

**ESCUELA SUPERIOR DE TECNOLOGÍA Y
CIENCIAS EXPERIMENTALES**

**MASTER EN EFICIENCIA ENERGÉTICA Y
SOSTENIBILIDAD DE INSTALACIONES
INDUSTRIALES**

“Caracterización de la eficiencia de
conversión entre radiación solar y energía
térmica en nanofluidos”

PROYECTO FINAL DE MASTER

AUTOR:
BEATRIZ ASTASIO CAVERO

DIRECTOR:
JOSÉ ENRIQUE JULIÁ BOLIVAR

CODIRECTOR:
RAUL MARTÍNEZ CUENCA



Castellón de la Plana, 18 de Noviembre de 2014

ÍNDICE GENERAL

1.	OBJETO Y CAMPO DE APLICACIÓN	7
1.1.	OBJETIVO	7
1.2.	METODOLOGÍA	7
2.	ALCANCE	8
3.	ANTECEDENTES	10
4.	NORMAS Y REFERENCIAS	17
4.1.	NORMATIVA	17
4.2.	BIBLIOGRAFÍA	18
4.3.	PROGRAMAS DE CÁLCULO	19
5.	SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS	20
5.1.	. ABREVIATURAS	20
5.2.	. SÍMBOLOS GRIEGOS	20
6.	ANÁLISIS TEÓRICO	21
7.	SISTEMA EXPERIMENTAL	27
7.1.	ESQUEMA Y MONTAJE DE LA INSTALACIÓN	27
7.2.	PREPARACIÓN DE MUESTRAS Y ENSAYOS	33
8.	METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	39
8.1.	TOMA DE MEDIDAS DE LAS CARACTERÍSTICAS FOTOTÉRMICAS	39
8.2.	ANÁLISIS DE LAS MEDIDAS REALIZADAS	39
8.3.	REPRESENTACIÓN DE RESULTADOS	44
9.	SIMULACIÓN	55
10.	CONCLUSIONES	63
ANEXOS		65
1.	CÁLCULOS	65
1.1.	CÁLCULO DE ERRORES	65
2.	DESARROLLO EN MATLAB	67
2.1.	ARCHIVOS DE CARGA	67
2.2.	ARCHIVOS DE ANÁLISIS	69
2.3.	ARCHIVOS DE CÁLCULO PARA SIMULACIÓN	71
3.	CARACTERÍSTICAS DE EQUIPOS	73
3.1.	LÁSER	73
3.2.	MEDIDOR DE POTENCIA	74

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES Y TABLAS

ILUSTRACIONES

FIG. 1: REPRESENTACIÓN DE NANOPARTÍCULAS AGREGADAS.....	12
FIG. 2: FRACCIÓN VOLUMÉTRICA VS EFICIENCIA, PARTÍCULAS ESFÉRICAS DE GRAFITO DE 30 NM	13
FIG. 3: EFICIENCIA DEL COLECTOR EN FUNCIÓN DEL DIÁMETRO DE LAS NANOPARTÍCULAS DE PLATA	14
FIG. 4: TRANSMITANCIA VS LONGITUD DE ONDA EN EL EXPERIMENTO DE L. MERCATELLI [8]	14
FIG. 5: PROPIEDADES FOTOTÉRMICAS DEL CARBÓN SEGÚN EL EXPERIMENTO DE D. HAN ET AL. [9].....	15
FIG. 6: EXPERIMENTO DE Q. HE ET AL. PARA DETERMINAR PROPIEDADES FOTOTÉRMICAS.....	15
FIG. 7: GRÁFICA DE RESULTADOS TEMPERATURA VS TIEMPO DEL EXPERIMENTO DE Q. HE ET AL.....	16
FIG. 8: ESQUEMA INCIDENCIA/TRANSMISIÓN Y ELEMENTOS QUE PARTICIPAN EN EL EXPERIMENTO	21
FIG. 9 ELEMENTOS DE LA INSTALACIÓN. A)RAIL Y CARRIERS B)MEDIDOR DE POTENCIA C) POSTES D) TERMOPILA.....	28
FIG. 10: CUBETA DE CUARZO AISLADA TÉRMICAMENTE CON LANA DE ROCA.....	28
FIG. 11: INSTALACIÓN EN EL MOMENTO DE MEDIDA.....	29
FIG. 12: ESQUEMA DE LA INSTALACIÓN.	30
FIG. 13: LÁSER Y FUENTE DE ALIMENTACIÓN	30
FIG. 14: ESPECTRO ULTRAVIOLETA-VISIBLE DE UNA SUSPENSIÓN COLOIDAL DE NANOPARTÍCULAS DE ORO (SIGMA ALDRICH).....	31
FIG. 15: ESPECTRO DE LA RADIACIÓN SOLAR POR ENCIMA DE LA ATMÓSFERA Y A NIVEL DEL MAR.....	31
FIG. 16: ESPECTRO DE ABSORCIÓN DEL AGUA PURA EN EL RANGO VISIBLE. (ROBIN M. POPE AND EDWARD S. FRY. 1997).....	32
FIG. 17: SOLUCIONES DE ORO CON DISTINTOS TAMAÑOS DE NANOPARTÍCULAS (SIGMA ALDRICH)	35
FIG. 18: SOLUCIONES DE NANOPARTÍCULAS DE ORO SINTETIZADAS EN LABORATORIO CON TAMAÑO DE A)10 NM, B)50 NM, C) 100 NM	36
FIG. 19: TRATAMIENTO DE ULTRASONIDOS	38
FIG. 20: EVOLUCIÓN DE LA TEMPERATURA EN FASE DE CALENTAMIENTO PARA EL EXPERIMENTO O_1_1_1	43
FIG. 21: EVOLUCIÓN DE LA TEMPERATURA EN FASE DE ENFRIAMIENTO PARA EL EXPERIMENTO O_1_1_1.....	44
FIG. 22: GRÁFICA DE RESULTADOS: RENDIMIENTO VS TAMAÑO (POT 1.75 W).....	46
FIG. 23: GRÁFICA DE RESULTADOS: RENDIMIENTO VS TAMAÑO (POT 2 W).....	46
FIG. 24: GRÁFICA DE RESULTADOS: RENDIMIENTO VS TAMAÑO (POT 2.55 W).....	47
FIG. 25: GRÁFICA DE RESULTADOS: RENDIMIENTO VS TAMAÑO (DO 0.48)	47
FIG. 26: GRÁFICA DE RESULTADOS: RENDIMIENTO VS TAMAÑO (DO 0.7)	48
FIG. 27: GRÁFICA DE RESULTADOS: RENDIMIENTO VS TAMAÑO (DO 0.94)	48
FIG. 28: GRÁFICA DE RESULTADOS: RENDIMIENTO VS POTENCIA (10 NM).....	49
FIG. 29: GRÁFICA DE RESULTADOS: RENDIMIENTO VS POTENCIA (50 NM).....	49
FIG. 30: GRÁFICA DE RESULTADOS: RENDIMIENTO VS POTENCIA (100 NM).....	50
FIG. 31: GRÁFICA DE RESULTADOS: RENDIMIENTO VS POTENCIA (DO 0.48)	50
FIG. 32: GRÁFICA DE RESULTADOS: RENDIMIENTO VS POTENCIA (DO 0.7)	51
FIG. 33: GRÁFICA DE RESULTADOS: RENDIMIENTO VS POTENCIA (DO 0.94)	51
FIG. 34: GRÁFICA DE RESULTADOS: RENDIMIENTO VS DO (POTENCIA 1.75 W)	52
FIG. 35: GRÁFICA DE RESULTADOS: RENDIMIENTO VS DO (POTENCIA 2 W)	52
FIG. 36: GRÁFICA DE RESULTADOS: RENDIMIENTO VS DO (POTENCIA 2.55 W)	53
FIG. 37: GRÁFICA DE RESULTADOS: RENDIMIENTO VS DO (10 NM).....	53
FIG. 38: GRÁFICA DE RESULTADOS: RENDIMIENTO VS DO (50 NM).....	54

FIG. 39: GRÁFICA DE RESULTADOS: RENDIMIENTO VS DO (100 NM).....	54
FIG. 40: GRÁFICA SIMULACIÓN Q VS R_{NP}	56
FIG. 41: CAÍDA DE INTENSIDAD EN RADIACIÓN / DIVISIONES PARA EL CÁLCULO DE SIMULACIÓN	57

TABLAS

TABLA 1: TIPOS DE COLECTORES SOLARES.....	11
TABLA 2: NOMENCLATURA DE LOS EXPERIMENTOS	33
TABLA 3: MATRIZ DE ENSAYOS PARA EL ORO	34
TABLA 4: MATRIZ DE ENSAYOS PARA EL CARBÓN BLACK	35
TABLA 5: VALORES PARA VARIABLES EN LOS EXPERIMENTOS. A) ORO. B) CARBÓN BLACK.....	38
TABLA 6: RESULTADOS NUMÉRICOS CON NANOPARTÍCULAS DE ORO.....	45
TABLA 7: RESULTADOS NUMÉRICOS CON NANOPARTÍCULAS DE CARBÓN BLACK	45
TABLA 8: RELACIÓN TAMAÑO FABRIC. /TAMAÑO REAL/Q GENERADA	56
TABLA 9: RESULTADOS SIMULACIÓN	58
TABLA 10: RELACIÓN DE GRÁFICAS ER MEDIDA/SIMULACIÓN VS VARIABLE	61
TABLA 11: ESPECIFICACIONES DEL LÁSER Y DE SU ALIMENTACIÓN	73
TABLA 12: ESPECIFICACIONES DEL MEDIDOR DE POTENCIA.....	74

1. OBJETO Y CAMPO DE APLICACIÓN

1.1. Objetivo

El principal objetivo de esta investigación es caracterizar el comportamiento de nanofluidos solares con aplicación a absorbedores volumétricos frente a la radiación solar en aspectos de absorción de dicha radiación aumentando su rendimiento.

Para ello se trabajará con nanofluidos basados en agua generados a partir de distintos tipos de nanopartículas (oro y carbón black) y tamaño. Los parámetros a variar en los experimentos serán la concentración de nanopartículas, el diámetro de éstas y la intensidad incidente.

Algunos de los objetivos más concretos son:

- Incrementar el conocimiento de cómo se comportan algunos nanofluidos con respecto a la absorción de radiación solar y transformación en energía térmica.
- Facilitar una guía que ayude a seleccionar el nanofluido óptimo dadas unas condiciones de trabajo predefinidas.
- Determinar la máxima eficiencia esperable de un nanofluido dependiendo de variables como las nanopartículas utilizadas, fluido base, intensidad de radiación, tamaño de partículas...

1.2. Metodología

En la elaboración del Proyecto se ha seguido una metodología basada en el desarrollo de las diferentes fases que se relacionan a continuación:

Fase 1: Análisis de estudios recientes relacionados con las aplicaciones de nanofluidos en procesos de conversión de radiación solar en energía térmica.

Fase 2: Definición de las condiciones en las que serán realizados los ensayos. En esta fase se delimitarán el rango de tamaños, densidades ópticas y potencias del láser que se estudiarán.

Fase 3: Montaje de la instalación para realizar las medidas.

Fase 4: Realización de los ensayos, inicialmente con agua para obtener datos del error producido al incidir el láser directamente en el sensor de temperatura y posteriormente con las nanopartículas de oro y carbón black.

Fase 5: Procesado de los resultados y valoración de los mismos

Alcance

2. ALCANCE

Mientras la cantidad de los recursos de combustibles fósiles es limitada, el crecimiento de la población mundial y los niveles de vida han intensificado el consumo mundial de electricidad. Durante las últimas décadas la tasa de consumo de combustibles fósiles por los seres humanos es mucho más rápida de lo que son reemplazados por procesos geológicos. Esto indica que la producción anual de recursos fósiles llegará a alcanzar un pico inevitable. El futuro de la demanda mundial de energía aumentará por encima del nivel del menguante “banco geológico” del petróleo, gas y carbón puede cubrir, con lo que conducirá a mayor aumento en el precio de la energía y los productos relacionados. Además, la contaminación del aire debido a la quema de combustibles fósiles ha sido siempre un problema para los gobiernos, inversionistas, ambientalistas e investigadores.

Todas estas preocupaciones evidencian la necesidad de utilizar fuentes de energía renovables, especialmente la energía solar, ya que el sol es una fuente inagotable de energía que de una u otra forma el ser humano lleva aprovechando desde hace siglos. Ya en los últimos años, la energía solar ha sido explorada a través de aplicaciones de energía solar térmica y generación de energía fotovoltaica, y ambas formas han sido consideradas ampliamente tanto por los gobiernos y las empresas como por usuarios particulares.

En los colectores solares térmicos convencionales se utiliza una capa de material selectivo en sus placas o tubos para aumentar la capacidad de absorción de la energía solar. Sin embargo este tipo de colector presenta unas pérdidas relativamente altas. La mejora de la conversión de la radiación solar entrante a energía térmica a altas temperaturas es esencial para mejorar la eficacia global de conversión de energía.

Con el fin de superar estas limitaciones han sido desarrollados los colectores de absorción directa. En este tipo de colectores, conocidos como colectores volumétricos, la energía solar se absorbe y transporta directamente por el fluido de trabajo. Pero las propiedades del agua pura no son apropiadas para ser utilizada en la absorción directa, mientras que la adición de nanopartículas posibilita la absorción de la radiación incidente al pasar a través del fluido.

Existe una amplia variedad de nanopartículas que pueden ser utilizadas para la absorción directa de radiación solar en base a sus características ópticas y a sus posibles aplicaciones. Por lo tanto, a fin de diseñar correctamente un colector solar basado en nanofluidos, en primer lugar es importante comprender las propiedades radiactivas de los fluidos con nanopartículas.

De esta forma, esta investigación se centrará en realizar un análisis de estas propiedades radiativas de varios de los nanofluidos disponibles en el mercado que permitirá esclarecer su uso en colectores de absorción directa variando sus características y condiciones de contorno. Con esto se pretende aportar conocimientos necesarios para aumentar la eficiencia en el proceso de conversión de energía solar a energía que el ser humano sea capaz de utilizar y favorecer el desarrollo de los sistemas de obtención de energías renovables.

En resumen, los colectores solares son ampliamente usados en la actualidad, debido principalmente al cambio de paradigma energético que el mundo está viviendo. Esto motiva a estudiar nuevos modos de incrementar y mejorar las eficiencias de estos dispositivos y se deja expuesta la importancia de utilizar un recurso tan abundante y limpio como es la radiación solar, sumado con las ventajas térmicas de las nanopartículas (mayor estabilidad y superficie de contacto entre otras) para mejorar el desempeño térmico de estos dispositivos.

Antecedentes

3. ANTECEDENTES

Lo primero a lo que se debe hacer mención (a pesar de que posteriormente se profundizará) es a la definición de nanofluido solar. Un nanofluido solar es un fluido base en el que se dispersan nanopartículas que serán las encargadas de absorber la radiación solar. Partiendo de esta idea, los antecedentes a los estudios realizados hoy en día y por lo tanto a este proyecto serán los que siguen a continuación:

“Básicamente todas las formas de energía conocida en el mundo tienen su origen en la solar. Aceite, carbón, gas natural, y la madera se produjeron originalmente por procesos fotosintéticos, seguido de reacciones químicas complejas en las que la vegetación en descomposición fue sometida a muy altas temperaturas y presiones durante un largo período de tiempo. Incluso la energía del viento y la marea tiene un origen solar, ya que son provocadas por las diferencias de temperatura en las diversas regiones de la tierra.” [S. A. Kalogirou, 2014]

El sol es una fuente de energía natural, no contaminante e inagotable que el ser humano lleva utilizando desde la prehistoria y sin el cual no sería posible la vida en la Tierra. Se usó para secar la ropa, obtener sal por evaporación de agua salada, calentar la comida... y con el tiempo se fue conociendo más sobre su interior, sus procesos de obtención de energía y cuánta de esa energía llegaba a nuestro planeta, lo cual era un punto importante a la hora de sacarle un mayor beneficio.

Hoy en día se sabe que el sol es un reactor de fusión continua en la que el hidrógeno se convierte en helio. Este enorme reactor irradia es 3.8×10^{20} MW de energía en todas direcciones, lo que equivale al 63 MW/m² en toda la superficie solar. A nuestro planeta únicamente llega una pequeña fracción de esta energía, $1,7 \times 10^{14}$ kW. “...incluso con esta pequeña parte, se estima que 84 min de la radiación solar que incide sobre la Tierra es igual a la demanda mundial de energía por un año.” [S. A. Kalogirou, 2014]

Pero para poder beneficiarnos de esta fuente de energía que está al alcance de todos es importante, además de conocerla, saber cuál es la mejor y más eficiente manera de hacerlo. [N. Singh et al. 2000]

El uso de la radiación solar para obtener energía solar térmica fue el primero de sus usos llevado a cabo por el ser humano. Con el paso de los años, esta tecnología se ha ido diversificando y se han llevado a cabo estudios para mejorar su implantación y su eficiencia. Uno de los principales objetivos para aumentar esa eficiencia es el desarrollo de un elemento fundamental de estos sistemas: El colector. Los colectores solares son un tipo particular de intercambiadores de calor que transforman la energía de la radiación solar en energía interna del medio de transporte. Actualmente existen en el mercado una gran variedad de tipos de colectores solares dependiendo del ratio de concentración, del rango de temperaturas de trabajo, del tipo de geometría utilizada [S. A. Kalogirou, 2014]. El más común hasta hoy es aquel que utiliza una superficie de color negro como absorbedor de la radiación solar entrante y que posteriormente transfiere el calor a un fluido que circula por el interior de unos tubos y que lo transporta donde es requerido. En este caso la eficacia está limitada doblemente: por un lado por la eficiencia de la captura de la energía solar por parte

del material absorbedor y por otro por el grado de eficacia con el que se transfiere el calor al fluido de trabajo.

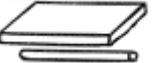
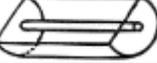
MOVIMIENTO	TIPO	ABSORBEDOR	RATIO CONCENTRACIÓN	RANGO DE TEMP. (°C)	DIAGRAMA ESQUEMÁTICO
Estacionario	Colector plano	Plano	1	30-80	
	Colector de tubo de vacío	Tubular	1	50-200	
	Concentrados parabólico compuesto	Tubular	1-5	60-240	
Seguimiento con un solo eje	Concentrados parabólico compuesto	Tubular	5-15	60-300	
	Reflector de Fresnel	Tubular	10-40	60-250	
	Reflector cilíndrico	Tubular	15-50	60-300	
	Reflector parabólico	Tubular	10-85	60-400	
Seguimiento con un solo eje	Reflector de plato parabólico	Puntuales	100-1000	100-1500	
	Reflector de plato esférico	Puntuales	100-300	100-1000	
	Reflector de plato heliostático	Puntuales	100-1500	150-2000	

Tabla 1: Tipos de colectores solares

Un enfoque que se ha propuesto para mejorar la eficiencia de los colectores al tiempo que simplifica el sistema es la de absorber directamente la energía solar en el volumen de líquido, cuyo sistema ha recibido el nombre de colector solar de absorción directa (DASC) (T. Otanicar et al. 2010). Sin embargo los fluidos base utilizados para transferir el calor (agua o aceite térmico normalmente) presentan un coeficiente de absorción insuficiente que da como consecuencia una pérdida importante de eficiencia. Una manera de superar esta barrera es utilizando partículas sólidas ultrafinas en suspensión en los fluidos comunes para mejorar su conductividad térmica. La suspensión de partículas de tamaño nano (1-100 nm) en un fluido base convencional se denomina nanofluido. (O. Mahian et al. 2013)

Antecedentes

Numerosos estudios teóricos y experimentales sobre la conductividad térmica efectiva de suspensiones que contienen partículas sólidas se han realizado desde que Maxwell presentó su base teórica para predecir la conductividad efectiva de suspensiones hace más de 100 años. Todos los estudios que se realizaron fueron en escalas milimétricas o micrométricas lo que tuvo dos grandes problemas:

- Las partículas se suspendían rápidamente en los fluidos
- Las conductividades térmicas no presentaban un aumento significativo.

Por estas razones esta tecnología no se podía aplicar ya que podrían obstruir los pequeños canales de los aparatos.

La tecnología moderna ha permitido la producción de nanopartículas metálicas o no metálicas con tamaños promedio menores a 100 nm, las propiedades mecánicas, ópticas, eléctricas, magnéticas y térmicas de estas nanopartículas son superiores a aquellos materiales con estructuras de granos gruesos.

Los nanofluidos son una nueva clase de fluidos para procesos de transferencia de calor basados en nanotecnología, formados a partir de dispersar partículas nanométricas con tamaños típicos entre 1 y 100 nm en fluidos tradicionales.

Si se compara un nanofluido con un fluido convencional de transferencia de calor se observan las siguientes ventajas del nanofluido (Saidur et al., 2011):

- Alta área específica y por lo tanto mayor superficie para la transferencia de calor entre partículas y fluidos.
- Alta estabilidad en la dispersión con un predominante movimiento Browniano de las partículas.
- Se reduce la obstrucción por partículas pudiendo así trabajar con equipos y sistemas más pequeños.
- Se pueden ajustar las propiedades como la conductividad térmica y la humectabilidad de la superficie variando las concentraciones de las partículas.

Una de las principales limitaciones que tiene un nanofluido es la variación de sus propiedades dependiendo del grado de agregación de sus partículas. Por ello, R. Prasher et al. en 2006 llevaron a cabo un estudio a cerca de estas variaciones y de su dependencia con el pH, el tamaño de la partícula y la temperatura de trabajo. Así, se concluyó que la conductividad térmica dependía de la agregación de las nanopartículas y que esta, a su vez, dependía de los fenómenos antes mencionados.

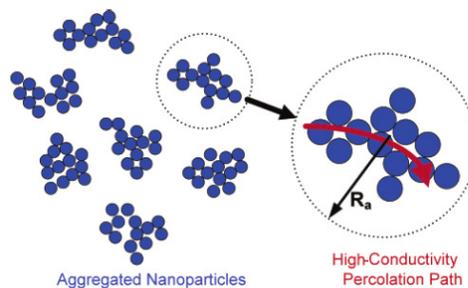


Fig. 1: Representación de nanopartículas agregadas.

Para controlar el fenómeno de la agregación es importante a la hora de sintetizar el nanofluido con el que posteriormente se trabajará hacerlo con un método adecuado. Sin una preparación cuidadosa, las nanopartículas se aglomeran y sedimentan en el fluido base en un tiempo muy corto. Aunque hay muchos métodos de preparación de nanofluidos estos se pueden clasificar a grandes rasgos en los procesos de "dos etapas" y de "una etapa". Procesos de una etapa sintetizan el nanofluido a la fracción de volumen deseado y el tamaño de las partículas en el interior del fluido base. Por lo tanto, el producto final es un nanofluido específico que está listo para el uso (posiblemente después de la dilución). El método de dos etapas se lleva a cabo mediante la síntesis de las nanopartículas secas primero a un tamaño y forma preferida. En el segundo paso, estas partículas son cuidadosamente mezcladas en el fluido de base deseada en la fracción de volumen deseada, por lo general con algunos aditivos para la estabilidad. (R. Taylor et al. 2011)

T. Otanicar et. al. en 2010 trabajaron con Grafito esférico, nanotubos de carbono y plata esférica de distintas dimensiones obteniendo grandes beneficios con respecto al fluido base que, en su caso, era agua. Detectaron disminución de pérdidas, posibilidad de sintetizar un fluido adecuado según necesidades y aumento de la conductividad térmica. La adición de pequeñas cantidades de nanopartículas se tradujo en una mejora rápida en la eficiencia hasta una fracción de volumen de absorción directa de aproximadamente 0,5%. Para nanopartículas de grafito de 30 nm se obtuvo una mejora de 3%. Para partículas de plata de 20 nm una mejora de la eficiencia de 5%, mientras que sólo una pequeña diferencia del 1% entre la CNT y las esferas de grafito. Después de una fracción de volumen de 0,5%, la eficacia comienza a estabilizarse e incluso disminuir ligeramente con el aumento de la fracción de volumen.

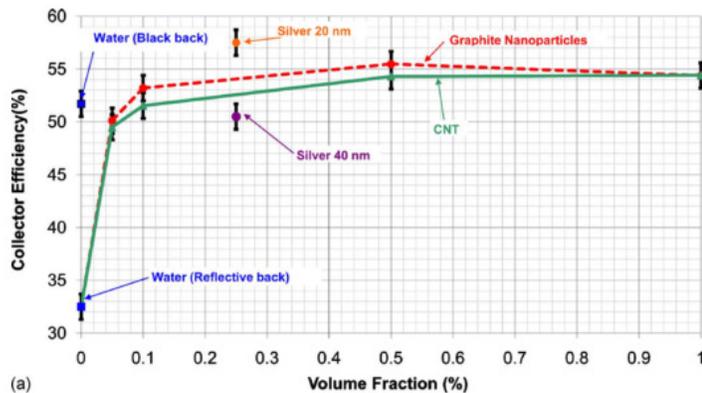


Fig. 2: Fracción volumétrica vs eficiencia, partículas esféricas de grafito de 30 nm

Antecedentes

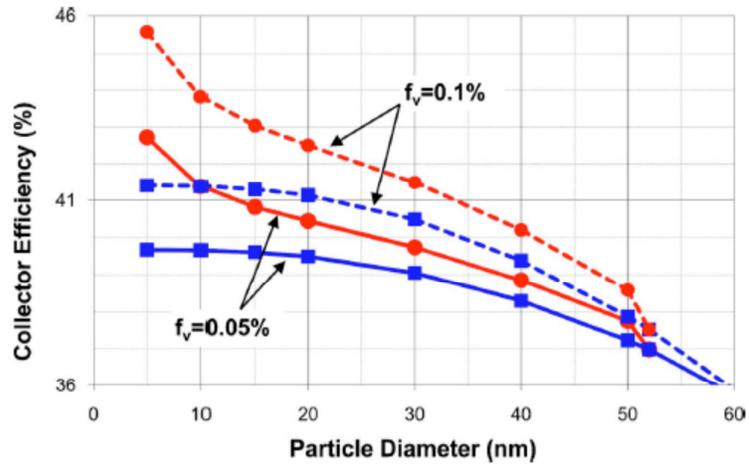


Fig. 3: Eficiencia del colector en función del diámetro de las nanopartículas de plata (Experimento de T. Otanicar et al.)

La influencia de la forma de las partículas se puede observar claramente en las investigaciones que se llevaron a cabo por E. Sani et al. (2011) y por L. Mercatelli (2011). Los primeros llevaron a cabo una comparativa de propiedades ópticas y térmicas entre los SWCNHs (nanocuernos de carbono de pared simple) y las suspensiones de partículas de carbono en glicol detectando que los SWCNHs muestran características espectrales significativamente más favorables con respecto al carbono amorfo investigado, combinados con una mayor estabilidad de suspensión en el tiempo y una menor tendencia del SWCNH que el carbono esférico a aglomerarse. Los segundos también estudiaron los nanocuernos de carbono, en este caso la estabilidad térmica y la absorción espectral en base acuosa y de glicol, además de los coeficientes de absorción y difusión. Se obtiene como resultado que sólo una pequeña cantidad de radiación (~ 5%) es dispersada por las partículas SWCNH y el resto es absorbida. Esto, combinado con una elevada absorción en las longitudes de onda de la luz solar, lo hace un material muy atractivo como absorbentes directos en colectores solares.

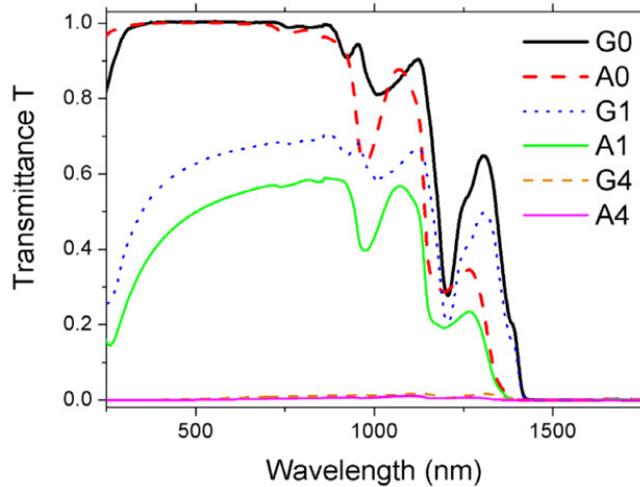


Fig. 4: Transmitancia vs longitud de onda en el experimento de L. Mercatelli [8]

D. Han et al. estudiaron en 2011 las propiedades del carbón-black en base acuosa. Una de sus análisis fue respecto a las temperaturas del nanofluido con carbón-black y agua pura como una función del tiempo de irradiación solar. Se observó que las temperaturas de los nanofluidos aumentan más rápidamente que la del agua pura. Por ejemplo, en 42 minutos, la temperatura del nanofluido con 6,6% vol. aumenta de 24,4 °C a 38,4 °C, mientras que la del agua pura sólo aumenta a 31,2 °C.

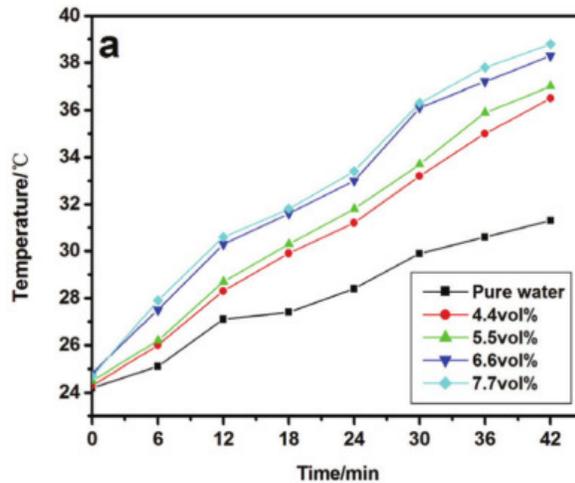


Fig. 5: Propiedades fototérmicas del carbón según el experimento de D. Han et al. [9]

Un análisis similar pero en este caso con partículas de cobre en base acuosa fue llevado a cabo por Q. He et al. en 2013. Las principales ideas que se obtuvieron del experimento fototérmico fueron que la temperatura más alta del nanofluido de Cu-H₂O (0,1%) se incrementa hasta el 25,3% en comparación con agua desionizada. La capacidad de conversión fototérmica de nanofluidos se mejora constantemente con la fracción de masa de nanopartículas (mientras la concentración no supera el 0,1%). Pero cuando la nanopartícula sigue aumentando, las propiedades fototérmicas vuelven a decrecer y la temperatura de nanofluidos (0,2 %) es menor que la de nanofluidos (0,1%).

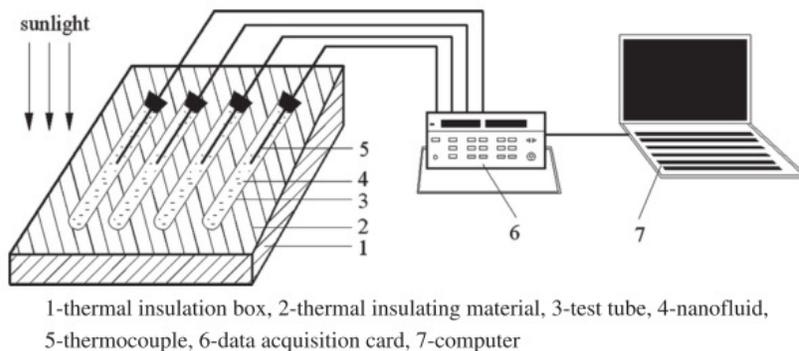


Fig. 6: Experimento de Q. He et al. para determinar propiedades fototérmicas

Antecedentes

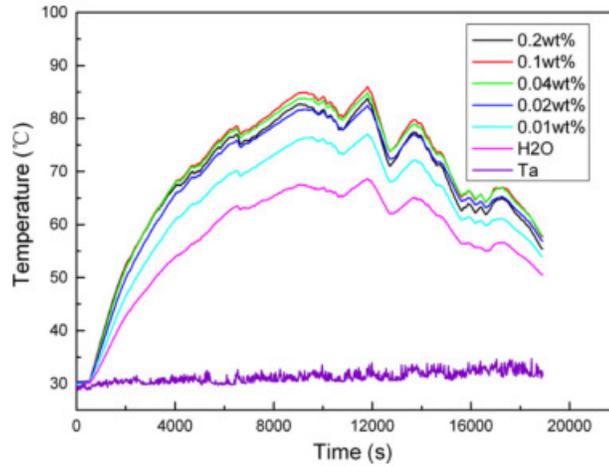


Fig. 7: Gráfica de resultados temperatura vs tiempo del experimento de Q. He et al

Algunos de estos experimentos tienen como finalidad la obtención de un modelo numérico que simplifique el trabajo con estos nuevos materiales, como es el caso del trabajo realizado por A. Lenert y E. Wang en 2012 para obtener un modelo numérico unidimensional de nanofluido con nanopartículas de carbono que examina el efecto de la concentración solar, tamaño de nanopartícula y espesor óptico en la distribución de la temperatura en el interior del receptor.

4. NORMAS Y REFERENCIAS

4.1. Normativa

- *EN ISO 10801:2010 Nanotecnologías. Generación de nanopartículas metálicas para ensayos de toxicidad por inhalación utilizando el método de evaporación/condensación (ISO 10801:2010) (Ratificada por AENOR en febrero de 2011.)*
- *UNE EN 60584-1 y EN 60584-2 sobre Termopares*
- *UNE-ISO/TR 12885:2010 IN. Nanotecnologías. Prácticas de seguridad y salud en lugares de trabajo relacionados con las nanotecnologías*
- *EN ISO 10801:2010. Nanotecnologías. Generación de nanopartículas metálicas para ensayos de toxicidad por inhalación utilizando el método de evaporación/condensación (ISO 10801:2010) (Ratificada por AENOR en febrero de 2011.)*
- *EN 61040:1992. detectores de medida de energía y de potencia, instrumentos y equipos para la radiación láser (Ratificada por AENOR en diciembre de 1995.)*
- *UNE-EN 207:2010/AC:2012. Equipo de protección individual de los ojos. Filtros y protectores de los ojos contra la radiación láser (gafas de protección láser).*
- *UNE-EN ISO 11151-1:2001. Láseres y equipos asociados a los láseres. Componentes ópticos normalizados. Parte 1: Componentes para los intervalos espectrales UV, visible e infrarrojo próximo. (ISO 11151-1:2000).*
- *UNE 157001: Criterios generales para la elaboración de proyectos*
- *UNE EN 60584-1 y EN 60584-2 sobre Termopares*

Normas y referencias

4.2. Bibliografía

- S. A. Kalogirou . Solar Energy Engineering 2014. Elsevier Ltd.
- N. Singh, S.C. Kaushik, R.D. Misra. Exergetic analysis of a solar thermal power system. Renewable Energy. 2000. 19 (1-2): 135-143.
- T. Otanicar, P. Phelan, R. Prasher, G. Rosengarten, R. Taylor. Nanofluid-based direct absorption solar collector. Journal of Renewable and Sustainable Energy. 2010; 2(3): 033102_1 – 033102_13.
- M. Chieruzzi, G. Cerritelli, A. Miliozzi, J. M. Kenny. Effect of nanoparticles on heat capacity of nanofluids based on molten salts as PCM for thermal energy storage. Nanoscale Research Letters 2013; 8:448.
- O. Mahian, A. Kianifar, S. Kalogirou, I. Pop, S. Wongwises. A review of the applications of nanofluids in solar energy. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2013. 57 (2): 582-594.
- R. Prasher, P.E. Phelan, P. Bhattacharya. Effect of aggregation kinetics on the thermal conductivity of nanoscale colloidal solutions (nanofluid). Nano letters. 2006. 6 (7): 29-34
- R. Taylor, P. Phelan, T. Otanicar, R. Adrian, R. Prasher. Nanofluid optical property characterization: towards efficient direct absorption solar collectors. Nanoscale research letters. 2011. 6 (1): 225
- E. Sani, L. Mercatelli, S. Barison, C. Pagura, F. Agresti, L. Colla, P. Sansoni. Potential of carbon nanohorn-based suspensions for solar thermal collectors. Solar Energy Materials and Solar Cells. 2011. 95 (11): 2994-3000
- L. Mercatelli, E. Sani, G. Zaccanti, F. Martelli, P. Di Ninni, S. Barison, C. Pagura, F. Agresti, D. Jafrancesco. Absorption and scattering properties of carbon nanohorn-based nanofluids for direct sunlight absorbers. Nanoscale research letters. 2011. 6 (282): 1-9
- D. Han, Z. Meng, D. Wu et al. Thermal properties of carbon black aqueous nanofluids for solar absorption. Nanoscale research letters. 2011. 6 (457): 1-7
- Q. He, S. Wang, S. Zeng, Z. Zheng. Experimental investigation on photothermal properties of nanofluids for direct absorption solar thermal energy systems. Energy Conversion and Management. 2013. 73: 150-157
- A. Lenert, E. Wang. Optimization of nanofluid volumetric receivers for solar thermal energy conversion. Solar Energy. 2012. 86 (1): 253-265
- Saidur, R., Leong, K., & Mohammad, H. (2011). A review on applications and challenges of nanofluids. Renewable and Sustainable Energy Reviews (15), 1646-1668.
- Peuser, F., Remmers, K.-H., & Schnauss, M. (2002). Solar thermal systems: successful planning and construction. Berlin, Germany: Solarpraxis.
- Robin M. Pope and Edward S. Fry. Absorption spectrum (380–700 nm) of pure water. II. Integrating cavity measurements. Applied Optics, Vol. 36, Issue 33, pp. 8710-8723 (1997)

A. O. Govorov and H. H. Richardson, *nanotoday* 2 (2007) 30.

A. O. Govorov, W. Zhang, T. Skeini, H. Richardson, J. Lee and N.A. Kotov *Nanoscale Res. Lett.* 1 (2006) 84.

Edward D. Palik (Ed.) *Handbook of Optical Constants of Solids* Academic Press Inc. 1985.

P. B. Johnson and R. W. Christy, *Phys. Rev. B* 6 (1972) 4370

4.3. Programas de cálculo

A continuación se detallarán los programas utilizados durante el diseño de la instalación:

AUTOCAD 2010

Distribuidor: *Autodesk*

ANSYS 14.5

Distribuidor: *Swanson Analysis Systems, Inc*

Módulos utilizados: *ANSYS Mechanical, ANSYS Workbench platform*

MICROSOFT OFFICE 2007

Distribuidor: *Microsoft*

Módulos utilizados: *Excel, Word*

STATGRAPHICS CENTURION XVI.II

Distribuidor: *StatPoint Technologies*

MATLAB 7.12.0.635

Distribuidor: *Mathworks*

Normas y referencias

5. SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS

5.1. . Abreviaturas

SWNHCS : nanocuernos de carbono de pared simple

W: Potencia (Wattios)

W_{laser} : Potencia tras atravesar el agua (medida con termopila)

W_{medida} : Potencia calculada con datos del termopar.

W_{abs} : Potencia absorbida por el nanofluido

W_{perd} : Potencia pérdidas

W_{R} : Potencia reflejada

W_{T} : Potencia transmitida

m: masa (gr)

cp: Calor específico (J/gr °C)

T: Temperatura (°C)

T_{a} : Temperatura ambiente

T_{o} : Temperatura inicial

t: Tiempo (s)

L : longitud (mm)

a: coeficiente de absorción (m^{-1})

DO: densidad óptica

n: índice de refracción

5.2. . Símbolos griegos

P: densidad (kg/m^3)

β : Coeficiente de pérdidas (W/ °C)

η : rendimiento

\emptyset : fracción de volumen

λ : longitud de onda (nm)

6. ANÁLISIS TEÓRICO

El principal objetivo de este proyecto es, como ya se ha comentado, analizar el comportamiento de algunos nanofluidos a la radiación. Esto se traduce en el estudio de su rendimiento durante este proceso, es decir, cuánta de la energía radiada en forma de láser es absorbida por el nanofluido y convertida en calor. De este modo:

$$\eta = \frac{W_{abs}}{W_{laser}} \quad (1)$$

Donde la W_{laser} hace referencia a la potencia medida directamente con la termopila y el medidor de potencia cuando en la cubeta únicamente hay agua, es decir, antes de introducir las nanopartículas. A la hora de realizar esta medida se debe tener en cuenta la reflexión y refracción del medio que el láser tiene que atravesar.

Siempre que un rayo incide sobre una superficie de separación entre dos materiales que tienen distinto índice de refracción, la distribución de potencia entre componente reflejada y la transmitida está dada por las ecuaciones de Fresnel.

En el sistema a estudiar el láser atraviesa, como se muestra en la Fig. 9, la cubeta de cuarzo con el nanofluido en su interior. Así, se debe tener en cuenta el índice de refracción del aire, de la cubeta y del nanofluido.

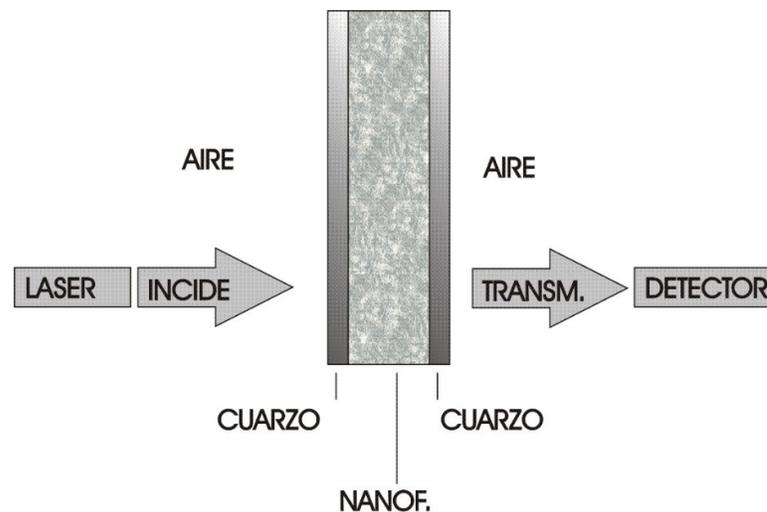


Fig. 8: Esquema incidencia/transmisión y elementos que participan en el experimento

Las ecuaciones de Fresnel en incidencia normal (ángulo de incidencia 0° como el caso de estudio) toman la siguiente forma:

$$W_R = \left(\frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right)^2 \quad (2)$$

Análisis teórico

$$W_T = \frac{4n_2n_1}{(n_2+n_1)^2} \text{ ó } \left[1 - \left(\frac{n_2-n_1}{n_2+n_1} \right)^2 \right] \quad (3)$$

Donde n_1 y n_2 son los índices de refracción a cada lado de la interfase. Las ecuaciones anteriores suman 1 suponiendo que la absorción del material es despreciable. La potencia reflejada en una superficie (W_R) y la potencia transmitida (W_T) están dadas por

$$W_{reflejada} = W_{incidente} \times W_R \quad (4)$$

$$W_{transmitida} = W_{incidente} \times W_T \quad (5)$$

Donde el símbolo \emptyset representa potencia (vatios).

Partiendo de los índices de refracción de los materiales a estudiar:

$$n_{aire} = 1.0003$$

$$n_{cuarzo} = 1.544$$

$$n_{agua} = 1.333$$

Y aplicando la ecuación de Fresnel para la potencia transmitida se debe calcular el coeficiente de transmisión cuando la cubeta contiene agua y cuando está vacía. Estos coeficientes son:

$$T_{vacía} = 1 - \left[4 \times \left(\frac{n_{aire}-n_{cuarzo}}{n_{aire}+n_{cuarzo}} \right)^2 \right] = 0.82 \quad (6)$$

$$T_{agua} = 1 - \left[2 \times \left(\frac{n_{aire}-n_{cuarzo}}{n_{aire}+n_{cuarzo}} \right)^2 \right] - \left[2 \times \left(\frac{n_{agua}-n_{cuarzo}}{n_{agua}+n_{cuarzo}} \right)^2 \right] = 0.9 \quad (7)$$

Los coeficientes de transmisión nos indican que cuando la cubeta está vacía un 82% de la potencia del láser llega a la termopila y es medida mientras que, si la cubeta contiene agua, es un 90% de la potencia la que atraviesa el conjunto y es transmitida. De este modo, y para el cálculo de la eficiencia de absorción de potencia en el conjunto “cubeta+nanofluido”, se tomará como W_{laser} directamente con la termopila, y por lo tanto como la que suministra el láser, aquella que nos da el conjunto “cubeta+agua”. De este modo se asegura que la potencia absorbida en presencia de nanopartículas en el fluido de estudio se debe únicamente a éstas.

Para abordar la segunda variable necesaria en el cálculo del rendimiento a estudio, la W_{abs} , se lleva a cabo el desarrollo de un archivo con el programa matlab que realizará el cálculo de forma automática. Sin embargo, antes de estudiar este archivo

detenidamente para comprender cómo se ha elaborado, han de aclararse algunos puntos.

A la hora de medir la potencia que absorben las nanopartículas se debe partir de la ecuación:

$$W_{medida} = W_{abs} - W_{perd} \quad (8)$$

Es decir, en el experimento se pretende obtener esta potencia a partir de la evolución de la temperatura del nanofluido al incidir en él la radiación pero, a pesar de estar la cubeta aislada térmicamente, se es consciente de que existirán pérdidas al ambiente. Como estas pérdidas son las mismas en el proceso de calentamiento del nanofluido y en el de enfriamiento, se medirán ambos procesos para poder obtener de este último cuáles son las pérdidas a introducir en la anterior ecuación y así poder obtener la W_{abs} real. En el proceso de enfriamiento, a diferencia que en el de calentamiento, no existe W_{abs} y por lo tanto la ecuación de estudio será:

$$W_{medida} = -W_{perd} \quad (9)$$

Además, se deben tomar las medidas en “blanco”, es decir, aquel aumento de temperatura que se produce cuándo el fluido es agua pura y que es debido únicamente al calentamiento del termopar (esto se razonará más adelante en el punto 7.1) que, a pesar de estar recubierto con papel de aluminio y la poca absorción del agua, no está exento de éste al incidir directamente en él el láser. Este calentamiento llevaría a error en las medidas y por eso es necesario medirlo y tenerlo en cuenta a la hora de analizar los resultados obtenidos.

Es momento en este punto de realizar el desarrollo matemático por el cual se obtiene la ecuación del desarrollo de la temperatura en función del tiempo al incidir el láser en la cubeta. Para ello se lleva a cabo el balance de potencias involucradas en el ensayo. Se deben tener en cuenta la potencia que suministra el láser, medida directamente con la termopila; la potencia que queda en el nanofluido una vez el láser lo atraviesa almacenada en las nanopartículas; y finalmente se debe estudiar también las pérdidas que existen entre la cubeta y el ambiente a pesar del aislamiento.

- En el enfriamiento:

$$W_{medida} = -W_{perd} \quad (10)$$

$$W_{medida} = m c_p \frac{dT}{dt} \quad (11)$$

$$W_{perd} = \beta (T - T_a) \quad (12)$$

$$m c_p \frac{dT}{dt} = -\beta (T - T_a) \quad (13)$$

$$\frac{dT}{(T-T_a)} = \frac{-\beta}{m c_p} dt \quad (14)$$

Análisis teórico

Integrando se obtiene:

$$\ln(T - T_a) + \ln k_1 = \frac{-\beta t}{m c_p} + k_2 \quad (15)$$

$$k_1(T - T_a) = e^{-\frac{\beta t}{m c_p} + k_2} \quad (16)$$

Y para determinar el valor de k_1 y k_2 se aplican las condiciones de contorno:

$$CC \begin{cases} t = t_0 \rightarrow \Delta T = \Delta T_0 \\ t = \infty \rightarrow \Delta T = 0 \end{cases}$$

Y se obtiene:

$$(T - T_a) = \Delta T_0 e^{-\frac{\beta}{m c_p}(t-t_0)} \quad (17)$$

$$T = T_a + (T_0 - T_a) e^{-\frac{\beta}{m c_p}(t-t_0)} \quad (18)$$

Enlazando este desarrollo teórico con el ajuste a una curva exponencial realizado con el programa matlab se tiene:

$$T = T_a + (T_0 - T_a) e^{-\frac{\beta}{m c_p}(t-t_0)} = p1+p2*(exp(-p3*(x-x(1)))) \quad (19)$$

Y teniendo en cuenta que:

Donde:

- T es la evolución de la temperatura del nanofluido durante el experimento, medida con el termopar en cada uno de los ensayos.
- Ta es la temperatura ambiente.
- To es la temperatura inicial del fluido antes de comenzar la prueba, primer valor del vector de medidas del nanofluido.
- m es la masa de nanofluido que se analiza en cada experimento, la cual será medida en una báscula de precisión.
- cp es el calor específico del nanofluido. La fórmula para calcular el calor específico de cada una de las muestras sería (M. Chieruzzi; 2013):

$$C_{p,nf} = \frac{\rho_{np} \phi_{np} C_{p,np} + \rho_f \phi_f C_{p,f}}{\rho_{np} \phi_{np} + \rho_f \phi_f} \quad (20)$$

Donde Cp es el calor específico, ϕ es la fracción de volumen, ρ es la densidad, y los subíndices np, nf, y f se refieren a las nanopartículas, el nanofluido y el fluido base, respectivamente. Sin embargo, en el caso de estudio se ha considerado que dado que la fracción de volumen es tan pequeña comparada con la del fluido base se

tomará el calor específico del nanofluido como el mismo que el del fluido base, es decir, el agua. Así:

$$C_p = 4.18 \text{ (J/gr K)}$$

- β es la constante de pérdidas generalizadas que se deberá obtener de la ecuación de la evolución de la temperatura con el tiempo en el proceso de enfriamiento para poder utilizarla en la fórmula del proceso de calentamiento. De este modo se dispondrá de los datos necesarios para despejar de la ecuación de calentamiento la W_{abs} por las nanopartículas en cada uno de los ensayos.
- $t_0=0$ s

Se obtiene:

$$T_a = p1 \tag{21}$$

$$\beta = p3 * m * c_p \tag{22}$$

• En el calentamiento:

$$W_{medida} = W_{abs} - W_{perd} \tag{23}$$

$$W_{medida} = m c_p \frac{dT}{dt} \tag{24}$$

$$W_{perd} = \beta (T - T_a) \tag{25}$$

$$m c_p \frac{dT}{dt} = W_{abs} - \beta (T - T_a) \tag{26}$$

$$\frac{dT}{W_{abs} - \beta (T - T_a)} = \frac{dt}{m c_p} \tag{27}$$

$$\int \frac{dT}{W_{abs} - \beta (T - T_a)} = \int \frac{dt}{m c_p} \tag{28}$$

$$\frac{1}{\beta} \int \frac{\beta dT}{\beta T - (W_{abs} + \beta T_a)} = - \int \frac{dt}{m c_p} \tag{29}$$

$$\frac{1}{\beta} \ln(\beta T - (W_{abs} + \beta T_a)) + \ln C1 = - \frac{t}{m c_p} + C2 \tag{30}$$

$$\ln((\beta T - W_{abs} - \beta T_a)C1) = - \frac{\beta t}{m c_p} + C2 \tag{31}$$

$$(\beta T - W_{abs} - \beta T_a)C1 = e^{-\frac{\beta t}{m c_p} + C2} \tag{32}$$

$$T = \frac{W_{abs} + \beta T_a + C1 e^{-\frac{\beta t}{m c_p} + C2}}{\beta} \tag{33}$$

Análisis teórico

$$T = \frac{W_{abs}}{\beta} + T_a + C1 e^{-\frac{\beta t}{m c_p} + C2} \quad (34)$$

$$T = \frac{W_{abs}}{\beta} + T_a + C1 e^{C2} e^{-\frac{\beta t}{m c_p}} \quad (35)$$

$$T = \frac{W_{abs}}{\beta} + T_a + k e^{-\frac{\beta t}{m c_p}} \quad (36)$$

CC: $t = 0 \rightarrow T = T_0$

Se determina la constante k:

$$k = (T_0 - T_a) - \frac{W_{abs}}{\beta} \quad (37)$$

$$T = \left[\frac{W_{abs}}{\beta} + T_a \right] + \left[T_0 - T_a - \frac{W_{abs}}{\beta} \right] e^{-\frac{\beta t}{m c_p}} \quad (38)$$

Enlazando este desarrollo teórico con el ajuste a una curva exponencial realizado con el programa matlab se tiene:

$$T = \left[\frac{W_{abs}}{\beta} + T_a \right] + \left[T_0 - T_a - \frac{W_{abs}}{\beta} \right] e^{-\frac{\beta t}{m c_p}} = p1 + p2 * (1 - \exp(-p3 * x)) \quad (39)$$

Ajustando las ecuaciones:

$$T = \left[\frac{W_{abs}}{\beta} + T_a \right] - \left[-T_0 + T_a + \frac{W_{abs}}{\beta} \right] e^{-\frac{\beta t}{m c_p}} = p1 + p2 - p2 * \exp(-p3 * x) \quad (40)$$

$$p1 + p2 = \frac{W_{abs}}{\beta} + T_a \quad (41)$$

$$p2 = -T_0 + T_a + \frac{W_{abs}}{\beta} \quad (42)$$

Y operando se obtiene:

$$p1 = \left[\frac{W_{abs}}{\beta} + T_a \right] - \left[-T_0 + T_a + \frac{W_{abs}}{\beta} \right] = T_0 \quad (43)$$

$$W_{abs} = (p1 + p2 - T_a) * \beta \quad (44)$$

(Siendo que T_a y β se obtenían del proceso de enfriamiento)

$$T = \left[\frac{W_{abs}}{\beta} + T_a \right] + \left[T_0 - T_a - \frac{W_{abs}}{\beta} \right] e^{-\frac{\beta t}{m c_p}} \quad (45)$$

Siendo de esta forma capaces ya de despejar todas las variables.

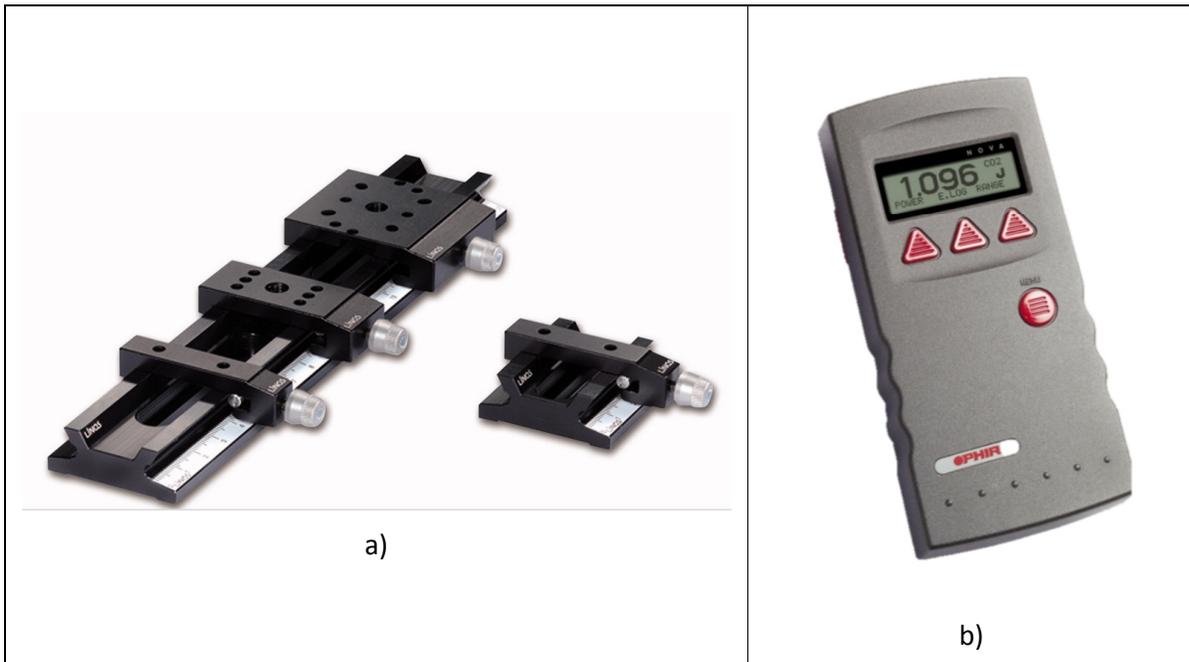
7. SISTEMA EXPERIMENTAL

7.1. Esquema y montaje de la instalación

El montaje necesario para llevar a cabo las medidas es ubicado en las instalaciones de la Universitat Jaume I, en el edificio TC del campus Riu Sec, laboratorio TC2103 situado en la primera planta.

Para poder realizar los ensayos es necesario llevar a cabo el montaje de una instalación de óptica física apropiada que constará de:

- ⇒ laser + fuente de alimentación
- ⇒ cubeta cuarzo
- ⇒ lente colimación
- ⇒ termopar
- ⇒ poste para sujeción de termopar
- ⇒ Sensor de potencia (termopila)
- ⇒ medidor de potencia
- ⇒ rail de montaje con carriers
- ⇒ Postes para ensamblajes y soportes
- ⇒ Bases magnéticas
- ⇒ diafragma
- ⇒ lana de roca
- ⇒ sujeción para la cubeta



Sistema experimental

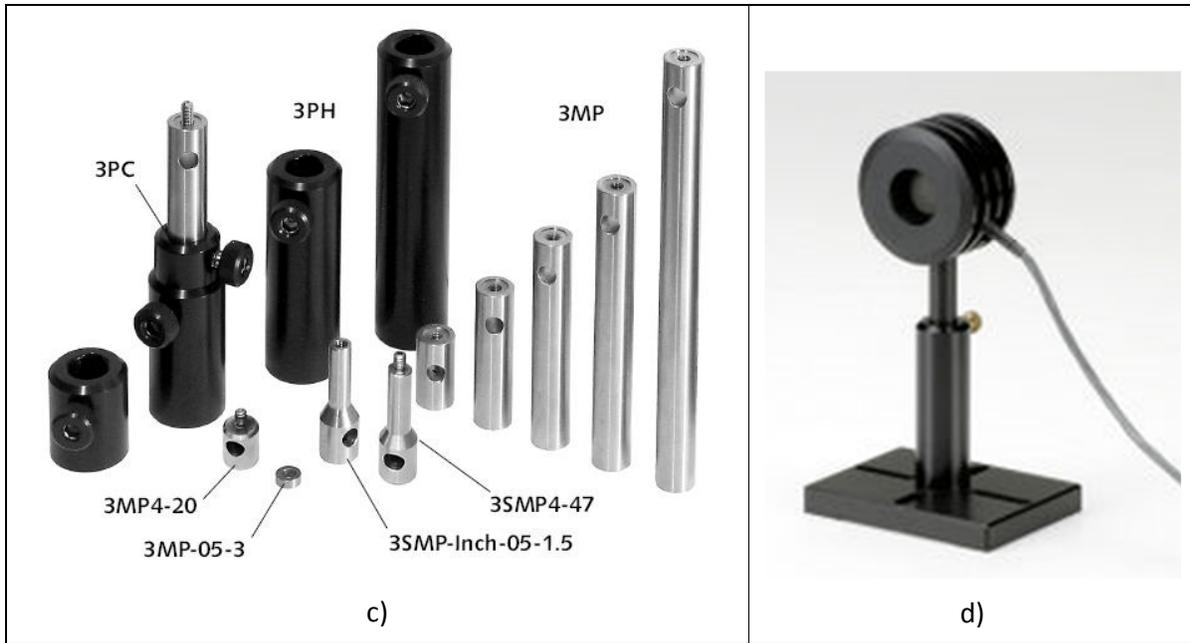


Fig. 9 Elementos de la instalación. a) rail y carriers b) medidor de potencia c) postes d) Termopila

La cubeta de cuarzo donde se introduce el nanofluido para realizar las medidas debe estar aislada en la medida de lo posible. Para ello se utiliza lana de roca y cinta adhesiva cubriendo todas y cada una de las partes de la cubeta a excepción de la zona donde incide el láser y un pequeño orificio en la parte superior donde se introducirá el termopar para realizar las medidas de la evolución de la temperatura. Este aislamiento se aprecia en la figura 10.



Fig. 10: cubeta de cuarzo aislada térmicamente con lana de roca

En la figura 12 se pueden observar la lente de colimación y el diafragma que le otorgan al rayo láser la dirección, tamaño y posición adecuada a la hora de incidir en la cubeta. También se observa el elemento de sujeción de la cubeta además de, por supuesto, la incidencia del rayo láser en ésta en el preciso instante de medida. El termopar, introducido en el orificio libre del aislamiento de la cubeta, está recubierto por papel de aluminio para evitar, en la medida de lo posible, su calentamiento por radiación, favoreciendo la reflexión de la radiación.

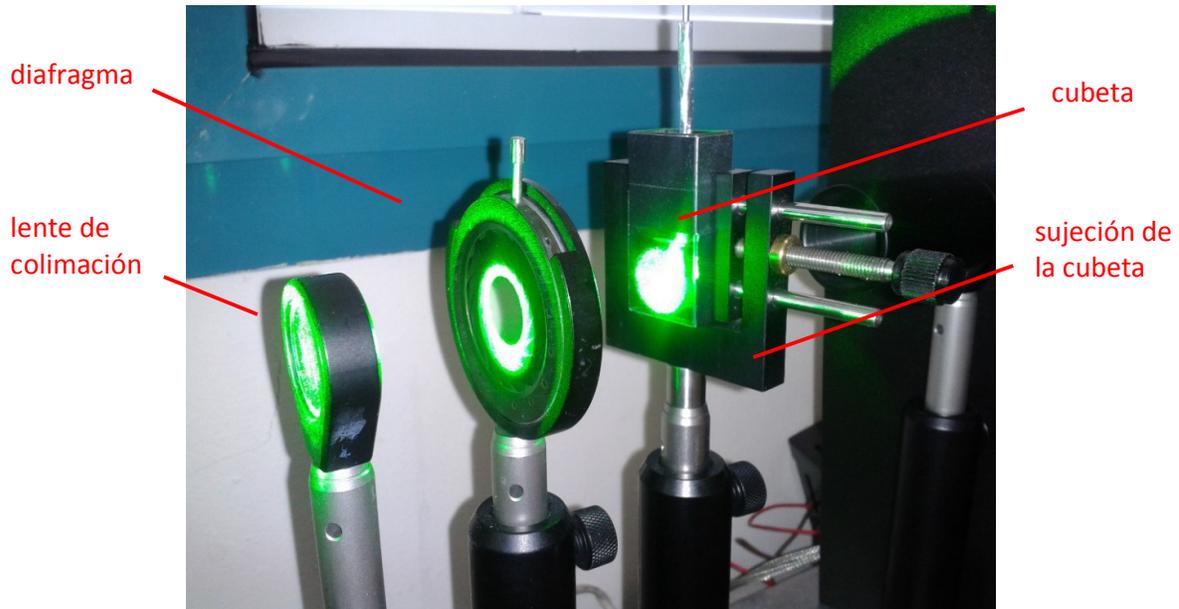


Fig. 11: Instalación en el momento de medida.

En la ilustración 13 se encuentra un esquema general de la instalación de medida donde se pueden observar cada uno de los elementos y su disposición concreta dentro del conjunto.

Sistema experimental

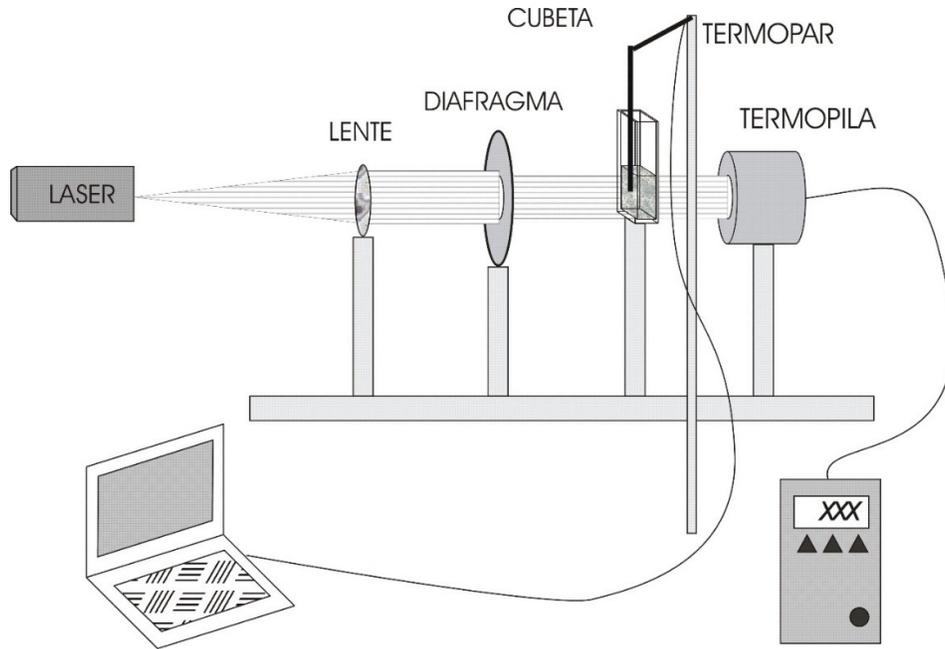


Fig. 12: Esquema de la instalación.

Uno de los elementos más importantes es, sin duda, el láser. Se trata de un láser compacto de 532 nm de λ (color verde) y una potencia máxima de 3 vatios.

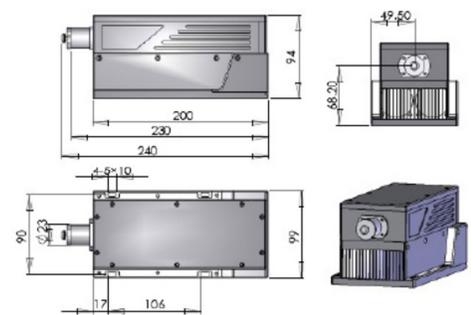
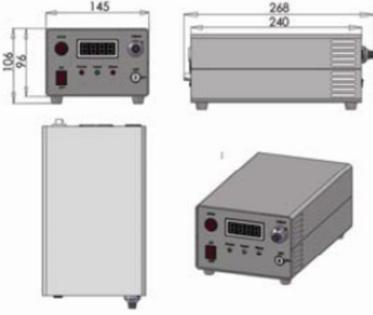
MGL-N-532	PSU-H-LED
 <p data-bbox="435 1369 714 1396">240(L)×99(W)×94(H) mm³, 2.6 kg</p>	 <p data-bbox="925 1369 1234 1396">268 (L)×145(W)×106 (H) mm³, 2.6 kg</p>
	

Fig. 13: láser y fuente de alimentación

El motivo por el cual se eligió fue:

En primer lugar debido al fenómeno de resonancia de plasmones superficiales que se da en los metales y, en concreto en el caso de estudio, en el oro.

En la Ilustración 15 se puede observar como el máximo punto de absorción para las nanopartículas de oro, la LSPR, está localizada alrededor de la longitud de onda de 520 nm (para 10 nm de tamaño de partícula) y 570 nm (para 100 nm de tamaño de partícula). Estos valores son para una DO de 1cm^{-1} , valor máximo que se maneja en las muestras de la investigación actual, con lo cual se tomará la longitud de onda del láser intermedia. En la figura 15 se observa el punto de longitud de onda de 532 nm, la cual pertenece al láser seleccionado.

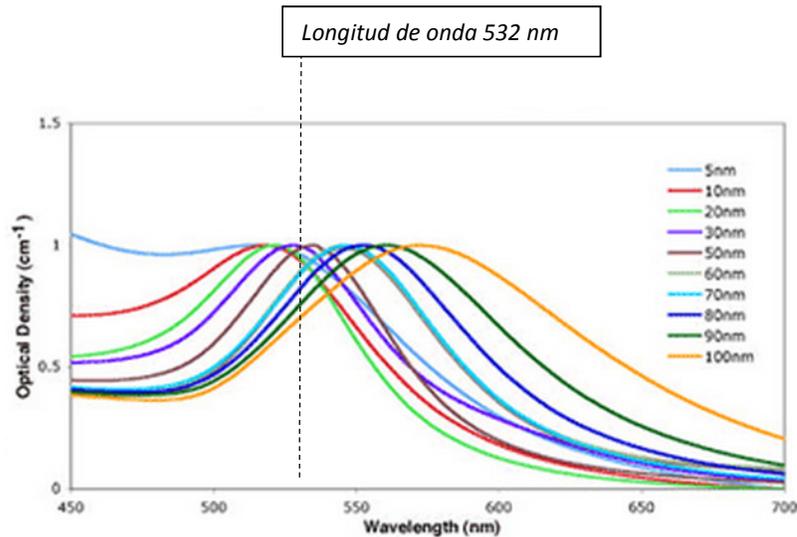


Fig. 14: Espectro ultravioleta-visible de una suspensión coloidal de nanopartículas de oro (SIGMA ALDRICH).

Además del fenómeno de los plasmones superficiales hay que tener en cuenta que el espectro visible (de 380 a 780 nm de longitud de onda) supone alrededor de un 47% de la energía total que llega a la Tierra desde el sol y el mayor nivel de radiación solar se encuentra dentro de él, aproximadamente en 500 nm.

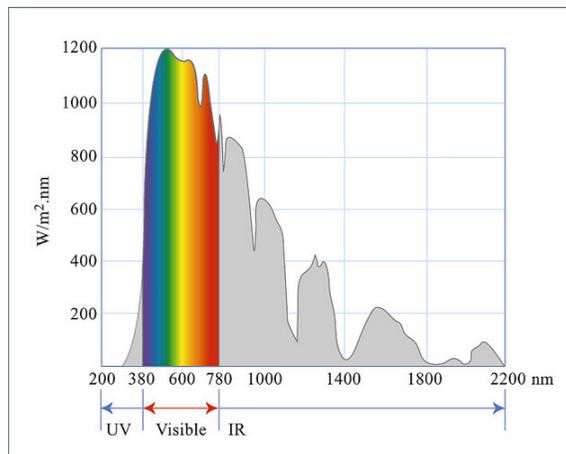


Fig. 15: Espectro de la radiación solar por encima de la atmósfera y a nivel del mar.

Sistema experimental

A todo esto hay que añadirle que la luz es absorbida de forma selectiva cuando pasa a través de un determinado medio, y en el caso del agua las ondas de mayor longitud son las primeras en desaparecer. En la ilustración 14 se observa claramente cómo, dentro del espectro visible, las longitudes de onda con mayor absorción en el caso del agua pura se dan a partir de los 600 nm, correspondientes a los colores naranja y rojos. Sin embargo, para longitudes de onda menores a 600 la absorción del agua decrece rápidamente dándose el menor valor de 0.00442 m^{-1} a 417.15 nm (Robin M. Pope and Edward S. Fry. 1997).

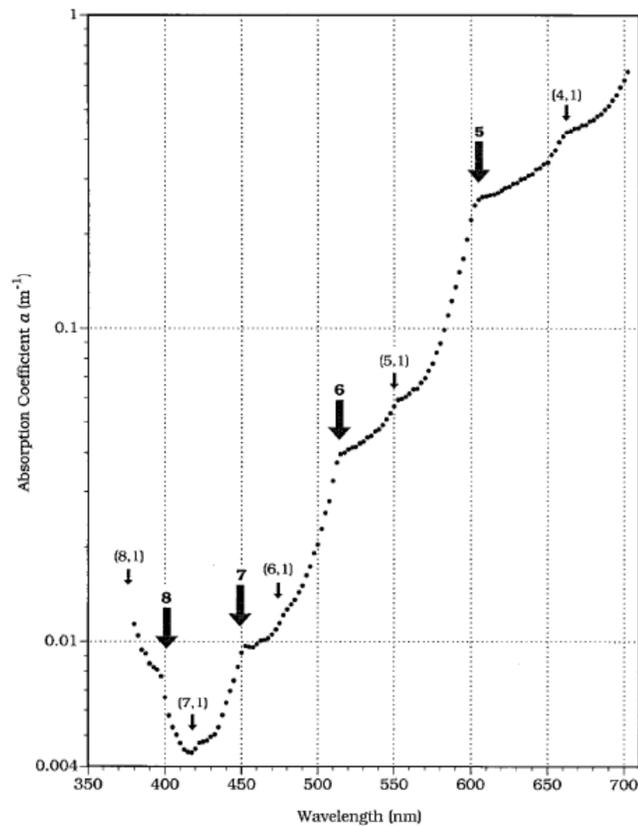


Fig. 16: Espectro de absorción del agua pura en el rango visible. (Robin M. Pope and Edward S. Fry. 1997)

Finalmente, combinando estos fenómenos, se optó por adquirir un láser óptico de 532 nm de longitud de onda, que corresponde a un color verde. El agua pura, a esta longitud de onda, sólo tiene un coeficiente de absorción de 0.044 m^{-1} , que se puede considerar despreciable comparado con el de 727.5 nm de longitud de onda, el cual es de 1.678 m^{-1} . De este modo nos aseguramos de que la absorción de la potencia del láser que incide sobre la cubeta cuando ésta contenga nanofluido será llevada a cabo por las partículas dispersas en él y no por el fluido base.

Además se trata de un valor comprendido entre las longitudes de onda a las que se da el fenómeno de resonancia del plasmón superficial (520nm-570nm).

7.2. Preparación de muestras y ensayos

Las nanopartículas usadas en los nanofluidos se hacen de varios materiales, como óxidos (Al_2O_3 , CuO), nitruros (AlN , SiN), carburos (SiC , TiC), metales (Cu , Ag , Au), semiconductores (TiO_2 , SiC), nanotubos de carbón y materiales compuestos como aleaciones de partículas $\text{Al}_{70}\text{Cu}_{30}$. Existen otros materiales y estructuras completamente nuevos, como son los materiales que están “dopados” con moléculas en su interface sólido-líquido. Para preparar los nanofluidos se ha usado agua destilada como fluidos base y Oro y Carbon black como nanopartículas.

A la hora de realizar los ensayos el primer paso es crear la matriz de ensayos combinando todas las variables a estudiar. Estas variables son:

- ⇒ Tipo de partícula
 - Oro
 - Carbón Black
- ⇒ Tamaño de la partícula
 - Para el oro
 - 1 → 10 nm
 - 2 → 50 nm
 - 3 → 100 nm
 - Para el carbón black
 - 125 nm
- ⇒ Densidad óptica: a determinar tras realizar las muestras, diluyendo una muestra inicial de DO 1. En un primer momento quedará únicamente indicado por los valores:
 - 1
 - 2
 - 3
- ⇒ Potencia del láser: a determinar en el momento de los ensayos. Deberán realizarse unos primeros ensayos para comprobar la intensidad real del láser. En un primer momento quedará únicamente indicado por los valores:
 - 1
 - 2
 - 3

Con el fin de establecer las distintas muestras y trabajar de un modo más organizado se les da la siguiente nomenclatura:

NOMENCLATURA		
O_1_	1_	1
nanopartícula y tamaño		
	DO	
		Potencia

Tabla 2: Nomenclatura de los experimentos

Sistema experimental

Para obtener la matriz de ensayos se utiliza el programa Statgraphics que da como resultado para el caso del Oro (con la nomenclatura actualizada):

Nº Ensayo	Nombre	Tamaño	DO	Potencia
1	O_1_1_1	1	1	1
2	O_1_1_2	1	1	2
3	O_1_1_3	1	1	3
4	O_1_2_1	1	2	1
5	O_1_2_2	1	2	2
6	O_1_2_3	1	2	3
7	O_1_3_1	1	3	1
8	O_1_3_2	1	3	2
9	O_1_3_3	1	3	3
10	O_2_1_1	2	1	1
11	O_2_1_2	2	1	2
12	O_2_1_3	2	1	3
13	O_2_2_1	2	2	1
14	O_2_2_2	2	2	2
15	O_2_2_3	2	2	3
16	O_2_3_1	2	3	1
17	O_2_3_2	2	3	2
18	O_2_3_3	2	3	3
19	O_3_1_1	3	1	1
20	O_3_1_2	3	1	2
21	O_3_1_3	3	1	3
22	O_3_2_1	3	2	1
23	O_3_2_2	3	2	2
24	O_3_2_3	3	2	3
25	O_3_3_1	3	3	1
26	O_3_3_2	3	3	2
27	O_3_3_3	3	3	3

Tabla 3: Matriz de ensayos para el oro

Un total de 27 experimentos con 9 muestras distintas.

La siguiente matriz de ensayos es para el Carbón Black:

Nº Ensayo	Nombre	Tamaño	DO	Potencia
1	C_1_1_1	1	1	1
2	C_1_1_2	1	1	2
3	C_1_1_3	1	1	3
4	C_1_2_1	1	2	1
5	C_1_2_2	1	2	2
6	C_1_2_3	1	2	3
7	C_1_3_1	1	3	1
8	C_1_3_2	1	3	2
9	C_1_3_3	1	3	3

Tabla 4: Matriz de ensayos para el carbón black

Un total de 9 experimentos con 3 muestras distintas

El siguiente paso consiste en sintetizar las muestras que serán analizadas en los ensayos.

La preparación de nanofluidos es un paso clave en estudios con nanofluidos, estos fluidos no son mezclas simples líquido-sólido por lo que se debe procurar algunas características especiales como son: suspensión estable y que dure con el tiempo, la aglomeración de partículas tiene que ser despreciable y que no haya ningún cambio químico en el fluido.

En el caso del oro se parte de los tres tamaños de nanopartícula con una DO de 1 estabilizada en una solución de citrato.



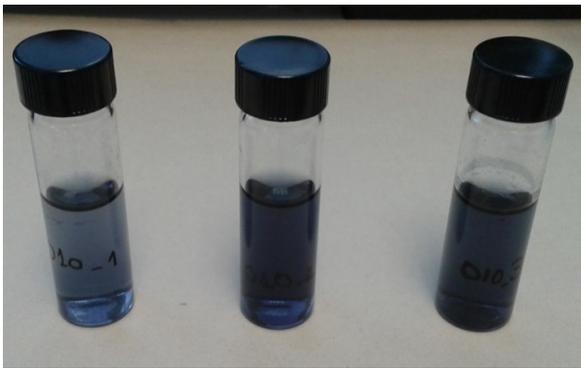
Fig. 17: Soluciones de oro con distintos tamaños de nanopartículas (Sigma Aldrich)

El proceso es el siguiente:

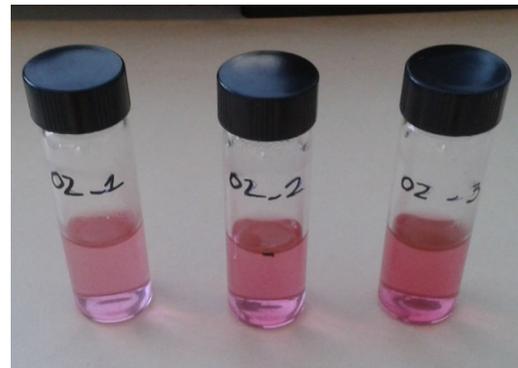
- A estas soluciones se les añade agua destilada para reducir su Densidad Óptica. Partiendo de las muestras de DO 1 se preparan otras dos muestras más de 6 cm³ cada una:
 - La primera será de $\frac{3}{4}$ partes de disolución de DO 1 y $\frac{1}{4}$ parte de agua destilada
 - La segunda será de $\frac{1}{2}$ de disolución de DO1 y $\frac{1}{2}$ de agua destilada.

Sistema experimental

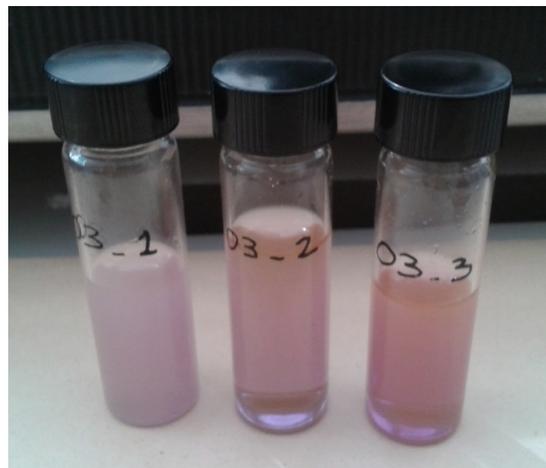
- Se somete a cada una de las muestras a un tratamiento de ultrasonidos para asegurar una adecuada dispersión y evitar la tan problemática aglomeración de las partículas.
- Se analizan en la instalación para obtener 3 medidas de DO óptimas para los ensayos.
- Este proceso se lleva a cabo con cada tamaño de nanopartícula de oro y se obtienen 3 DO distintas, las mismas para cada tamaño, un total de 9 muestras como se había indicado anteriormente.



a)



b)



c)

Fig. 18: Soluciones de nanopartículas de oro sintetizadas en laboratorio con tamaño de a)10 nm, b)50 nm, c) 100 nm

Debe aclararse en este punto el concepto y el cálculo de la densidad óptica, que es la absorción de un elemento óptico por unidad de distancia, para una longitud de onda determinada.

Numéricamente hablando se tiene que:

$$DO\lambda = \frac{1}{l} \log_{10} \left(\frac{I_0}{I} \right) \quad (46)$$

Donde

l = la distancia que la luz viaja por una muestra (i.e., el grosor de la muestra), medido en cm. En este caso $l = 1$.

I_0 = Intensidad del rayo de luz incidente (se toma cuando el fluido es únicamente agua)

I = intensidad del rayo de luz transmitido (se toma cuando el fluido es cada uno de los nanofluidos de los ensayos)

En el caso del CARBÓN BLACK:

- se parte de las nanopartículas en polvo del tamaño a analizar (125 nm) y se realiza una primera dispersión de un 1% en volumen de nanopartículas en agua destilada.
- Posteriormente se le somete al mismo tratamiento de ultrasonidos que al nanofluido de oro para asegurar la dispersión
- Se mide en la instalación la DO.
- Se va añadiendo poco a poco agua destilada hasta obtener las 3 DO con las que se trabaja en el caso del oro.

Es importante asegurar el valor de la DO y que la muestra está correctamente dispersa así que una vez sintetizadas se dejan 24 horas en reposo, se vuelven a someter al tratamiento de ultrasonidos y se realiza una última medida de las DO para comprobar que son correctas.

Sistema experimental

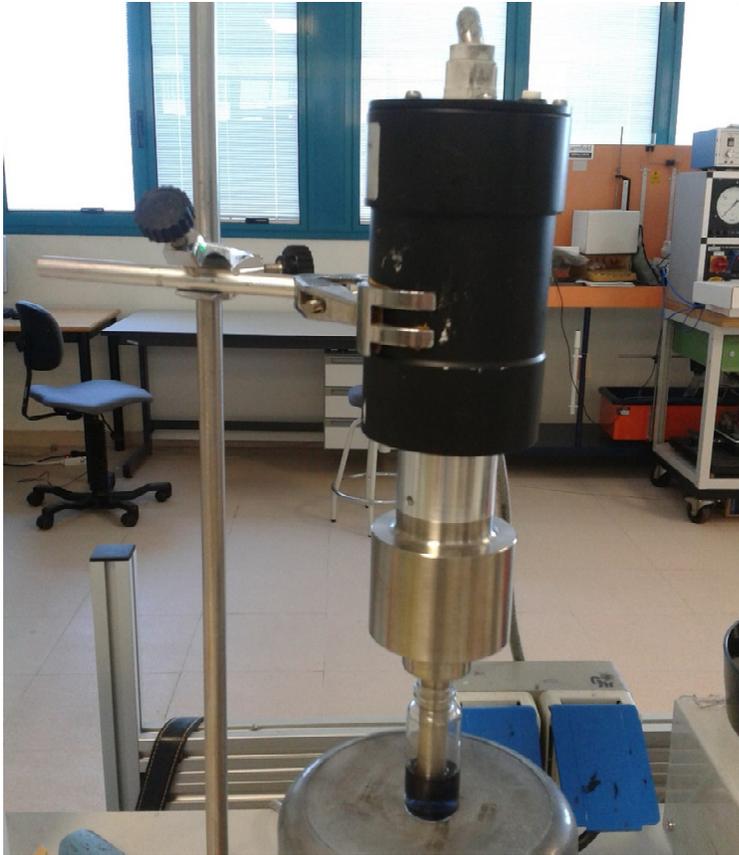


Fig. 19: Tratamiento de ultrasonidos

Finalmente y una vez sintetizadas todas las muestras de los ensayos los valores a tomar fueron:

nanopartícula	O=oro		
tamaño (nm)	1=10	2=50	3=100
DO	1=0.48	2=0.75	3=0.92
Potencia láser (W)	1=1.75	2=1.9	3=2.55

a)

nanopartícula	C=carbón black		
tamaño (nm)	1= 125		
DO	1=0.48	2=0.75	3=0.92
Potencia láser (W)	1=1.75	2=1.9	3=2.55

b)

Tabla 5: Valores para variables en los experimentos. a) oro. b) carbón black

8. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

8.1. Toma de medidas de las características fototérmicas

Las condiciones para las pruebas deben ser:

- Temperatura ambiente: la propia del laboratorio, que dadas las fechas de medida (julio 2014) se encontraba alrededor de 28°C y en todo caso siempre menor de 30º.
- Junto al banco de medida se hallaba una ventana que debía mantenerse siempre cerrada para evitar fluctuaciones y errores en la medida.
- Presión: atmosférica.
- Área de medición: círculo de 2 cm de diámetro situado en la parte más baja de la cubeta de cuarzo.
- Volumen de nanofluido utilizado para la medición: 4 cm³ (siempre confirmar masa exacta de la muestra antes de realizar la medida).
- Irradiancia: la propia de la medida a realizar.
- Las condiciones siempre serán ESTÁTICAS.

El procedimiento para llevar a cabo los ensayos una vez emplazada la instalación y sintetizadas las muestras es:

- I. Someter una vez más a la muestra de ensayo a un tratamiento ultrasónico para evitar posibles sedimentaciones (sobre todo en tamaños de partículas grandes)
- II. Pesar la muestra que va a ser medida
- III. Introducir la muestra en la cubeta de cuarzo y colocarla en su posición óptima para realizar la medida
- IV. Situar la termoresistencia en posición de medida.
- V. Obtener en el láser la potencia requerida para el ensayo en cuestión y dejar que éste se estabilice durante unos segundos antes de utilizarlo (sin que incida sobre la cubeta).
- VI. Dejar incidir el láser en el nanofluido al mismo tiempo que se inicia la toma de medida de temperaturas.
- VII. Tomar medidas del aumento de temperatura hasta el punto de estabilización de ésta.
- VIII. De forma instantánea impedir el paso del láser hasta el nanofluido sin dejar de medir.
- IX. Medir, en este caso, el descenso de temperatura del nanofluido hasta que éste se estabilice con el ambiente.
- X. Finalizar la medida y almacenar los datos con la nomenclatura adecuada.

8.2. Análisis de las medidas realizadas

Con el fin de entender el estudio de las medidas obtenidas y almacenadas se llevará a cabo un examen minucioso del programa desarrollado en matlab para analizar estas medidas de forma automática. El programa se encuentra incluido en su totalidad en la parte de ANEXOS.

Metodología experimental

En primer lugar se divide el archivo en dos partes:

- ⇒ Una primera parte, llamada “cargar_oro.m” cumple la función de:
- Indica el itinerario para encontrar los archivos a analizar
 - Genera una colección de matrices (3 matrices de 3x3) con valores 0 donde al final de la ejecución del programa se almacenarán los datos de potencia absorbida. Lo mismo sucede con el rendimiento.
 - Almacena las posibles opciones de potencia, DO y tamaño de cada experimento
 - Busca en la carpeta indicada, a través de un proceso en bucle, el archivo con el nombre de la primera opción, codificado como se expuso previamente en el punto 7.2.
 - Si no la encuentra aparece en la pantalla el texto “no se ha encontrado el archivo” y buscará la siguiente opción iterativamente.
 - Cuando encuentre un archivo con el nombre adecuado cargará a su vez el valor del archivo “blanco” correspondiente a su potencia de láser y la masa del experimento que se midió en su momento.
 - Posteriormente ejecutará la función almacenada en el archivo “análisis_oro” (en el caso de estar trabajando con las muestras de oro)
 - La función “análisis_oro” devuelve la potencia absorbida en el experimento que se está analizando y el programa la almacena en su lugar correspondiente de la matriz de ceros creada anteriormente para las potencias.
 - Con ella y la Wmedida el programa obtiene el rendimiento del experimento que se está analizando y el programa lo almacena en su lugar correspondiente de la matriz de ceros creada anteriormente para los rendimientos.
 - Se inicia de nuevo el proceso en bucle en busca de otro archivo codificado y se repiten los cálculos.
 - Cuando el bucle ha finalizado y todos los experimentos han sido analizados los resultados se muestran en forma de las matrices *Wabs* y *rend*.
- ⇒ En la segunda parte, el archivo “análisis_oro”, es una función que realiza todo el cálculo numérico necesario para obtener la *Wabs*.
- Inicialmente la función divide la medida tomada ininterrumpidamente de la evolución de la temperatura del nanofluido con el tiempo al incidir el láser en dos partes: una en la que la temperatura aumenta, que será la de calentamiento (con *n* medidas); y otra en la que la temperatura disminuye, que será la fase de enfriamiento.
 - El siguiente paso es crear un vector con los datos obtenidos en la medida del calentamiento del agua y que supone, en realidad, el error por calentamiento del termopar.

- Se crea un vector auxiliar para la medida del blanco donde los valores aumentan hasta la cantidad de valores que existen en la fase de calentamiento (única fase en la que tendremos que tener en cuenta el error del calentamiento del termopar) y una vez determinado al máximo valor de la matriz de las medidas en blanco para ese elemento (n) el resto de medidas será igual a él.
- Primero se analiza la fase de *enfriamiento* para poder obtener el valor de β y sustituirlo en la fase de calentamiento. Se representa en un principio los valores medidos en el nanofluido por el termopar.
- Posteriormente y observando la forma de la gráfica anterior se ajusta con el programa una ecuación exponencial de pendiente negativa de la forma:

$$'p1+p2*(exp (-p3*(x-x (1))))' \quad (47)$$

y se representa gráficamente junto a la figura anterior

- Se iguala el análisis teórico con la ecuación exponencial del punto anterior (Punto 6, ecuación 19) y se despeja el valor de β (Punto 6, ecuación 22)
- En la fase de *calentamiento* se lleva a cabo un procedimiento similar aunque primero se representa gráficamente los valores originales obtenidos en la medición del nanofluido y después los valores una vez restado el valor del vector “blanco”.
- Del mismo modo que se hizo en la fase del enfriamiento ahora se observa la forma de la gráfica y se ajusta con el matlab una ecuación exponencial de pendiente positiva de la forma:

$$'p1+p2*(1-exp (-p3*x))' \quad (48)$$

y también se representa gráficamente junto a la gráfica anterior.

- Se iguala nuevamente el análisis teórico realizado con la ecuación exponencial (Punto 6, ecuación 39) y finalmente se obtiene el valor de Wabs (Punto 6, ecuación 44):

De esta forma ya es posible hacer el cálculo de Wabs pues los valores de β y de T_a pueden obtenerse de la fase de enfriamiento.

A modo de ejemplo se realizará numéricamente el análisis de una de las medidas realizadas en el laboratorio: la O_1_1_1, es decir, nanofluido con partículas de Oro de 10 nm de diámetro, una DO de 0.48 y medida con una potencia de láser de 1.75 W.

Metodología experimental

El resultado de realizar el análisis únicamente a esta medida es:

Si se ha encontrado el archivo O_1_1_1. Línea de masa 1

ENFRIAMIENTO

resenf =

General model:

$$\text{resenf}(x) = p1 + p2 * (\exp(-p3 * (x - x(1))))$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 28.77 \quad (28.75, 28.8)$$

$$p2 = 29.08 \quad (29.05, 29.11)$$

$$p3 = 0.001484 \quad (0.001479, 0.001489)$$

errenf =

sse: 79.4436

rsquare: 0.9993

dfe: 2167

adjrsquare: 0.9993

rmse: 0.1915

Ta =

28.7742

T0 =

60.1000

beta =

0.0256

CALENTAMIENTO

resultado =

General model:

$$\text{resultado}(x) = p1 + p2 * (1 - \exp(-p3 * x))$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 29.61 \quad (29.59, 29.63)$$

$$p2 = 39.04 \quad (38.97, 39.12)$$

$$p3 = 0.001677 \quad (0.00167, 0.001684)$$

errores =

sse: 5.0222

rsquare: 0.9999

dfe: 793

adjrsquare: 0.9999

rmse: 0.0796

T0 =
29.6095
Wabs =
1.0217
Rend =
0.5838

Y las gráficas obtenidas con el matlab son:

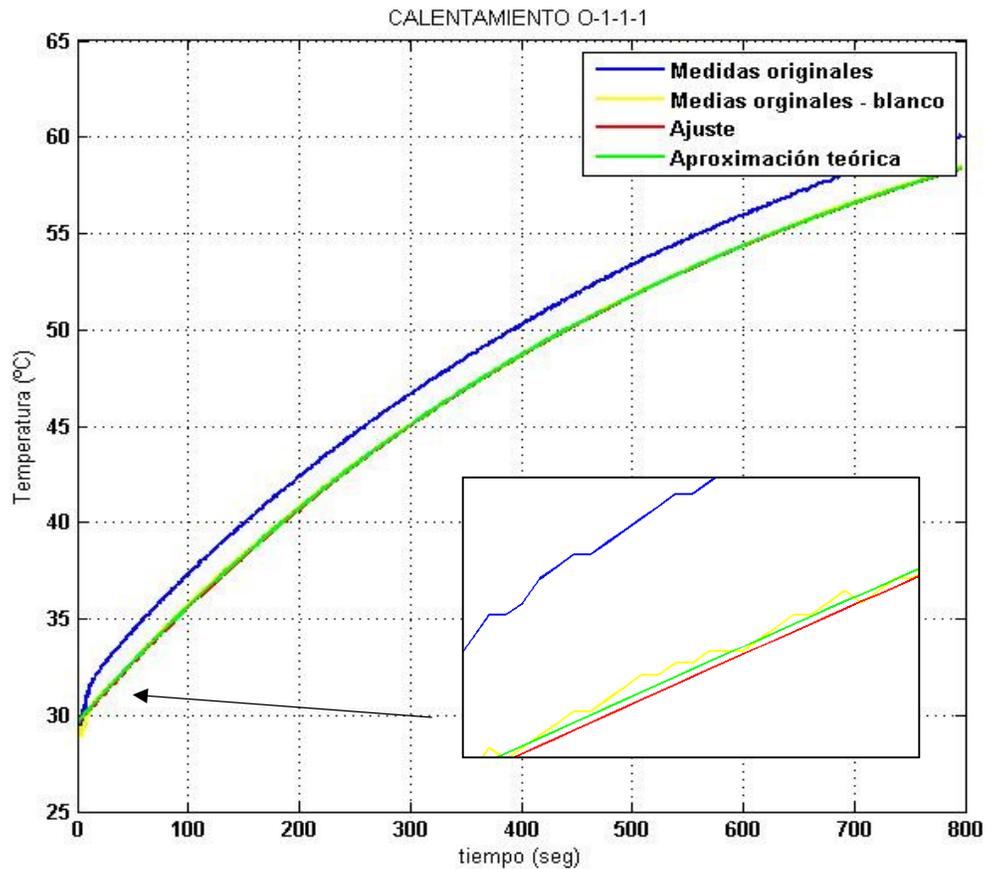


Fig. 20: Evolución de la Temperatura en fase de calentamiento para el experimento O_1_1_1

Metodología experimental

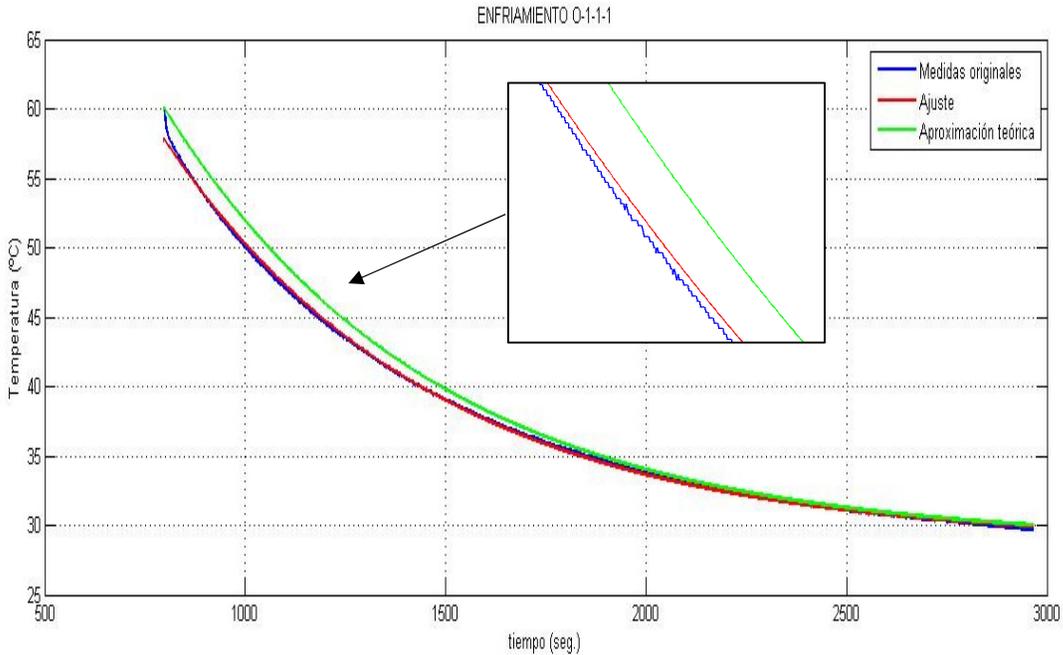


Fig. 21: Evolución de la Temperatura en fase de enfriamiento para el experimento O_1_1_1

En el caso del análisis del Carbon Black el procedimiento es exactamente el mismo con la única diferencia de que en la primera parte el archivo se llama “cargar_carb.m” y es el encargado de realizar para el Carbon Black las mismas operaciones que realizaba para el oro el archivo “cargar_oro.m”. El resto del procedimiento, incluida la función analizar, son exactamente igual.

8.3. Representación de resultados

Tras el análisis expuesto en el punto anterior se obtienen los siguientes resultados numéricos:

**ORO
POTENCIA ABSORBIDA**

Potencia 1 (1.76 W)

DO	0.48	0.7	0.94
Tamaño			
10	1.1545	1.3911	1.1208
50	1.3447	1.213	1.484
100	0.8059	1.079	1.1205

**CARBONO BLACK
POTENCIA ABSORBIDA**

Potencia 1 (1.76 W)

DO	0.48	0.7	0.94
Tamaño			
x	0.767	0.9392	1.1128

Potencia 2 (1.9 W)

DO	0.48	0.7	0.94
Tamaño			
10	1.0725	1.3033	1.0573
50	0.7752	0.8121	1.4457
100	0.6927	0.9601	1.0276

Potencia 2 (1.9 W)

DO	0.48	0.7	0.94
Tamaño			
x	0.6779	0.729	0.9222

Potencia 3 (2.5 W)

DO	0.48	0.7	0.94
Tamaño			
10	1.3198	1.5772	1.3455
50	0.9651	0.9907	1.8275
100	0.8863	1.1385	1.2898

Potencia 3 (2.5 W)

DO	0.48	0.7	0.94
Tamaño			
x	0.7581	0.978	1.1857

Tabla 6: Resultados numéricos con nanopartículas de oro

**ORO
RENDIMIENTO**

Potencia 1 (W) 1.75

DO	0.48	0.7	0.94
Tamaño			
10	0.6597	0.7949	0.6405
50	0.7684	0.6931	0.8480
100	0.4605	0.6166	0.6403

**CARBONO BLACK
RENDIMIENTO**

Potencia 1 (W) 1.75

DO	0.48	0.7	0.94
Tamaño			
x	0.4383	0.5367	0.6359

Potencia 2 (W) 2

DO	0.48	0.7	0.94
Tamaño			
10	0.5363	0.6517	0.5287
50	0.3876	0.4061	0.7229
100	0.3464	0.4801	0.5138

Potencia 2 (W) 2

DO	0.48	0.7	0.94
Tamaño			
x	0.3390	0.3645	0.4611

Potencia 3 (W) 2.55

DO	0.48	0.7	0.94
Tamaño			
10	0.5176	0.6185	0.5276
50	0.3785	0.3885	0.7167
100	0.3476	0.4465	0.5058

Potencia 3 (W) 2.55

DO	0.48	0.7	0.94
Tamaño			
x	0.2973	0.3835	0.4650

Tabla 7: Resultados numéricos con nanopartículas de carbón black

Metodología experimental

Para poder analizar los resultados de una forma más visual se presentan las siguientes gráficas:

- Rendimiento en función del diámetro de nanopartícula (Manteniendo la potencia incidente constante)

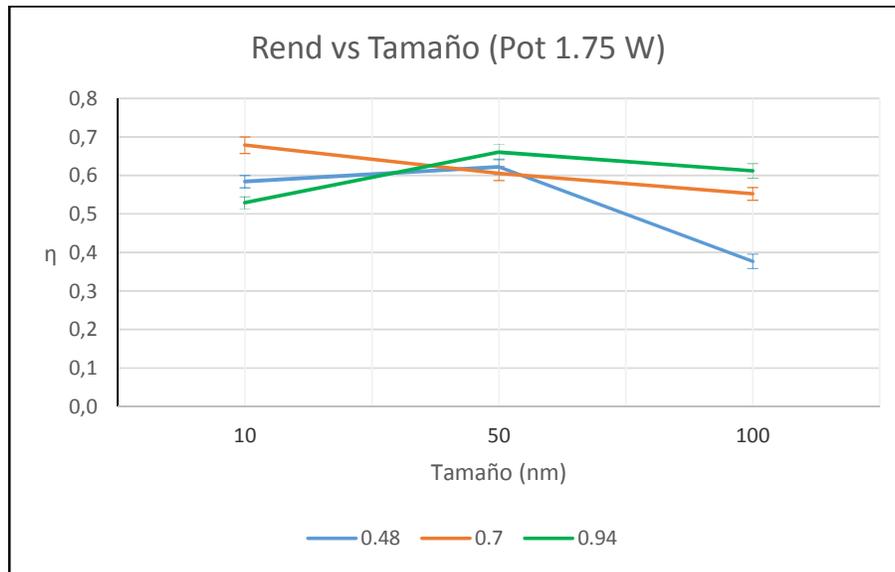


Fig. 22: Gráfica de resultados: Rendimiento vs Tamaño (Pot 1.75 W)

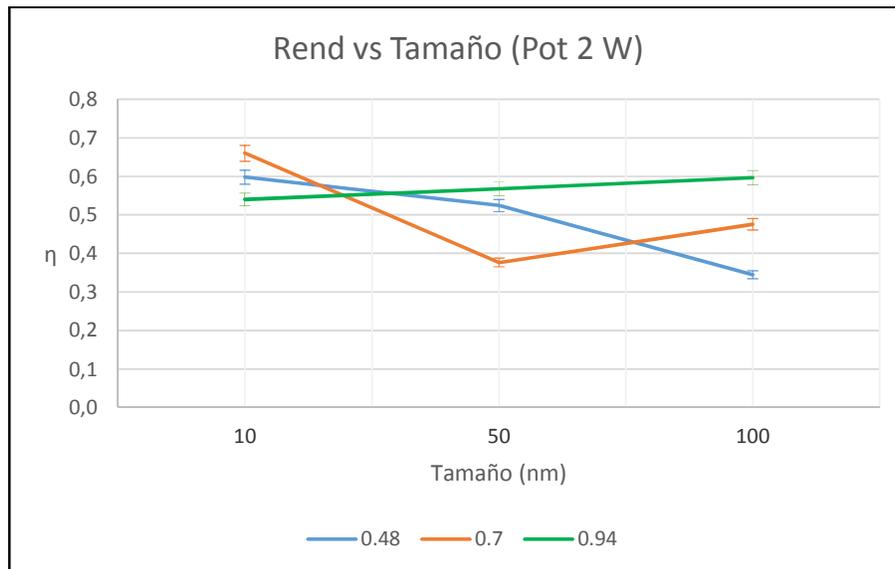


Fig. 23: Gráfica de resultados: Rendimiento vs Tamaño (Pot 2 W)

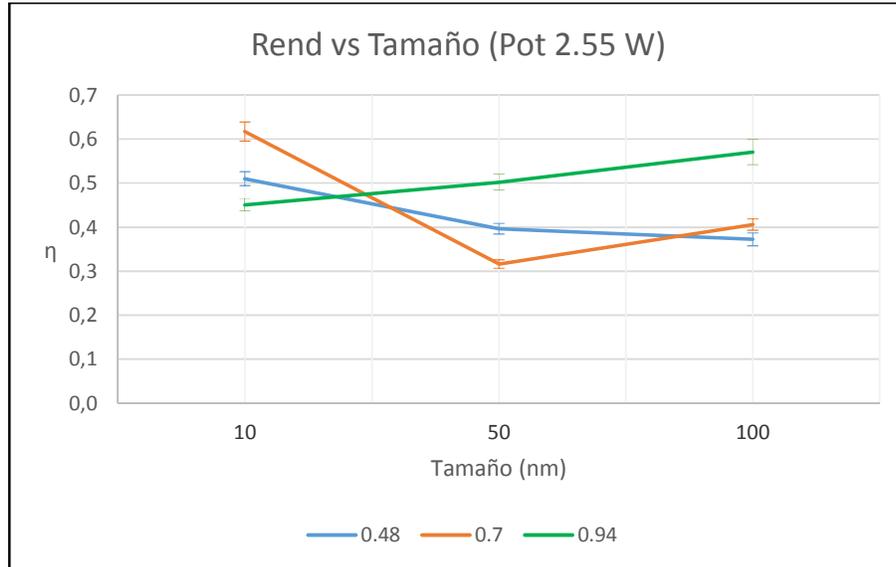


Fig. 24: Gráfica de resultados: Rendimiento vs Tamaño (Pot 2.55 W)

Es evidente en este caso que, mientras a densidades óptica bajas la tendencia es descendente, a medida que aumenta la DO el rendimiento también lo hace paralelamente al aumento del tamaño de la nanopartícula.

- Rendimiento en función del diámetro de nanopartícula (Manteniendo la DO constante)

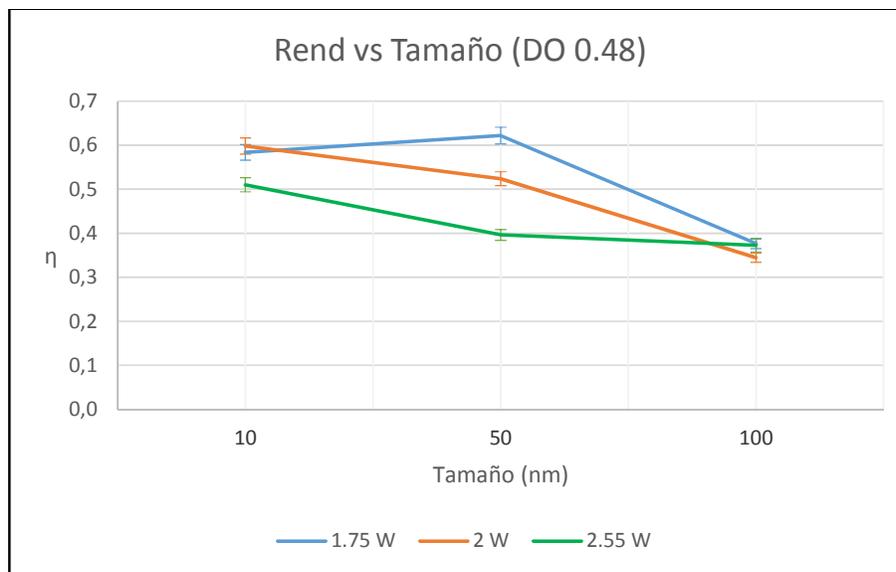


Fig. 25: Gráfica de resultados: Rendimiento vs Tamaño (DO 0.48)

Metodología experimental

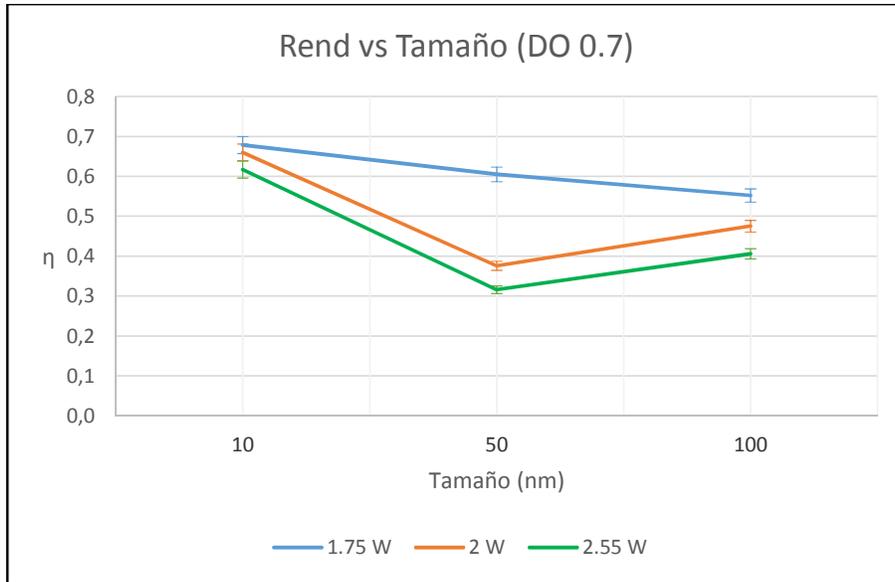


Fig. 26: Gráfica de resultados: Rendimiento vs Tamaño (DO 0.7)

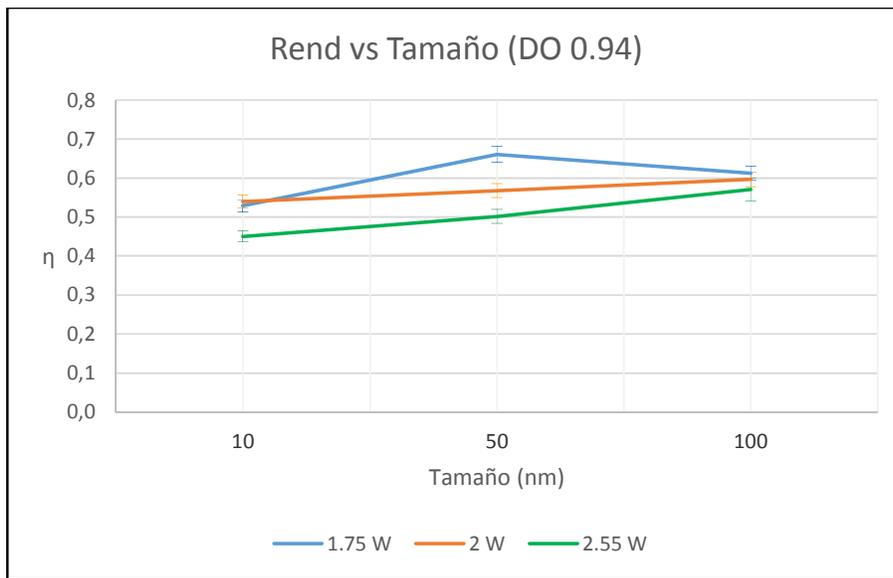


Fig. 27: Gráfica de resultados: Rendimiento vs Tamaño (DO 0.94)

En este punto podemos observar de nuevo la reflexión anterior, es decir, que para DO elevadas el rendimiento parece aumentar con el tamaño de la nanopartícula mientras que para DO bajas esto parece ser al contrario. Además puede observarse, también, que parecen dar mejores resultados (un mayor rendimiento) los casos en los que la potencia es menor.

- Rendimiento en función de la potencia incidente (Manteniendo el tamaño de nanopartícula constante)

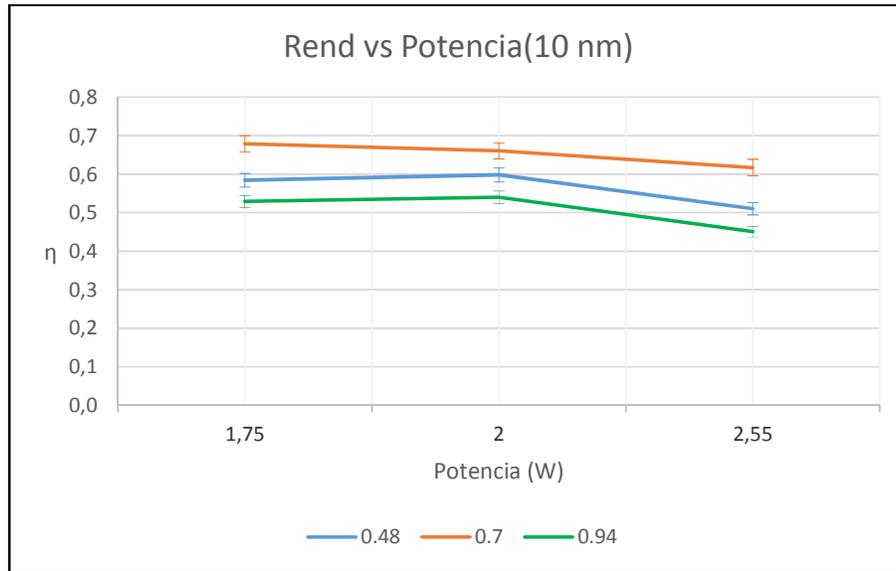


Fig. 28: Gráfica de resultados: Rendimiento vs Potencia (10 nm)

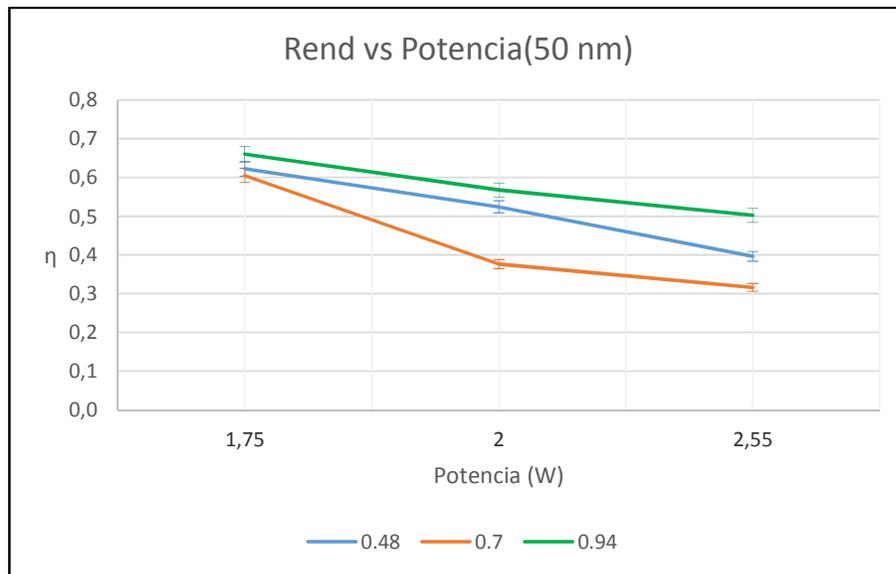


Fig. 29: Gráfica de resultados: Rendimiento vs Potencia (50 nm)

Metodología experimental

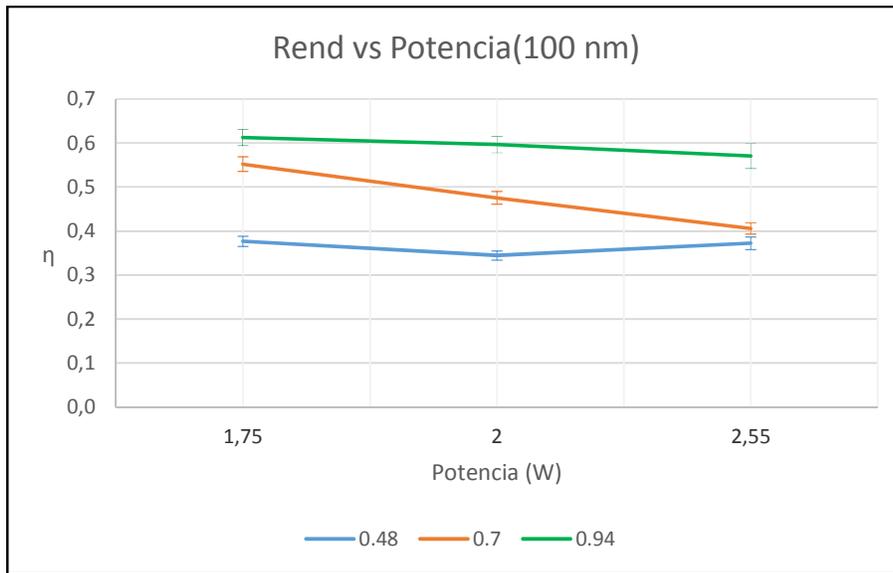


Fig. 30: Gráfica de resultados: Rendimiento vs Potencia (100 nm)

Desde esta perspectiva los resultados muestran como hay un ligero descenso del rendimiento con el aumento de la potencia y que, mientras que para nanopartículas de 10 nm el mejor resultado lo da la DO de 0.7, para el resto de casos es la DO de 0.94 la que mayor rendimiento obtiene.

- Rendimiento en función de la potencia incidente (Manteniendo la DO constante)

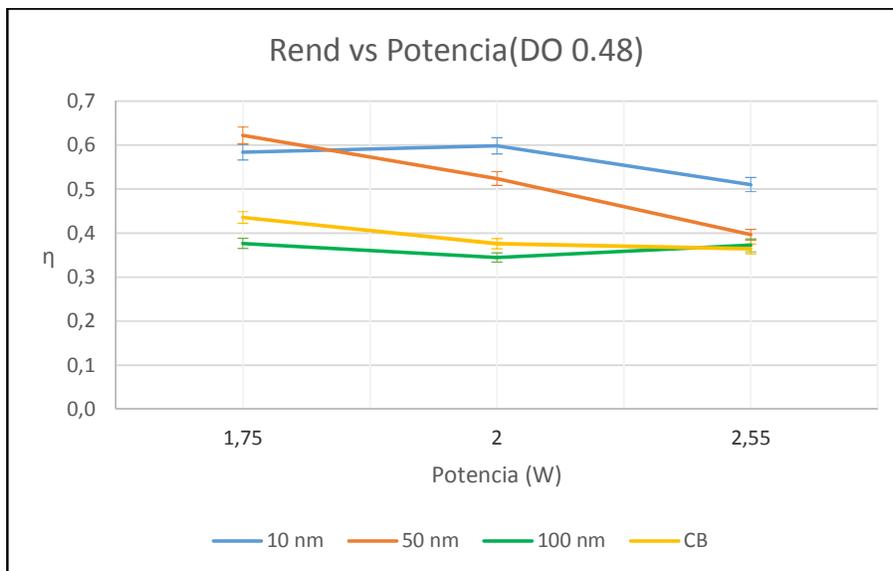


Fig. 31: Gráfica de resultados: Rendimiento vs Potencia (DO 0.48)

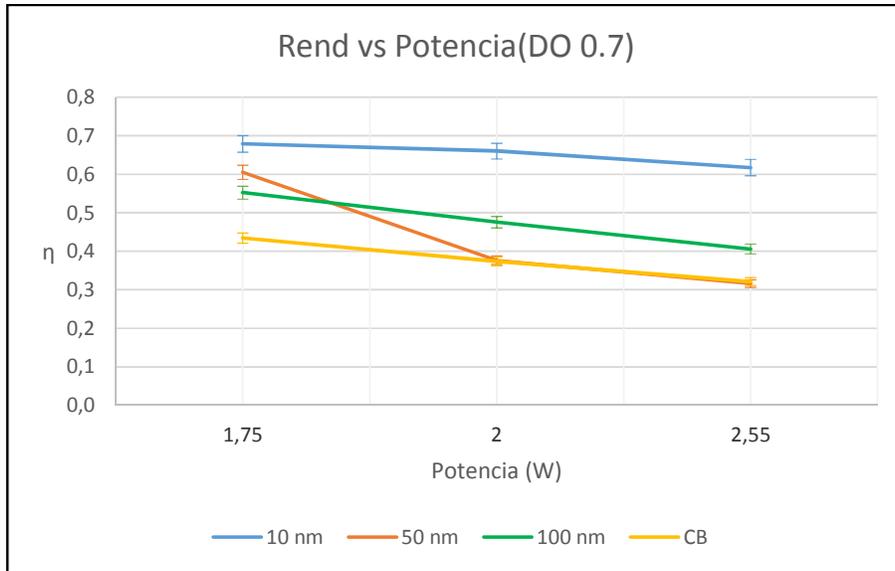


Fig. 32: Gráfica de resultados: Rendimiento vs Potencia (DO 0.7)

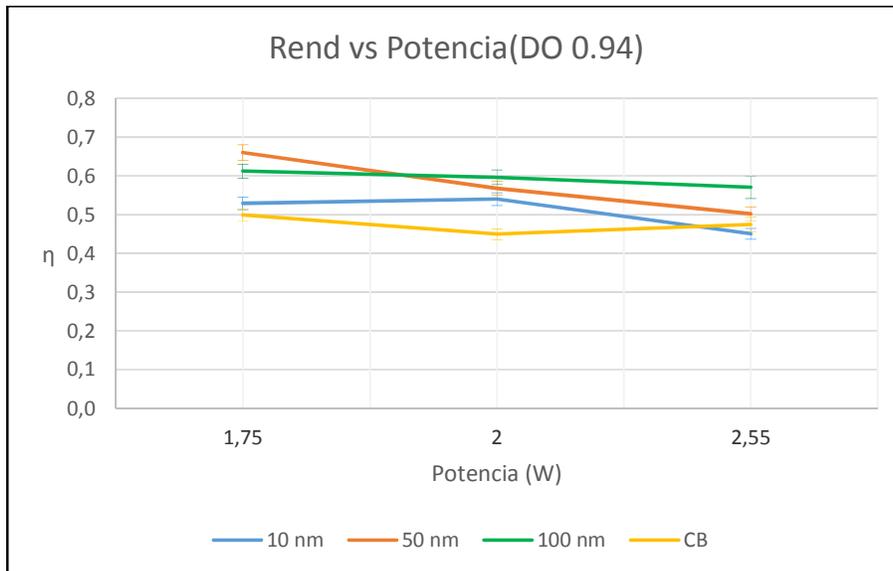


Fig. 33: Gráfica de resultados: Rendimiento vs Potencia (DO 0.94)

En este caso ya se puede comparar los rendimientos del oro a distintos tamaños con los de nanopartículas de carbón black. Así, además de poder comprobar desde otro punto de vista que mientras para DO bajas las partículas más pequeñas son las que mejor resultado dan y que a mayores DO esto sucede al contrario, también se puede observar que, en general, en todos los casos el rendimiento es mayor para partículas de oro que para las de carbón.

Metodología experimental

- Rendimiento en función de la DO (Manteniendo la potencia incidente constante)

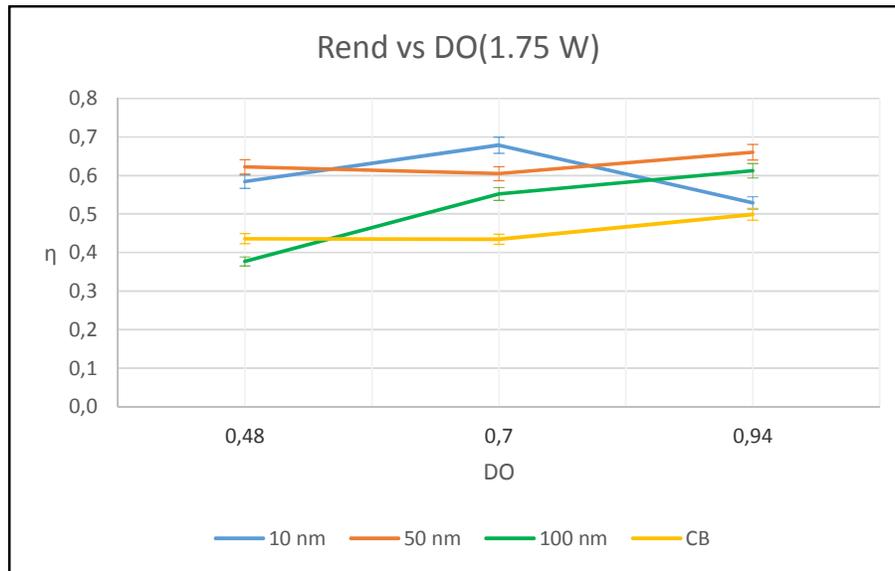


Fig. 34: Gráfica de resultados: Rendimiento vs DO (Potencia 1.75 W)

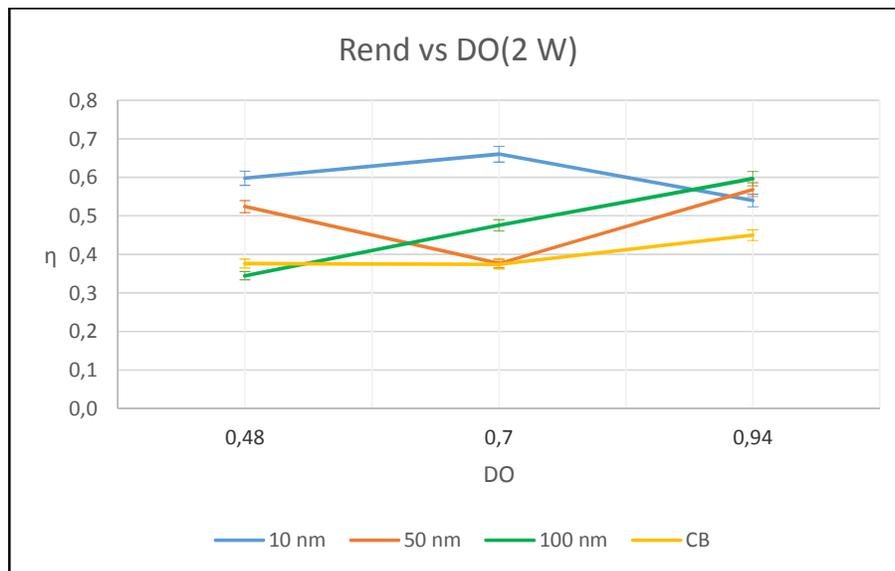


Fig. 35: Gráfica de resultados: Rendimiento vs DO (Potencia 2 W)

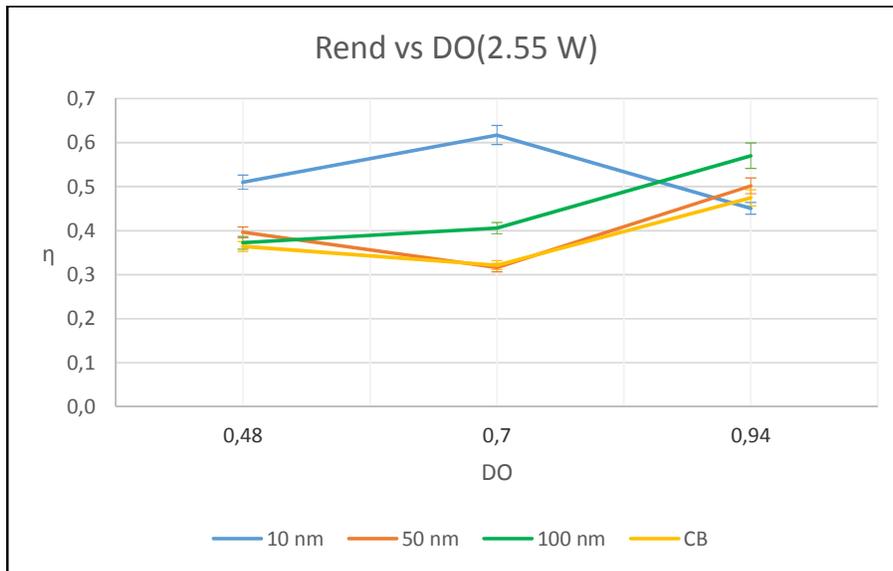


Fig. 36: Gráfica de resultados: Rendimiento vs DO (Potencia 2.55 W)

En esta representación de resultados también se puede observar que, a pesar de tener un par de puntos confusos (O_3_1_1, O_3_1_2 y O_2_2_3), la inmensa mayoría muestran mejor resultado para el oro así como una tendencia ascendente para tamaños grandes y descendentes para nanopartículas de 10 nm.

- Rendimiento en función de la DO (Manteniendo el tamaño de nanopartícula constante)

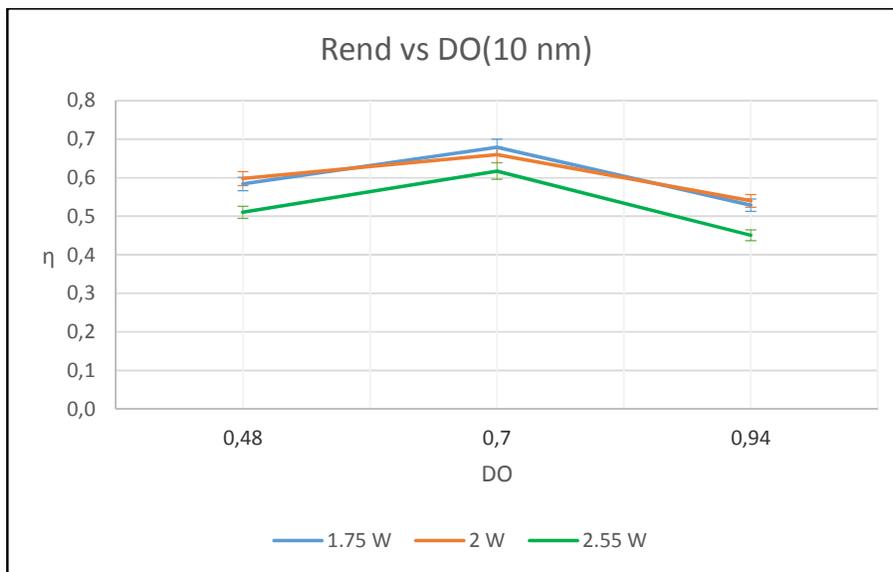


Fig. 37: Gráfica de resultados: Rendimiento vs DO (10 nm)

Metodología experimental

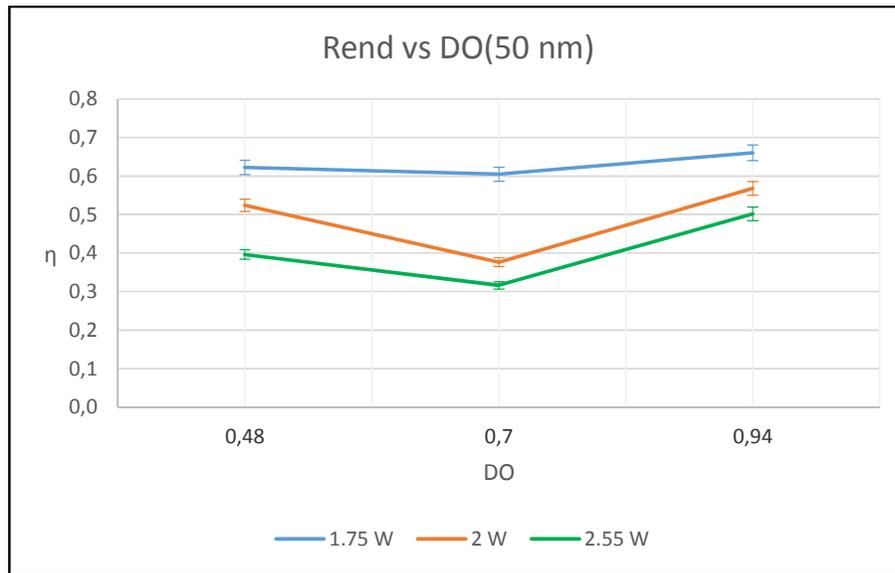


Fig. 38: Gráfica de resultados: Rendimiento vs DO (50 nm)

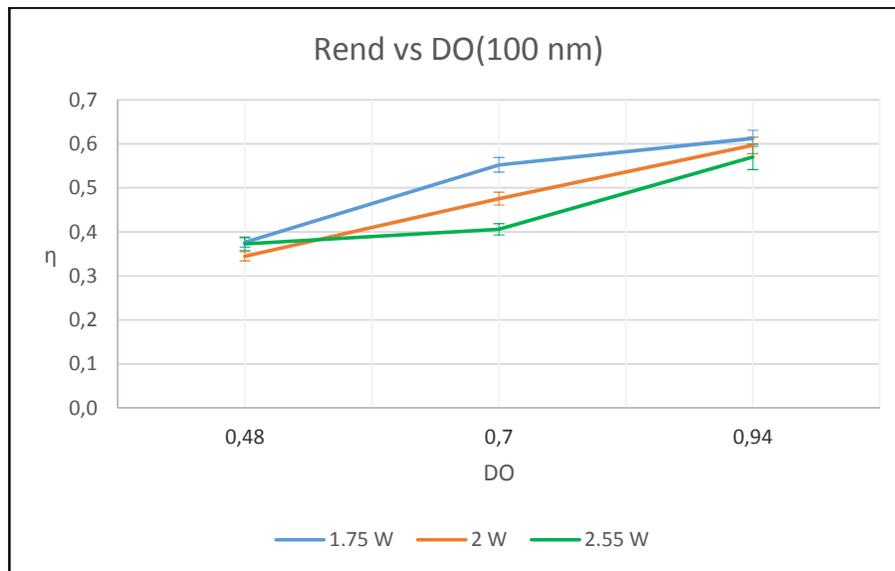


Fig. 39: Gráfica de resultados: Rendimiento vs DO (100 nm)

Vuelve a observarse un descenso de rendimiento al aumentar la DO para partículas más pequeñas (10 nm) y una tendencia ascendente para partículas más grandes.

9. SIMULACIÓN

Para llevar a cabo una simulación teórica con la que poder realizar la comparativa oportuna se parte de un estudio previo (cuya información fue cedida por el catedrático de Química Física de la Universitat Jaume I, Josep Hilario Planelles Fuster) realizado con partículas de oro en suspensión acuosa. El estudio consiste en hacer el cálculo del calor generado por una nanopartícula metálica que se irradia sobre el agua en que esté inmersa, haciendo uso de un modelo clásico [A.O.Govorov, 2007].

$$Q = \frac{\omega}{8\pi} E_0^2 \left| \frac{3\epsilon_0}{2\epsilon_0 + \epsilon_{NP}} \right|^2 \text{Im}(\epsilon_{NP}) \quad (49)$$

Donde Q es la generación de calor, E₀ es la amplitud de la radiación incidente, ϵ_{NP} la constante dieléctrica compleja de la nanopartícula dependiente de la frecuencia ϵ_0 la constante dieléctrica del medio exterior que se considerará agua (ϵ_0 del agua = 1.8) Finalmente Im (ϵ_{NP}) es la parte imaginaria de ϵ_{NP} .

La intensidad de la radiación incidente está relacionada con E₀ de acuerdo con:

$$I_0 = c \frac{\sqrt{\epsilon_0}}{8\pi} E_0^2 \quad (\text{W/m}^2) \quad (50)$$

Donde c es la velocidad de la luz, relacionada con la frecuencia y longitud de onda según la ecuación siguiente.

$$c = \lambda\nu = \frac{\lambda\omega}{2\pi} \quad (51)$$

La velocidad de generación total de calor q es, por tanto:

$$q = \frac{4}{3} \pi r_{NP}^3 \frac{2\pi I_0}{\lambda\sqrt{\epsilon_0}} \left| \frac{3\epsilon_0}{2\epsilon_0 + \epsilon_{NP}} \right|^2 \text{Im}(\epsilon_{NP}) \quad (52)$$

El objetivo es la obtención de q como una función del radio de la nanopartícula. En la simulación del estudio del que se habla se asumió una λ de 532 nm, una I_0 de $3 \cdot 10^9 \text{ W/m}^2$, y para calcular ϵ_{NP} se recurre a los trabajos de Palik i de Johnson & Christy. [Edward D. Palik, 1985; R. W. Christy, 1972].

El resultado de la simulación se muestra en la figura 40:

Simulación

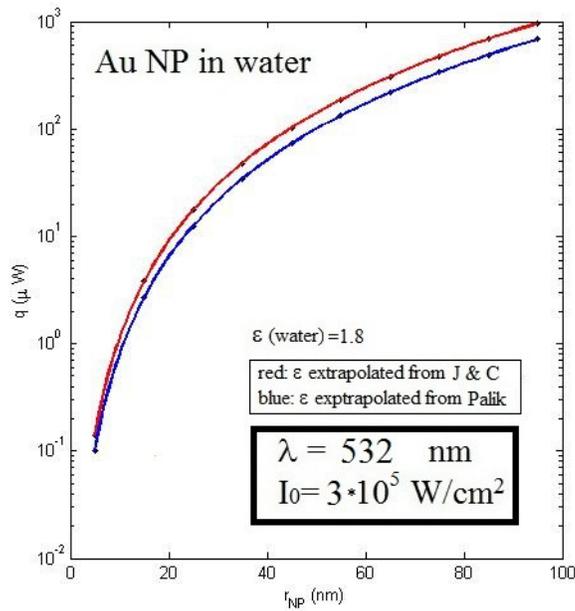


Fig. 40: Gráfica simulación q vs r_{NP}

Para poder utilizar esta simulación es necesario conocer el tamaño exacto de las partículas que se están utilizando en los experimentos ya que, hasta ahora, se había utilizado el dato dado por el fabricante. Para ello se utilizan las instalaciones de la UIJ y se realiza una medida de cada uno de los tres tamaños de nanopartículas. Se obtiene una distribución de tamaños vs porcentaje de presencia en el fluido con la que se aproxima un tamaño medio de partícula, y con ella se obtiene, de la gráfica de la simulación q vs r_{NP} , un q generado para cada tamaño de partícula (siendo I_0 de $3 \cdot 10^9 \text{ W/m}^2$)

Tamaño según fabricante (nm)	Tamaño real (aprox) (nm)	q generada (W) $I_0 = 3 \cdot 10^9 \text{ W/m}^2$
10	25.3	2.54E-06
50	37	7.8E-06
100	85.1	1.16E-04

Tabla 8: Relación tamaño fabric. /tamaño real/q generada

Llegados a este punto se pone en práctica, tal y como hicieron L. Mercatelli et al.(2011) en sus experimentos, el fenómeno de extinción de intensidad. La ley de Beer-Lambert relaciona la intensidad de luz entrante en un medio con la intensidad saliente después de que en dicho medio se produzca absorción. La relación entre ambas intensidades puede expresarse a través de las siguientes relaciones:

$$DO_{\lambda} = \frac{A_{\lambda}}{l} = -\frac{1}{l} \log_{10} T = \frac{1}{l} \log_{10} \left(\frac{I_0}{I} \right) \quad (53)$$

Donde:

l = la distancia que la luz viaja por una muestra (i.e., el grosor de la muestra), medido en cm

A_{λ} = la absorción a longitud de onda λ

T = la transmitancia por unidad

I_0 = Intensidad del rayo de luz incidente

I = intensidad del rayo de luz transmitido

De esta forma, combinando la relación q vs r_{NP} con la ley de Beer Lambert, se realiza un estudio de la q absorbida por cada una de las partículas del nanofluido dividiendo la longitud atravesada por la radiación en N porciones, donde:

$$N = l_{tot \text{ cubeta}} / \phi_{NP} \quad (54)$$

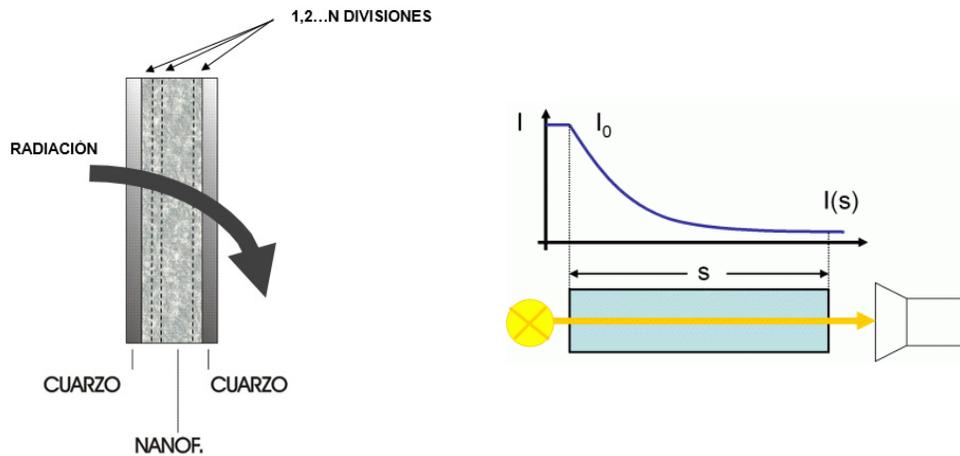


Fig. 41: Caída de intensidad en radiación / divisiones para el cálculo de simulación

Simulación

Así:

- Se toma la primera de estas divisiones, donde la I_0 es la intensidad inicial que incide sobre la cubeta y con $l = \phi_{NP}$.
- Se determina, con esta I y este r_{NP} , cual será la q absorbida.
- Teniendo en cuenta la cantidad de nanopartículas (dada por el proveedor y dependiendo de la DO y el tamaño de éstas), se estima la cantidad de nanopartículas que existen en la división estudiada y se multiplica la q obtenido para cada una de ellas por el total.
- Se calcula por la ley de Beer-Lambert la I resultante de atravesar la primera división y, tomándose esta como I_0 para la siguiente fracción de nanofluido y recalculando la nueva q absorbida para ella, se realiza de nuevo el mismo cálculo.

Finalmente se obtiene el total de q absorbido por las nanopartículas sumando los obtenidos para cada una de las divisiones. El desarrollo con el que se llevan a cabo los cálculos en el programa matlab está adjunto en los anexos.

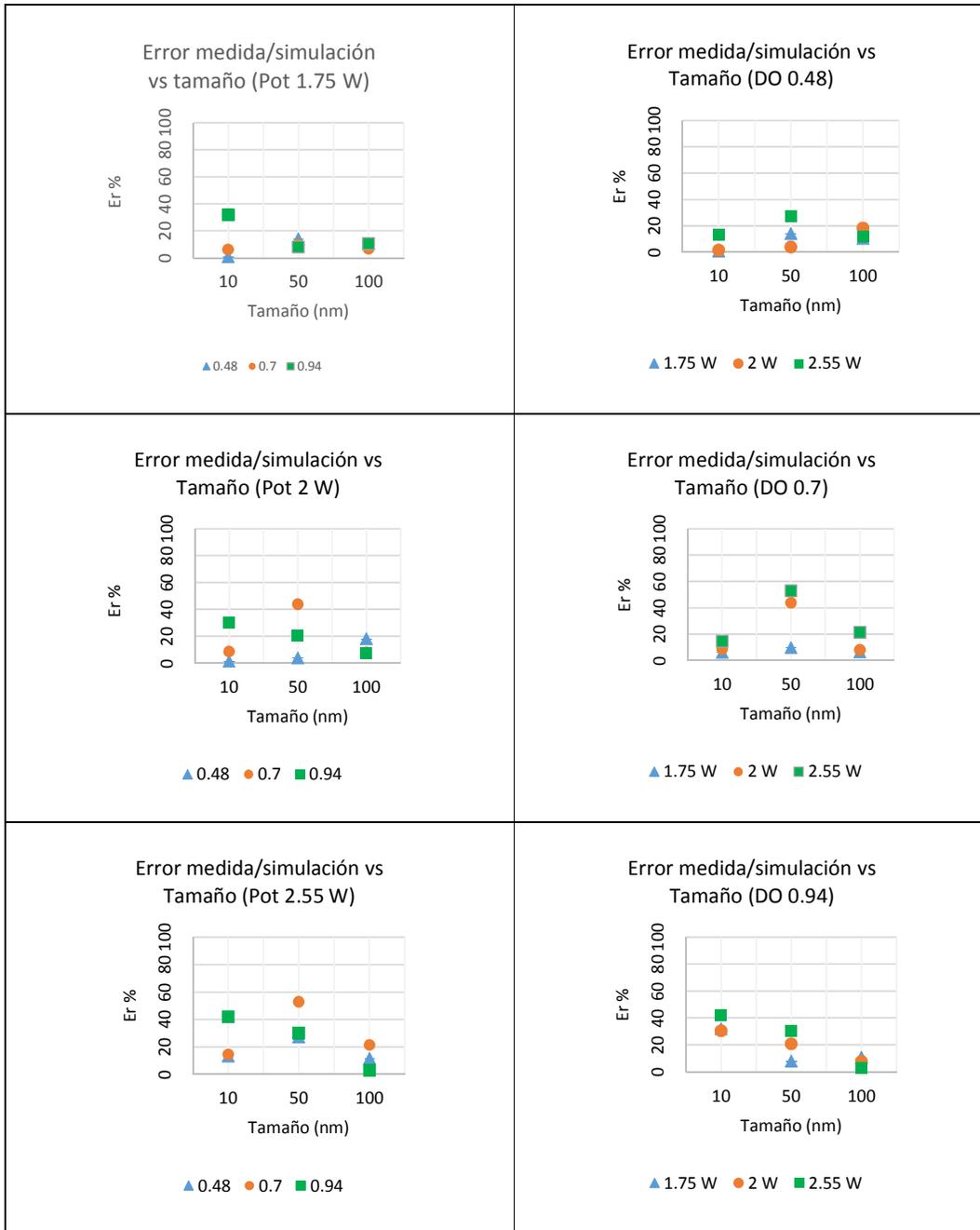
Lo resultados se observan en las tablas siguientes:

Simulación Palick. Oro POTENCIA ABSORBIDA			
Potencia 1 (1.75 W)			
DO			
Tamaño	0.48	0.7	0.94
10	1.0303	1.2655	1.3582
50	0.9555	1.1741	1.2547
100	0.7371	0.9053	0.9695
Potencia 2 (2 W)			
DO			
Tamaño	0.48	0.7	0.94
10	1.1774	1.4463	1.5523
50	1.0920	1.3418	1.4340
100	0.8424	1.0346	1.1080
Potencia 3 (2.55 W)			
DO			
Tamaño	0.48	0.7	0.94
10	1.5012	1.8440	1.9791
50	1.3923	1.7108	1.8283
100	1.0741	1.3191	1.4128

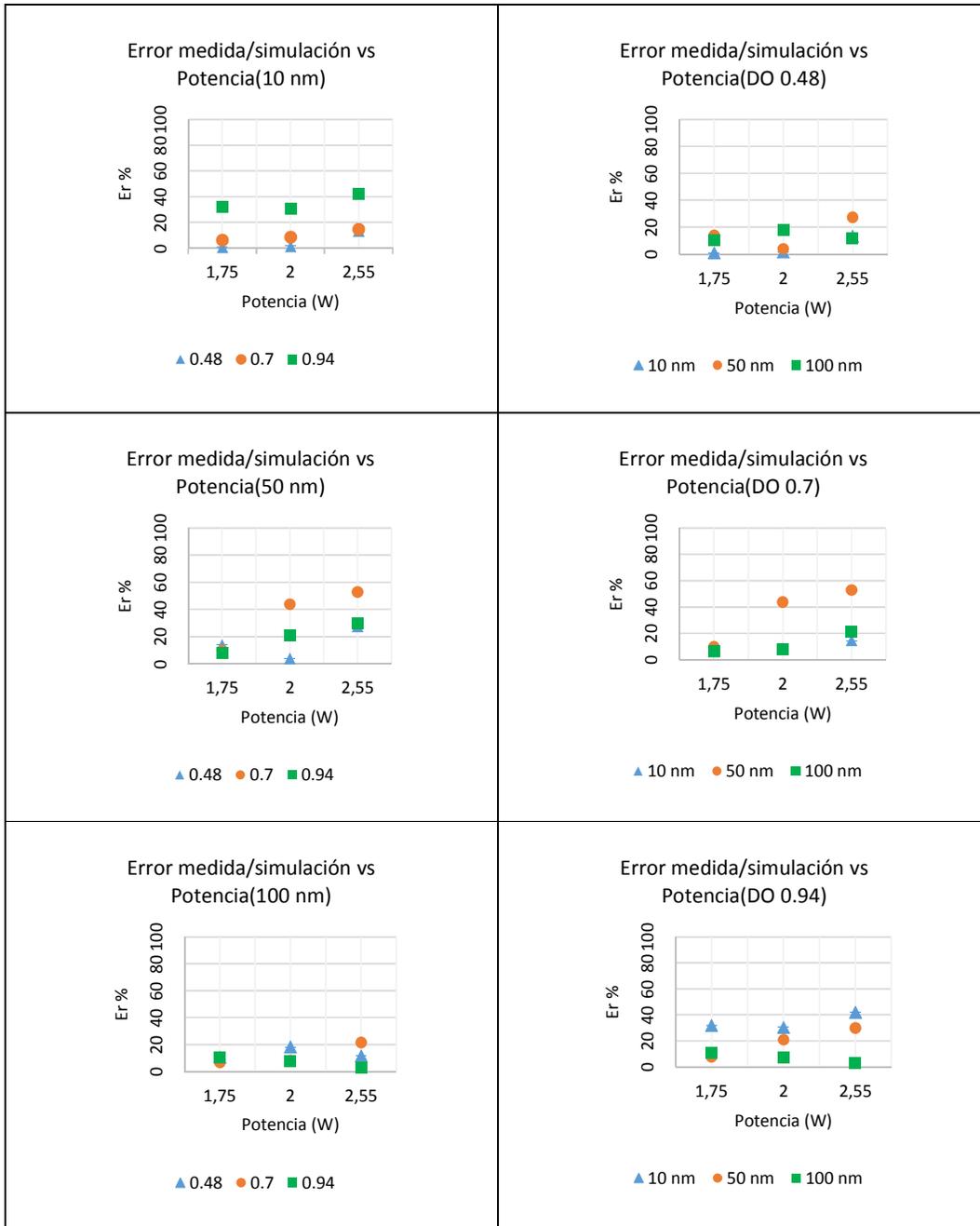
Simulación Palick. Oro RENDIMIENTO			
Potencia 1 (1.75 W)			
DO			
Tamaño	0.48	0.7	0.94
10	0.5887	0.7231	0.7761
50	0.5460	0.6709	0.7170
100	0.4212	0.5173	0.5540
Potencia 2 (2 W)			
DO			
Tamaño	0.48	0.7	0.94
10	0.5887	0.7232	0.7762
50	0.5460	0.6709	0.7170
100	0.4212	0.5173	0.5540
Potencia 3 (2.55 W)			
DO			
Tamaño	0.48	0.7	0.94
10	0.5887	0.7231	0.7761
50	0.5460	0.6709	0.7170
100	0.4212	0.5173	0.5540

Tabla 9: Resultados simulación

Para poder analizar con mayor claridad las diferencias entre las medidas reales y las simulaciones arriba expuestas se muestran en las siguientes figuras representaciones de sus errores relativos frente a las distintas variables a estudiar.



Simulación



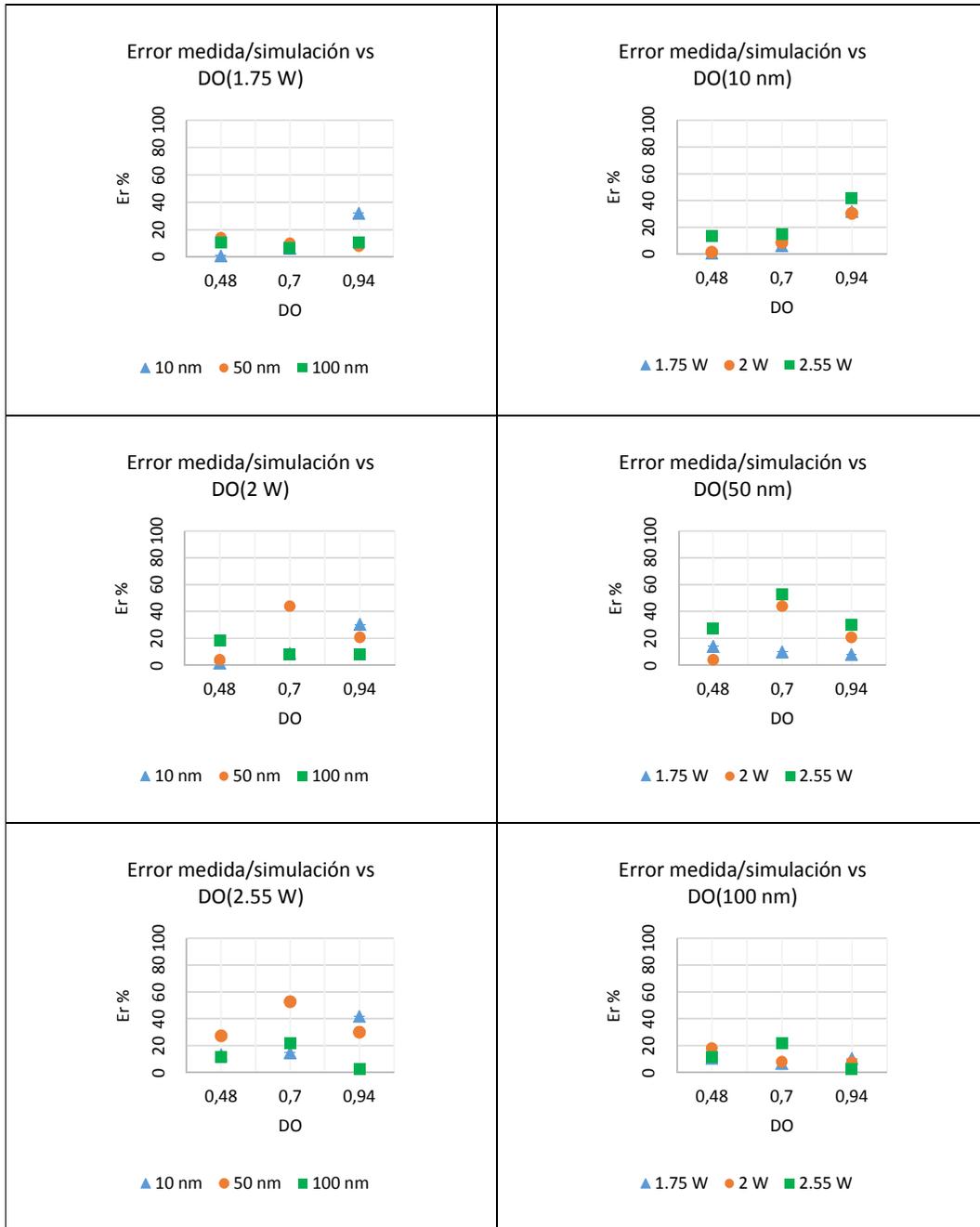


Tabla 10: Relación de gráficas Er medida/simulación vs variable

- A medida que aumenta la potencia aumenta el error
 - o Para la potencia de 1.75W sólo hay una medida (O_1_3_1) con un error superior al 20%
 - o Para la potencia de 2.55, sin embargo hay 5 medidas de 9 por encima de 20%
- A medida que aumenta la DO el error es más disperso
- Las nanopartículas de 100 nm son las que menos error tienen.
- En general se puede decir que, de las 27 medidas:

Simulación

- 18 están por debajo del 20% de error con respecto a la simulación teórica
- 11 están por debajo del 10% del error con respecto a la simulación teórica
- Sólo 3 medidas están por encima del 40% del error.

10. CONCLUSIONES

Uno de los objetivos principales de este trabajo era caracterizar el comportamiento de nanofluidos solares como absorbedores de calor como posibles sustitutos de los sistemas clásicos de captación solar aumentando su rendimiento.

El hecho de seleccionar en la comparativa realizada los nanofluidos de agua-oro y el de agua-carbono es por un motivo práctico: las nanopartículas de oro por ser las más estudiadas hasta la fecha (con resultados muy favorables) y las de carbono por su bajo coste. Ambas muestras se han caracterizado de una manera básica y se han clasificado según tres variables claras: Tamaño de nanopartícula, densidad óptica del nanofluido y potencia de radiación incidente. También la metodología experimental ha sido simple y sistemática, obteniendo así la caracterización del rendimiento de conversión radiación → calor.

A la hora de poder realizar las mediciones se optó, finalmente, por utilizar una fuente láser para simplificar la instalación y poder así controlar mejor las variables que entran en juego en el experimento, aunque los resultados son sólo una primera aproximación.

De este modo, todas las variables del estudio se podían determinar y controlar de un modo sencillo: El tamaño de las nanopartículas se eligió por disponibilidad del fabricante, la densidad óptica se tomó de forma aleatoria para tener muestras representativas (teniendo en cuenta que la OD que el fabricante nos ofrecía y que sería la máxima era de 1) y la intensidad se determinó partiendo de aquella que nos ofrecía el láser como máxima.

Tal y como se observaba en la figura 32, la tendencia a aumentar o disminuir el rendimiento a la hora de transformar radiación en calor depende del tamaño de nanopartícula. Así, coexisten en esta figura los dos valores máximos obtenidos en los experimentos:

- O_1_2_1: Se trata de nanopartículas de oro de 10 nm de diámetro (según fabricante, 25.23 según cálculos posteriores realizados en las instalaciones de la uji) en un nanofluido con una OD de 0.7 y radiado con una intensidad de 1.75W. (rendimiento de 68%)
- O_2_3_1: Se trata de nanopartículas de oro de 50 nm de diámetro (según fabricante, 37 según cálculos posteriores realizados en las instalaciones de la uji) en un nanofluido con una OD de 0.94 y radiado con una intensidad de 1.75W. (rendimiento de 66%)

En el caso del carbón black el mayor de sus rendimientos se da en el caso C_1_3_1, es decir, nanopartículas de oro de 125 nm de diámetro en un nanofluido con una OD de 0.94 y radiado con una intensidad de 1.75W. (rendimiento de 50%)

Si comparamos el caso O_2_3_1 con C_1_3_1 por ser los más próximos en tamaño y OD dentro de los valores máximos de rendimiento, se observa un aumento en éste si la nanopartícula es de oro (66% de rendimiento frente a un 50% si se trata de carbón).

Conclusiones

También si se compara el menor de los rendimientos se hallan similitudes entre variables del oro y del carbón black. El rendimiento más bajo en el caso de usar nanopartículas de oro se encuentra en la muestra O_2_2_3, siendo éste de 31.6%. En el caso del carbón, el menor rendimiento sería el de la muestra C_1_2_3, de 32.1%. Como se puede observar el máximo rendimiento y el mínimo rendimiento recaen en los mismos tamaños de partículas y coinciden, para el oro y el carbón, en OD e intensidad de radiación. Sin embargo, si se habla de rendimiento mínimo, se observa como éste es muy similar para ambos tipos de nanopartículas, llegando a ser superado por las del carbón black.

Con respecto a la comparación entre las medidas reales llevadas a cabo en el laboratorio con la simulación generada a partir de datos cedidos por la UJI y la teoría de Beer Lambert, la aproximación es bastante acertada ya que aunque hay puntos que difieren considerablemente del valor teórica, la mayor parte de ellos están por debajo de un error del 20% con respecto al valor simulado.

Existen resultados algo confusos y experimentos que deberían ser repetidos o incluso replanteados, pero para ser una primera aproximación al comportamiento de las nanopartículas de oro frente a las de carbón y siendo analizadas variables muy diversas y claves en este tipo de investigaciones, se ha llegado a unas primeras conclusiones valiosas que servirán de base a futuros ensayos.

ANEXOS

1. CÁLCULOS

1.1. Cálculo de errores

Se realiza a continuación el cálculo necesario para obtener los errores relativos a las medidas realizadas en el ensayo.

Se parte del concepto de rendimiento:

$$\eta = \frac{W_{abs}}{W_{laser}} \quad (55)$$

Para obtener el error del rendimiento se lleva a cabo el siguiente cálculo:

$$\Delta\eta = \sqrt{\left(\frac{\partial\eta}{\partial W_{laser}} \Delta W_{laser}\right)^2 + \left(\frac{\partial\eta}{\partial W_{abs}} \Delta W_{abs}\right)^2} \quad (56)$$

$$\frac{\partial\eta}{\partial W_{abs}} = \frac{1}{W_{abs}} \quad (57)$$

$$\frac{\partial\eta}{\partial W_{laser}} = -\frac{W_{abs}}{W_{laser}^2} \quad (58)$$

Los errores relativos de la W_{laser} y de la W_{abs} son:

$$\delta W_{laser} = \delta T_{termopila} = 0.03$$

Ya que este valor es medido directamente por la termopila del ensayo.

Y sabiendo que:

$$W_{abs} = (p_1 + p_2 - T_a) \cdot \beta \quad (59)$$

$$T_a = p_1 \quad (60)$$

$$\beta = p_3 \cdot m \cdot c_p \quad (61)$$

$$\Delta W_{abs} = \sqrt{\left(\frac{\partial W_{abs}}{\partial p_1} \Delta p_1\right)^2 + \left(\frac{\partial W_{abs}}{\partial p_2} \Delta p_2\right)^2 + \left(\frac{\partial W_{abs}}{\partial T_a} \Delta T_a\right)^2 + \left(\frac{\partial W_{abs}}{\partial \beta} \Delta \beta\right)^2} \quad (62)$$

$$\Delta T_a = \Delta p_1 \quad (63)$$

$$\Delta \beta = \sqrt{\left(\frac{\partial \beta}{\partial p_3} \Delta p_3\right)^2 + \left(\frac{\partial \beta}{\partial m} \Delta m\right)^2 + \left(\frac{\partial \beta}{\partial c_p} \Delta c_p\right)^2} \quad (64)$$

ANEXOS. Cálculos

Trabajando primero el error absoluto de β se tiene:

$$\frac{\partial \beta}{\partial p3} = m * cp \quad (65)$$

$\Delta p3 = \text{dado en cada caso por matlab}$

$$\frac{\partial \beta}{\partial m} = p3 * cp \quad (66)$$

$\Delta m = 0.001$

$$\frac{\partial \beta}{\partial cp} = p3 * m \quad (67)$$

$\Delta cp = 0$

$$\Delta \beta = \sqrt{(m * cp * \Delta p3)^2 + (p3 * cp * 0.001)^2} \quad (68)$$

Y posteriormente el error absoluto de W_{abs} :

$$\frac{\partial W_{abs}}{\partial p1} = \beta \quad (69)$$

$\Delta p1 = \text{dado en cada caso por matlab}$

$$\frac{\partial W_{abs}}{\partial p2} = \beta \quad (70)$$

$\Delta p2 = \text{dado en cada caso por matlab}$

$$\frac{\partial W_{abs}}{\partial Ta} = -\beta \quad (71)$$

$\Delta Ta = \Delta p1$

$$\frac{\partial W_{abs}}{\partial \beta} = p1 + p2 - Ta \quad (72)$$

$$\Delta W_{abs} = \sqrt{2 * (\beta * \Delta p1)^2 + (\beta * \Delta p2)^2 + ((p1 + p2 - Ta) * \sqrt{(m * cp * \Delta p3)^2 * (p3 * cp * 0.001)^2})^2} \quad (73)$$

$$\Delta W_{abs} = \sqrt{2 * (\beta * \Delta p1)^2 + (\beta * \Delta p2)^2 + ((p1 + p2 - Ta)^2 * ((m * cp * \Delta p3)^2 * (p3 * cp * 0.001)^2))} \quad (74)$$

Finalmente se obtiene el error del rendimiento:

$$\Delta \eta = \sqrt{\left(-\frac{W_{abs}}{W_{laser}^2} * W_{laser} * \delta W_{laser}\right)^2 + \left(\frac{1}{W_{abs}} * \Delta W_{abs}\right)^2} \quad (75)$$

2. DESARROLLO EN MATLAB

2.1. Archivos de carga

⇒ Carga de medidas de Oro (*cargar_oro.m*)

```

dirName='C:\Users\Beatriz\Desktop\master\proyecto final
master\medidas\analizar\';
path (dirName, path)
clc

Base='0';
BaseBlanco='A';
Tam={'1','2','3'};
DO={'1','2','3'};
Pot={'1','2','3'};
Wabs=zeros(length(Tam),length(DO),length(Pot));
reflec=zeros(length(Tam),length(DO),length(Pot));
rend=zeros(length(Tam),length(DO),length(Pot));
archivo=0;
PotOrig=[1.75 2 2.55];
for iTam=1:length(Tam)
    for iDO=1:length(DO)
        for iPot=1:length(Pot)
            try

fileName=[Base, '_',Tam{iTam}, '_',DO{iDO}, '_',Pot{iPot}, '.xlsx'];
archivo=archivo+1;
[a,b,c]=xlsread([dirName fileName]);
fileName
fileName=[BaseBlanco, '_',Pot{iPot}, '.xlsx'];
fileName
[d,e,f]=xlsread([dirName fileName]);
[g,h,l]=xlsread([dirName 'masas.xlsx']);
m=g(archivo);

[Wabsactual,reflecaactual,betaactual]= analisis_oro(a,d,m);

PotActual=PotOrig(iPot);
rendactual=PotActual\Wabsactual;
Wabs(iTam,iDO,iPot)=Wabsactual;
reflec(iTam,iDO,iPot)=reflecaactual;
rend(iTam,iDO,iPot)=rendactual;
            catch
% disp('no se ha encontrado el archivo O_%d_%d_%d',
iTam, iDo, iPot)
            end
        end
    end
end
end

```

ANEXOS. Desarrollo en matlab

⇒ Carga de medidas de Carbón Black (*cargar_carb.m*)

```
dirName='C:\Users\Beatriz\Desktop\master\proyecto final
master\medidas\analizar\';
path (dirName, path)
clc

Base='C';
BaseBlanco='A';
Tam='1';
DO={'1','2','3'};
Pot={'1','2','3'};
Wabs=zeros(1,length(DO),length(Pot));
reflec=zeros(1,length(DO),length(Pot));
rend=zeros(1,length(DO),length(Pot));
beta=zeros(1,length(DO),length(Pot));
archivo=0;
PotOrig=[1.75 2 2.55];
    for iDO=1:length(DO)
        for iPot=1:length(Pot)
            try

fileName=[Base, '_', Tam, '_', DO{iDO}, '_', Pot{iPot}, '.xlsx'];
        archivo=archivo+1;
        [a,b,c]=xlsread([dirName fileName]);
        fileName
        fileName=[BaseBlanco, '_', Pot{iPot}, '.xlsx'];
        fileName
        [d,e,f]=xlsread([dirName fileName]);
        [g,h,l]=xlsread([dirName 'masas.xlsx']);
        m=g(archivo);

[Wabsactual,reflecactual,betaactual]= analisis_carb(a,d,m);

        PotActual=PotOrig(iPot);
        rendactual=PotActual\Wabsactual;
        Wabs(iTam,iDO,iPot)=Wabsactual;
        reflec(iTam,iDO,iPot)=reflecactual;
        rend(iTam,iDO,iPot)=rendactual;
        beta(iTam,iDO,iPot)=betaactual;
            catch
                disp('no se ha encontrado el archivo C_1_%d_%d',
iDo,iPot)
            end
        end
    end
end
```

2.2. Archivos de análisis

```
function [Wabs]=analisis(a,d,m)
close all
%hold on

data=a(7:end,2);

%selecciona las medidas de calentamiento. "n" es el seg de máx medida
for n=1:length(data)
    if data(n)>data(n+1)&& data(n)>data(n+2)&& data(n)>data(n+3)&&
data(n)>data(n+4)&& data(n)>data(n+5)&& data(n)>data(n+6)&&
data(n)>data(n+7)&& data(n)>data(n+8)&& data(n)>data(n+9)&&
data(n)>data(n+10)
        break
    end
end

%BLANCO
agua=d(7:end,2);
tempinic=agua;

for i=1:length(agua)
    tempinic(i,1)=agua(1,1);
end
blanco=agua-tempinic;

%modifica 'blanco' para que suba el mismo número de medidas que 'data'
for nA=1:length(blanco)
    if blanco(nA)>blanco(nA+1)&& blanco(nA)>blanco(nA+2)&&
blanco(nA)>blanco(nA+3)&& blanco(nA)>blanco(nA+4)&&
blanco(nA)>blanco(nA+5)
        break
    end
end

blancon=zeros(n,1);
for i=1:length(blancon)
    if i<=nA
        blancon(i)= blanco(i);
    elseif i>nA && i<=n
        blancon(i)= blanco(nA);
    end
end

%Cálculo en el enfriamiento
disp('ENFRIAMIENTO')
figure,
transpx=n:length(data);
x=transpx';
y=data(n:length(data),1);

plot(x,y,'b','LineWidth',2)

hold on

s = fitoptions('Method','NonlinearLeastSquares',...
```

ANEXOS. Desarrollo en matlab

```
        'Lower', [0,0,0], ...
        'Upper', [Inf, Inf, Inf], ...
        'Startpoint', [1 1 1]);

f = fittype('p1+p2*(exp(-p3*(x-x(1))))', 'options', s);

[resenf,errenf] = fit(x,y,f)

hold on

plot(x,resenf.p1+resenf.p2*(exp(-resenf.p3*(x-
x(1))))), 'r', 'LineWidth', 2)

%Cálculo teórico
cpagua=4.18;
t0=0;
Ta=resenf.p1
T0=y(1)
beta=resenf.p3*m*cpagua

T = Ta+(T0-Ta)*(exp((-beta*(x-x(1)))/(m*cpagua)));

plot(x,T, 'g', 'LineWidth', 2)

%Cálculo en el calentamiento
disp('CALENTAMIENTO')
figure,
transpx=1:n;
x=transpx';
yorig=data(1:n,1);
plot(x,yorig, 'b', 'LineWidth', 2)
hold on

y=yorig - blancon;

plot(x,y, 'y', 'LineWidth', 2)
hold on

s = fitoptions('Method', 'NonlinearLeastSquares', ...
        'Lower', [0,0,0], ...
        'Upper', [Inf, Inf, Inf], ...
        'Startpoint', [1 1 1]);

f = fittype('p1+p2*(1-exp(-p3*x))', 'options', s);

[resultado,errores] = fit(x,y,f)

hold on

plot(x,resultado.p1+resultado.p2*(1-exp(-resultado.p3*(x-
x(1))))), 'r', 'LineWidth', 2)

hold on

%Cálculo teórico
```

```

t0=0;
T0=resultado.p1;
beta=resultado.p3*m*cpagua;
Wabs=(resultado.p1+resultado.p2-Ta)*beta;

Tenf = ((Wabs/(beta))+Ta)-((Wabs/(beta))-T0+Ta)*(exp((-
beta*x)/(m*cpagua)));

plot(x,Tenf,'g','LineWidth',2)
    
```

2.3. Archivos de cálculo para simulación

```

Tam=[2.5e-06 3.7e-06 8.5e-06];
DO= [0.48 0.75 0.92];
Pot=[1.75 2 2.55];
Qunidorig=[2.56e-6 7.8e-6 1.16e-4];
CantPart=[1.14e11 1.78e11 2.19e11;3.47e10 5.42e10 6.64e10;1.8e09
2.81e09 3.45e09]; %part/cm3

Wabs_simulacion=zeros(length(Tam),length(DO),length(Pot));
rend_simulacion=zeros(length(Tam),length(DO),length(Pot));

archivo=0;
Ltot=1; %cm
I0300000=300000; %W/cm2
A=3.14; %cm2
vol=A; %cm3 o ml
iter=0;

for iTam=1:length(Tam)
    for iDO=1:length(DO)
        for iPot=1:length(Pot)
            L=Tam(iTam);
            Qunid=Qunidorig(iTam);
            Iagua=Pot(iPot);
            cantpart=CantPart(iTam, iDO); %part/cm3
            DensOpt=DO(iDO);

            I0=Iagua/A; %W/cm2
            qunid=I0*Qunid/I0300000; %watios
            part=cantpart*vol; %part
            div=Ltot/L;
            partdiv=part/div;
            qtot=qunid*partdiv;
            Ianter=I0;

            for i=L:L:Ltot
                Iinterm=Ianter*(10^(-DensOpt*L))
                qinterm=Iinterm*(qunid/I0)
                qtot=qtot+qinterm*partdiv;
                Ianter=Iinterm;
            end
        end
    end
end
    
```

ANEXOS. Desarrollo en matlab

```
        iter=iter+1
    end

    PotActual=Pot(iPot);
    rendactual=PotActual\qtot;
    Wabs_simulacion(iTam,iDO,iPot)=qtot;
    rend_simulacion(iTam,iDO,iPot)=rendactual;
end
end
end
```

3. CARACTERÍSTICAS DE EQUIPOS

3.1. Láser



Fig. 1: Láser y su alimentación

SPECIFICATIONS

Model	MGL-N-532A (Good beam)	MGL-N-532B (Normal Product)	
Wavelength (nm)	532±1		
Output power (mW)	>3000, 3500, 4000, ..., 5000		
Transverse mode	TEM ₀₀	Near TEM ₀₀	
Operating mode	CW		
Power stability (rms, over 4 hours)	<1%, <3%, <5%, <10%		
Warm-up time (minutes)	<10		
M ² factor	<1.3	3.0~5.0	
Beam diameter at the aperture (mm)	~1.5	~3.0	
Beam divergence, full angle (mrad)	<1.5		
Beam height from base plate (mm)	68.2		
Polarization ratio	>100:1		
Operating temperature (°C)	10~35		
Power supply (90-264VAC)	PSU-H-LED	PSU-H-FDA	PSU-N-OEM
Modulation option	TTL on/off, 1Hz-1KHz, 1KHz-10KHz, 10KHz-30KHz; and Analog modulation option		
Expected lifetime (hours)	10000		
Warranty period	1 year		

Tabla 11: Especificaciones del láser y de su alimentación

ANEXOS. Características de equipos

3.2. Medidor de potencia

Compact and Durable Power / Energy Meter

- Compact and durable
- Compatible with all standard Ophir sensors: thermal, pyroelectric* and photodiode
- Single shot energy measurement with thermal sensors
- Optional RS232 interface with StarCom PC application and LabVIEW driver (see pages 105-107)
- Power and energy logging with graphical display and statistics
- Power averaging
- Easy to use soft keys, menu-driven
- Screen graphics
- Backlight and rechargeable battery
- Analog output
- EMI rejection



Fig. 2: Medidor de potencia

Specifications

Power Meter	High legibility 32 x 122 pixel graphics supertwist LCD with switchable electroluminescent backlight. Large 12mm digits.
Features	Many screen features: including power with bar graph, energy, average, exposure, frequency, graphs, and more.
Outputs	RS232 and analog output 1V f.s. (optional)
Screen Refresh	15 times / sec.
Case	Molded high-impact plastic with kickstand and EMI conductive shielding, to allow use even in proximity to pulsed lasers.
Size	Very compact: 205 x 95 x 39mm.
Battery	Rechargeable 12 volts. 22 hours use between charges. The charger can be ordered from your local distributor. The charger also functions as AC adapter.
Data Handling	Data can be viewed on board or transmitted to PC: On Board: Max data logging rate >10 points/s Transmitted to PC: Data transmission rate of ~50 points/s. RS232 baud rate of 19200
Sensor features	Works with thermopile, pyroelectric, and photodiode sensors. Automatic, continuous, background cancellation with PD300 sensors. Submicrojoule and multikilohertz capability with model PE sensors. All sensors use smart connector containing configuration information.
Program features	Preferred startup configuration can be set by user. User can recalibrate power or energy. Response time. Zero offset.

Tabla 12: Especificaciones del medidor de potencia