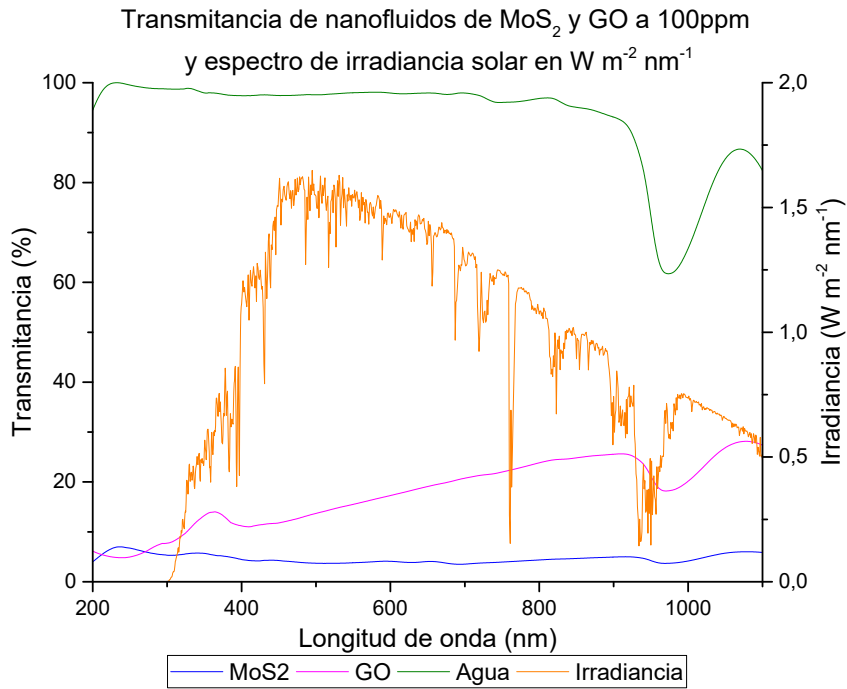


Figura B.2: Transmitancias de nanofluidos de MoS_2 y GO a 100ppm, y la irradiancia solar a nivel de la tierra en el ángulo cenital solar de 48.2° en $W m^{-2} nm^{-1}$.

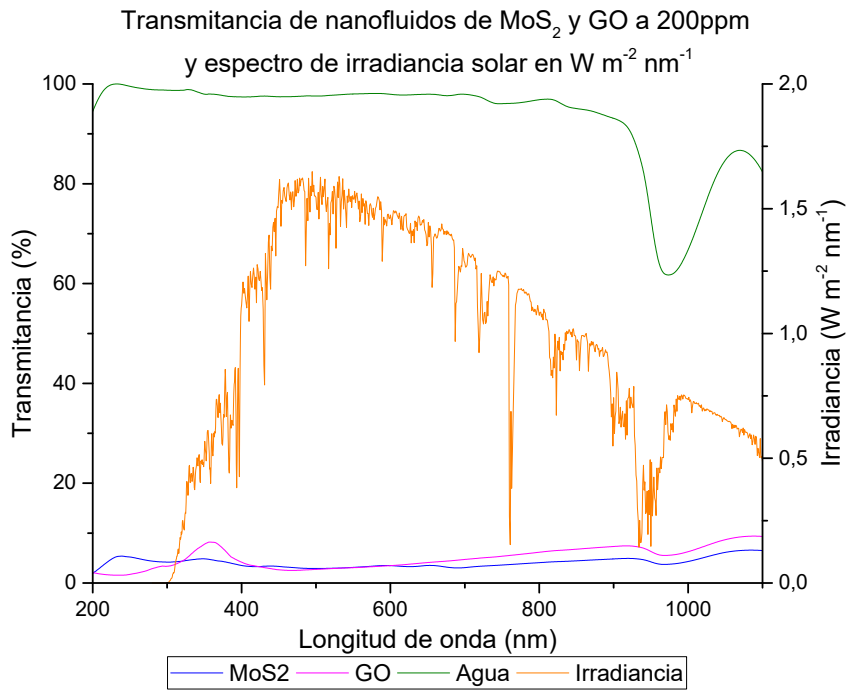


Figura B.3: Transmitancias de nanofluidos de MoS_2 y GO a 200ppm, y la irradiancia solar a nivel de la tierra en el ángulo cenital solar de 48.2° en $W m^{-2} nm^{-1}$.

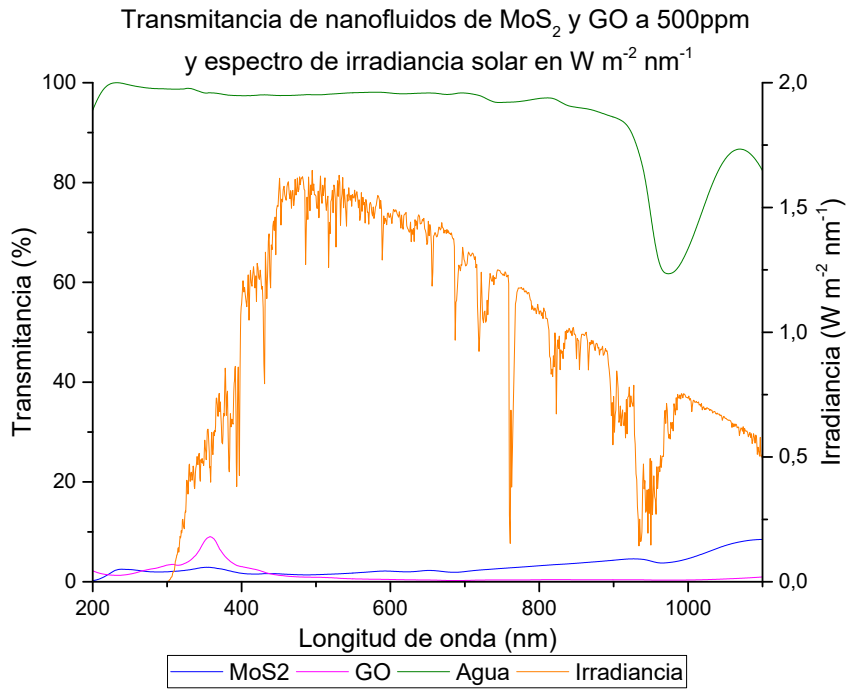


Figura B.4: Transmitancias de nanofluidos de MoS_2 y GO a 500ppm, y la irradiancia solar a nivel de la tierra en el ángulo cenital solar de 48.2° en $Wm^{-2}nm^{-1}$.

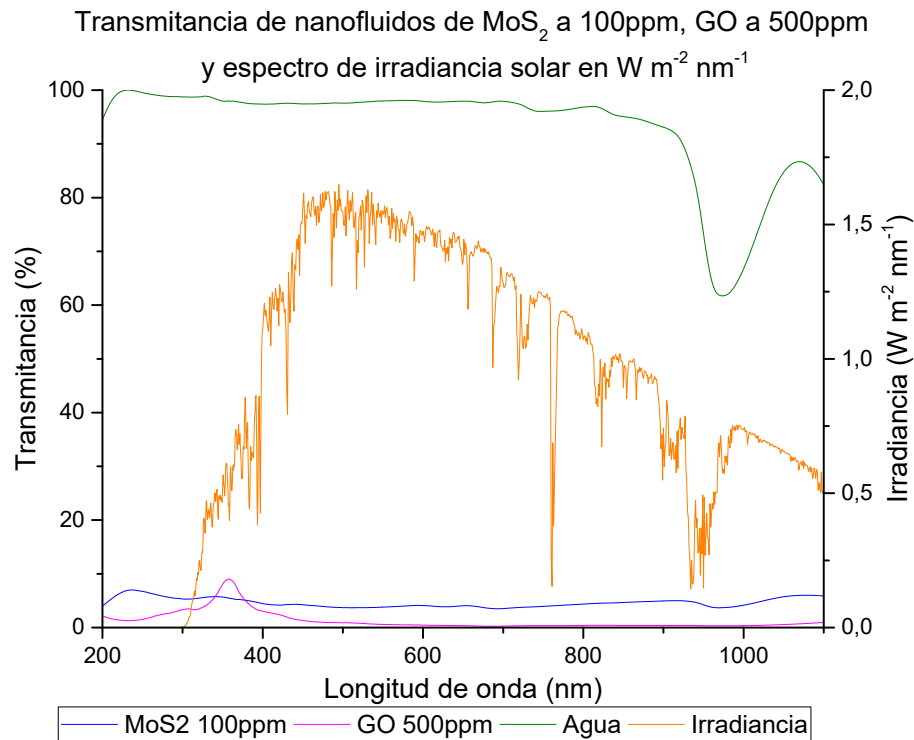


Figura B.5: Transmitancias de nanofluidos de MoS_2 y GO a la concentración de 100 y 500ppm, respectivamente, y la irradiancia solar a nivel de la tierra en el ángulo cenital solar de 48.2° en $Wm^{-2}nm^{-1}$.