



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería

Desarrollo de un nanofluido en fase líquida con base en nanopartículas de CuO y Ni en la absorción selectiva de radiación solar.

Opción de titulación
Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de
Maestría en Ciencias (Nanotecnología)

Presenta:

Ing. Ludwig Lagarde Soto

Dirigido por:

Dr. Rufino Nava Mendoza

Dr. Rufino Nava Mendoza
Presidente

Dr. Rodrigo Rafael Velázquez Castillo
Secretario

Dr. Eric Mauricio Rivera Muñoz
Vocal

Dra. María de los Ángeles Cuán Hernández
Suplente

Dra. María Lucero Gómez Herrera
Suplente

Dr. Aurelio Domínguez González
Director de la Facultad

Dra. Ma. Guadalupe Flavia Loarca Piña
Directora de Investigación y Posgrado

Centro Universitario
Querétaro, Qro. México
Noviembre 2015

La presente obra está bajo la licencia:
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>



CC BY-NC-ND 4.0 DEED

Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional

Usted es libre de:

Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

Bajo los siguientes términos:



Atribución — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante.



NoComercial — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).



SinDerivadas — Si [remezcla, transforma o crea a partir](#) del material, no podrá distribuir el material modificado.

No hay restricciones adicionales — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas](#) que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.

Avisos:

No tiene que cumplir con la licencia para elementos del material en el dominio público o cuando su uso esté permitido por una [excepción o limitación](#) aplicable.

No se dan garantías. La licencia podría no darle todos los permisos que necesita para el uso que tenga previsto. Por ejemplo, otros derechos como [publicidad, privacidad, o derechos morales](#) pueden limitar la forma en que utilice el material.

RESÚMEN

En el presente trabajo se prepararon nanofluidos con base en nanopartículas de níquel (Ni) y de óxido cúprico (CuO) dispersados en agua como fluido base, con el propósito de incrementar la conductividad térmica del agua. La dispersión de las nanopartículas en agua se realizó aplicando directamente a la suspensión, radiación ultrasónica de alta frecuencia.

Las nanopartículas de níquel y de óxido cúprico poseen propiedades de conductividad térmica muy interesantes. Las nanopartículas de Ni se obtuvieron mediante el método químico de reducción de sales metálicas, empleando un polímero, polietilenglicol y un agente reductor fuerte, hidracina, como estabilizante y reductor, respectivamente. Las nanopartículas de CuO se prepararon por el método químico húmedo, utilizando acetato de cobre (II) como precursor del CuO, ácido acético glacial y una solución de hidróxido de sodio.

Las nanopartículas de níquel y de óxido cúprico se caracterizaron mediante: Isotermas de Adsorción-Desorción de N₂, Difracción de Rayos X (DRX), Espectroscopia de Reflectancia Difusa UV-Vis (UV-Vis DRS) y Microscopía Electrónica de Barrido (SEM).

La conductividad térmica de los nanofluidos se determinó con la técnica transitoria de hilo caliente.

Las nanopartículas de Ni y de CuO, de acuerdo con sus tamaños y morfologías, manifestaron una alta dispersión en el fluido base (agua), generando nanofluidos con alta capacidad térmica, en función a las altas capacidades térmicas del Ni y del CuO.

(Palabras clave: Nano fluido, Nano partículas, Ni, CuO, Método Químico, nanotecnología).

SUMMARY

In this work, nanofluids based on nanoparticles of nickel (Ni) and cupric oxide (CuO) scattered in water as a base fluid, were prepared. The aim was to increase the water thermal conductivity. The dispersion of nanoparticles in water was carried out by applying directly high frequency ultrasonic radiation to the suspension.

Nanoparticles of Nickel and copper oxide have very interesting properties of thermal conductivity. Ni nanoparticles were obtained using chemical method of metal salts reduction, using a polymer, polyethylene glycol and hidrazina as a strong reducing agent, as stabilizer and reducer respectively. CuO nanoparticles were prepared by the chemical wet method, using copper acetate (II) as a precursor of the CuO, glacial acetic acid and sodium hydroxide solution.

Nickel and copper oxide nanoparticles were characterized by: adsorption-desorption isotherms of N₂, X ray diffraction (XRD), diffuse reflectance spectroscopy UV-Vis (UV-Vis DRS) and scanning electron microscopy (SEM). The thermal conductivity of the nanofluids was determined with the transient hot-wire technique.

Ni and CuO Nanoparticles, according to their sizes and shapes, showed a high dispersion in fluid base (water), generating nanofluidos with high thermal capacity, according to the high thermal capacity of Ni and CuO.

(Keywords: Nanofluid, Nanoparticles, Ni, CuO, Chemical Method, Nanotechnology).

DEDICATORIAS

Dedico este trabajo a Mari Fer, mi compañera de vida por su apoyo incondicional y su amor infinito.

A mi madre sol, por hacerme un hombre de bien y enseñarme que no existen límites.

A mi abuela buda y bodacha por ser un ejemplo de perseverancia y fortaleza.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecemos el apoyo financiero obtenido de los proyecto: Posgrado institucional, Proyecto QRO-2012-C01-193364 de la Convocatoria FOMIX 2012-01 y al Proyecto PROINNOVA 218724 de la Convocatoria CONACYT 2013.

Tabla de Contenido

1. INTRODUCCIÓN	10
1.1. COLECTOR SOLAR.....	11
1.1.1. SISTEMA DE RECEPTOR CENTRAL O TORRE CENTRAL (CRS).....	13
1.2. NANOFLUIDO	16
1.2.1. NANOPARTÍCULAS.....	18
1.2.2. FLUIDO.....	20
1.3. MATERIALES.....	21
1.3.1. Óxido de Cobre (CuO)	21
1.3.2. Níquel.....	22
1.4. APLICACIÓN DEL NANOFLUIDO	23
1.5. TRANSFERENCIA DE CALOR (CONDUCTIVIDAD TÉRMICA)	26
1.5.1. CÁLCULO DE DENSIDAD Y CALOR ESPECÍFICO EN NANOFLUIDOS.....	28
1.6. TRANSFERENCIA DE CALOR PRINCIPIOS BÁSICOS.....	29
1.6.1. CONDUCCIÓN	29
1.6.2. CONVECCIÓN.....	31
1.6.3. RADIACIÓN.....	32
1.6.4. ANTECEDENTES DE TRANSFERENCIA DE CALOR DE LOS NANOFLUIDOS.....	33
1.7. ANTECEDENTES	36
2. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS	46
2.1. HIPÓTESIS	46
2.2. OBJETIVO GENERAL.....	46
2.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	46
3. METODOLOGÍA	48
3.1. SÍNTESIS DE NANOPARTÍCULAS DE CuO	48
3.2. SÍNTESIS DE NANOPARTÍCULAS DE Ni.....	49
3.3. PREPARACIÓN DEL NANOFLUIDO.....	50
3.4. CARACTERIZACIÓN DE NANOPARTÍCULAS DE CuO Y Ni	53
3.4.1. UV-VIS	53
3.4.2. DIFRACCIÓN DE RAYOS-X POR POLVOS (XRD)	55
3.4.3. MICROSCOÍA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM)	56
3.5. DISPERSIÓN DE NANOPARTÍCULAS DE CuO Y Ni EN FLUIDO.....	58

3.5.1. SONOQUÍMICA	58
3.6. CONDUCTIVIDAD TÉRMICA	60
3.6.1. MÉTODO TRANSITORIO DE HILO CALIENTE.....	60
4. DISCUSIÓN Y RESULTADOS	63
4.1. UV- VIS NPS DE CUO.....	63
4.2. DIFRACCIÓN DE RAYOS-X POR POLVOS PARA NPS DE CUO	63
4.3. MICROSCOPÍA (SEM) NPS DE CUO.....	66
4.4. UV-VIS NPS DE NI	67
4.5. DIFRACCIÓN DE RAYOS-X POR POLVOS PARA NPS DE NI	68
4.6. MICROSCOPÍA (SEM) NPS DE NI	71
4.7. CONDUCTIVIDAD TÉRMICA	72
4.7.1. MÉTODO TRANSITORIO DE HILO CALIENTE.....	72
5. CONCLUSIONES	74
6. REFERENCIAS	76

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1 Tipos de colectores solares convencionales A) colector parabólico, B) colector lineal fresnel, C) colector de torre central, D) colector de disco parabólico.	12
1.2 Campo de helióstatos y colector solar de torre central convencionales.	14
1.3 Sistema típico de torre central.	15
1.4 Comparativa de tamaños entre nm, micras y mm.	18
3.1 Diagrama de la síntesis de CuO	49
3.2 Diagrama de la síntesis de Ni	50
3.3 Equipo de espectroscopía UV-Vis Varian Cary 3.	54
3.4 Difractómetro de Rayos X por polvos	56
3.5 Esquema de un microscopio electrónico de barrido (SEM)	57
3.6 Microscopio de barrido JEOL JSM-6390L	58
3.7 Rompimiento de aglomeramientos de partículas por medio de sonoquímica.	59
3.8 Equipo de Sonoquímica marca Hielcher UP200Ht	60
3.9 Diagrama de funcionamiento del método transitorio de hilo caliente, laboratorio de conductividad térmica CENAM.	62
4.1 Gráfica de UV-Vis de CuO	63
4.2 Gráfica de XRD del CuO	64
4.3 Comparación del PDF 48-1548 (azul) con la muestra examinada de CuO (negro).	66
4.4 Imágenes de la síntesis de CuO.	67
4.5 Nanopartículas de CuO tomadas SEM.	67
4.6 Gráfica de curva de UV-Vis de Ni	68
4.7 Difractograma de muestra de Ni	69
4.8 Comparación del PDF 04-0850 (azul) y la muestra obtenida de Ni (negro).	70
4.9 Imagen SEM de nanopartículas de Ni metálico.	71
4.10 Imágenes SEM de la síntesis de Ni metálico	71
4.11 Imágenes SEM de Ni tomadas con microscopio del laboratorio de CFATA UNAM	72
4.12 Conductividad térmica del nanofluido Ni/CuO dispersado en agua desionizada en función de la temperatura.	73

ÍNDICE DE TABLAS

4-1 Resultados de la Conductividad térmica del Nanofluido y Fluido base (aceite vegetal). ... ¡Error! Marcador no definido.

1. INTRODUCCIÓN

Las nano estructuras tienen un gran interés científico debido a sus buenas propiedades físicas y químicas, mismas que se definen por las características que poseen los átomos o moléculas del interior del volumen más las propiedades de los átomos o moléculas de la superficie. Para un material macroscópico hay un número de átomos de volumen mucho mayor que el número de átomos de superficie, pero en el caso de una nano estructura, esta relación cambia y el número de átomos o moléculas del exterior comienza a predominar y a establecer las propiedades del material.

Un nanofluido es una suspensión de nanopartículas en un fluido convencional. Estas nanopartículas mejoran algunas de las propiedades de transporte de los fluidos, caso de la conductividad, aun estando a pequeñas concentraciones (5% en volumen). Las nanopartículas pueden incrementar la conductividad porque mejoran la micro mezcla: al aumentar el gradiente de velocidades, rotan e interaccionan entre sí moviendo al líquido que las rodea. Por el gradiente de velocidades, también puede estabilizarse una micro-estructura que mejore la transferencia de calor. El efecto depende del tamaño, forma y material de las nanopartículas (las nanopartículas cilíndricas son más eficaces que las esféricas).

Nanofluidos con nanopartículas metálicas han sido estudiados desde su descubrimiento debido a que se encontró que tenían significativamente alta conductividad térmica.

Para una mejor comprensión de la presente investigación es preciso definir lo que es un colector solar, un nanofluido y los componentes, así como los materiales empleados y la aplicación.

1.1. COLECTOR SOLAR

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. Estos dispositivos absorben la radiación solar entrante, la convierten en calor, y transfieren el calor a un fluido (normalmente aire, agua o aceite) que fluye a través del colector (Omid Mahian, Ali Kianifar, Soteris A. Kalogirou, Ioan Pop, Somchai Wongwises, 2013). La energía recolectada es tomada desde el fluido de trabajo, depositándola ya sea directamente al agua caliente o en el espacio acondicionado o a un tanque de almacenamiento de energía térmica, de la que se puede extraer para su uso en la noche o en días nublados (S.A. Kalogirou, 2009).

Las plantas de energía solar concentrada de sus siglas en inglés (CSP) no es una innovación de los últimos años. Los registros de la fecha de su uso se remontan a 212 aC, cuando Arquímedes utilizó espejos por primera vez para concentrar los rayos del Sol (European Union (EU), 2004.). Lavoisier y Joseph Priestley desarrollaron la teoría de la combustión mediante la concentración de la radiación solar sobre un tubo de ensayo para la recolección de gas (Goswami D Yogi, Kreith Frank, Kreider F, 2000). Después de eso, en 1878, una planta de energía solar pequeña compuesta de un concentrador de antena parabólica conectada a un motor fue exhibido en la Exposición Universal de París (Kryza Frank, 2003).

La primera planta de (CSP), impulsada por un campo solar de colectores cilindro-parabólicos, se instaló en el Al Meadi (Egipto). Esta primera planta, instalada en 1913, fue utilizada para el bombeo de agua para riego (Duffie A, Beckman A., 1991, Samir Rafaat, Maadi, 1913). Las primeras plantas comerciales habían operado en California (EE.UU.) durante el período de 1984 a 1991.

En el 2006 el interés se reavivó una vez más para el desarrollo de plantas de CSP a gran escala. El mercado volvió a surgir más particularmente en España y Estados Unidos.

Hay cuatro familias de CSP en función de los dos subsistemas principales solares, es decir, el colector y el receptor los cuales son: colector parabólico, torre solar también conocida como receptor central, colector lineal Fresnel y el disco Stirling (IEA, 2010).

En la figura 1.1 se observan imágenes de algunos colectores solares convencionales para el uso en plantas de transformación de energía calorífica a energía eléctrica, cabe mencionar que para este trabajo el nanofluido desarrollado se implementara en un colector solar de torre central para un campo de helióstatos.

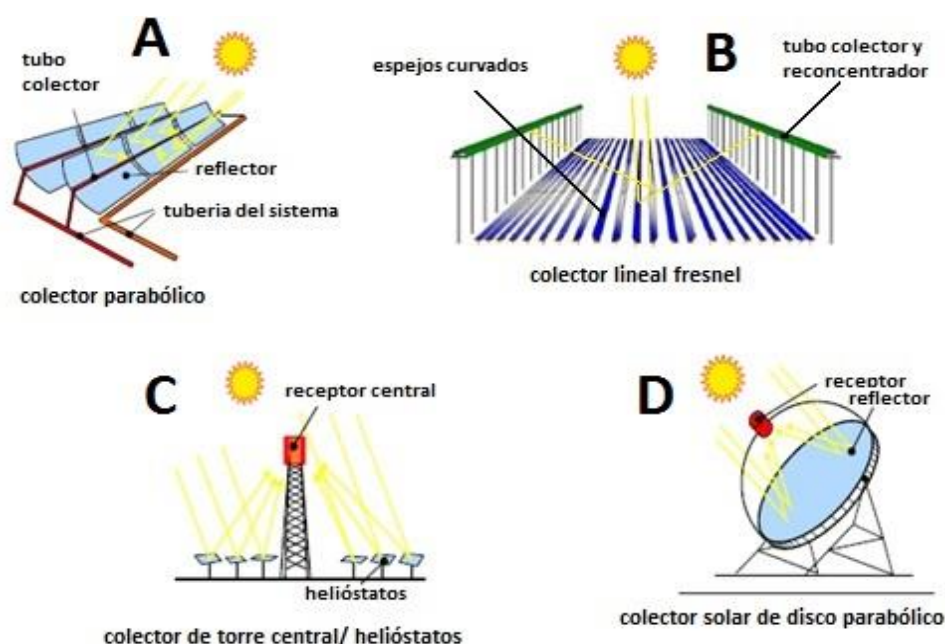


Figura 1.1 Tipos de colectores solares convencionales A) colector parabólico, B) colector lineal fresnel, C) colector de torre central, D) colector de disco parabólico.

Una planta (CSP) típica consta de tres subsistemas principales: campo de colectores solares, receptor solar y un sistema de conversión de energía. En una planta híbrida, se añaden sistemas de respaldo y / o almacenamiento para mejorar el rendimiento y aumentar el factor de capacidad (Jun Li, 2009, Duffie A, Beckman A, 1991, Jamel MS, AbdRahman A, Shamsuddin AH, 2013). El receptor solar absorbe la radiación solar concentrada por los colectores y lo transfiere al fluido de

transferencia de calor por sus siglas en inglés (HTF) que se utiliza para alimentar con calor de alta temperatura a un sistema de conversión de energía. Los subsistemas están unidos entre sí por transferencia de radiación o de transporte de fluido. Estos se clasifican de acuerdo a la forma que se concentran los rayos del sol y la tecnología de receptor (Py Xavier, Azoumah Yao, Olives Regis, 2013, Kadir Mohd Zainal Abidin Ab, Rafeeu Yaaseen, Adam Nor Mariah, 2010, EASAC, 2011). Para cada tecnología la eficiencia global de todo el sistema varía con la ubicación, la hora del día y el día del año (Behar Omar, Kellaf Abdallah, Mohammedi Kamal, Belhamel Maïouf., 2011, 2012).

En cada familia CSP, una variedad de opciones es posible para el diseño del campo solar, el sistema de seguimiento, tipo de receptor, fluido de transferencia de calor (HTF), la tecnología de almacenamiento y sistema de conversión de energía. En cuanto a los fluidos de transferencia de calor (HTF), la sal fundida se utiliza ampliamente como HTF en plantas comerciales. El aceite sintético y vapor saturado también se utilizan actualmente como HTF en las plantas comerciales. El vapor sobrecalentado se ha introducido recientemente como HTF (Montes MJ, Rovira A, Martínez-Val JM, Ramos A. 2012, Steinmann W-D, Eck M. 2006). Aire a presión y otros gases, en particular de CO₂ y N₂ y nano-fluidos están en desarrollo para colectores de torre central comentan los investigadores (Mahian Omid, Kianifar Ali, Kalogirou A, Pop Ioan, Wongwises Somchai, 2013, Tammé R, Laing D, Steinmann W-D. 2004).

1.1.1. SISTEMA DE RECEPTOR CENTRAL O TORRE CENTRAL (CRS)

El uso del sistema de receptor central de sus siglas en inglés (CRS) de producción de electricidad da promesas para ser una de las opciones más viables para reemplazar las plantas de energía de combustibles fósiles. De hecho, las actividades de investigación y desarrollo en sus subsistemas básicos han ido en auge rápidamente desde 1980.

De todas las tecnologías disponibles para (CSP) hoy en día el (CRS) se está moviendo a la vanguardia y podría convertirse en la tecnología de elección para convertirse en la mejor alternativa para la producción de energía eléctrica. (IRENA, 2012, Soteris AKalogirou, 2013). Esto es principalmente debido a las mejoras de rendimiento esperado y reducciones de costos asociados a las innovaciones tecnológicas de los tres subsistemas principales, es decir, la de los helióstatos, el receptor y el bloque de poder dentro de un futuro cercano. En comparación con otras opciones de CSP, el sistema receptor central no sólo podría proporcionar electricidad más barata que sistemas de cilindro y plato, sino también un mejor rendimiento (CSP Today, 2008, IRENA, 2012).

En la figura 1.2 se muestra un campo de helióstatos con un colector solar de torre central convencionales, en el cual dependiendo de los factores como son ubicación, superficie del terreno, factores climatológicos, se realizan los cálculos necesarios para obtener el mejor aprovechamiento de la energía solar.

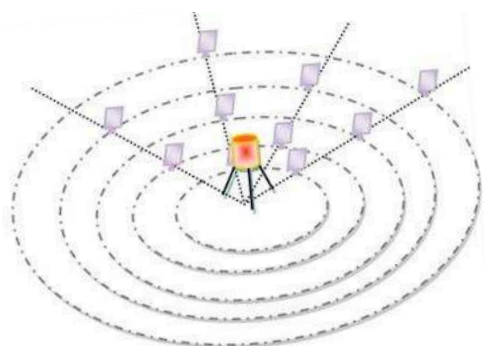


Figura 1.2 Campo de helióstatos y colector solar de torre central convencionales.

Como se muestra en la figura 1.3, un sistema receptor central típico, también conocido como torre central, consta de tres subsistemas principales, el campo de helióstatos, el receptor solar y el sistema de conversión de energía. El campo solar se compone de numerosos espejos controlados por computadora que siguen al sol individualmente en dos ejes y reflejan la radiación solar sobre el receptor situado en la parte superior de la torre. El receptor absorbe la radiación solar reflejada por los

helióstatos y convierte la radiación solar en niveles de alta temperatura. Dependiendo del diseño del receptor y la naturaleza del fluido de transferencia de calor, las temperaturas de trabajo superiores pueden variar de 250 °C a 1000 °C (Pitz-Paal, R, Dersch, J Milow, 2005, IRENA, 2012). Un sistema de conversión de potencia se utiliza para desplazar la energía térmica en energía eléctrica en la misma forma que las plantas de energía convencionales (IRENA, 2012, Romero-Álvarez Manuel, Zarza Eduardo, 2007).

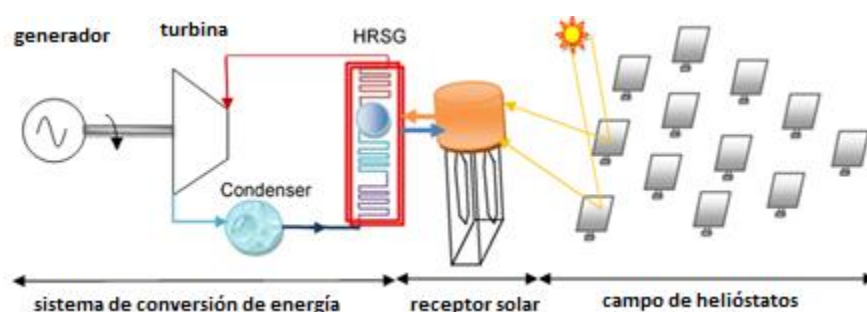


Figura 1.3 Sistema típico de torre central.

El campo de helióstatos es el subsistema principal, y su eficiencia óptica tiene un impacto significativo en el rendimiento de la planta de energía; que representa alrededor del 50% del costo total (Kolb, GJ, Jones, SA, Donnelly, MW, 2007) y sus pérdidas de energía anual es alrededor del 47% (William, BS, Micheal, G, 2001). Los receptores están formados por un material que soporta los cambios de alta temperatura y alta densidad de energía, tales como las aleaciones de cerámica y metal. Hay diferentes tipos de receptores que se pueden clasificar en tres grupos dependiendo de su funcionalidad y configuraciones geométricas. Los tres grupos son los receptores volumétricos, los receptores de cavidad y los receptores de partículas.

El rendimiento de CRS depende fuertemente de la eficiencia en el campo solar que a su vez está relacionado con el diseño de helióstatos, el diseño de campo, el sistema de seguimiento y el sistema de control.

En un CRS, el receptor solar es el intercambiador de calor donde la radiación solar es absorbida y transformada en energía térmica útil en los sistemas de conversión de energía. Hay diferentes criterios de clasificación de receptores solares, dependiendo de la configuración geométrica y de los materiales de absorción que se utilizan para transferir la energía al fluido de trabajo.

1.2. NANOFLUIDO

Los nanofluidos son una nueva clase de ingeniería de fluidos mediante la dispersión de materiales de tamaño nanométrico (nanopartículas, nanotubos, nano fibras, nano hilos, canoros, nanosheet o gotas) en fluidos base. En otras palabras, los nanofluidos son suspensiones coloidales a nano escala que contienen nano materiales condensados. Son sistemas de dos fases, (fase sólida) y en otro lado (fase líquida). Se han encontrado nanofluidos que poseen propiedades termofísicas mejoradas, tales como conductividad térmica, difusividad térmica, viscosidad, y los coeficientes de transferencia de calor por convección en comparación con la de los fluidos base como el aceite o agua. Se han demostrado grandes aplicaciones potenciales en muchos campos (Wei Yu, Huaqing Xie. 2011).

En los últimos años, los nanofluidos han atraído más y más la atención. La principal fuerza impulsora para la investigación de los nanofluidos se encuentra en una amplia gama de aplicaciones. La mayoría de las revisiones concernientes son de los estudios experimentales y teóricos de las propiedades termo-físicas o la transferencia de calor por convección de nanofluidos.

Los nanofluidos son una clase relativamente nueva de fluidos que se componen de un fluido base con partículas de tamaño nanométrico (1-100nm) suspendidas en su interior. Estas partículas, generalmente un metal u óxido de metal, aumentan la conducción y los coeficientes de convección, lo que permite una mayor transferencia de calor fuera del refrigerante (Choi SUS. 1995)

Así mismo los nanofluidos son fluidos potenciales de transferencia de calor con propiedades termofísicas mejoradas y un rendimiento en la transferencia de calor y pueden aplicarse en muchos dispositivos para un mejor rendimiento (es decir, la energía, la transferencia de calor, etc.). Basándose en los resultados disponibles en la literatura, se han encontrado nanofluidos que tienen una conductividad térmica mucho más alta y fuertemente dependiente de la temperatura en concentraciones de partículas muy bajas que en los fluidos convencionales. Esto puede ser considerado como uno de los parámetros clave para la mejora de situaciones para muchas de las aplicaciones de los nanofluidos. Sin embargo, son pocos los obstáculos y desafíos que han sido identificados y deben ser abordados cuidadosamente antes de que pueda aplicarse plenamente en las aplicaciones industriales (R. Saidur, K.Y. Leong, H.A. Mohammad, 2011).

En las últimas décadas, los rápidos avances en la nanotecnología han llevado a emerger la nueva generación de fluidos de transferencia de calor llamados "nanofluidos". Los nanofluidos se definen como una suspensión de nanopartículas en un fluido base. Los nanofluidos son suspensiones diluidas de nanopartículas funcionalizadas de materiales compuestos desarrollados hace una década con el objetivo específico de aumentar la conductividad térmica de los fluidos de transferencia de calor, que ahora se han desarrollado en una área nanotecnológica prometedora. Tales nanofluidos térmicos para aplicaciones de transferencia de calor representan una clase de su propia diferencia de los coloides convencionales para otras aplicaciones. En comparación con suspensiones sólido-líquido convencionales para intensificaciones de transferencia de calor, los nanofluidos poseen las siguientes ventajas (Choi SUS. 1995):

- Alta superficie específica y por lo tanto más superficie de transferencia de calor entre las partículas y fluidos.
- Alta estabilidad de dispersión con el movimiento browniano predominante de partículas.
- Reducción de la potencia de bombeo en comparación con un líquido puro para lograr la intensificación de transferencia de calor equivalente.

- Reducción de la obstrucción de partículas en comparación con las suspensiones convencionales, promoviendo así la miniaturización del sistema.
- Propiedades ajustables, incluyendo conductividad térmica y la humectabilidad de la superficie, variando las concentraciones de partículas para adaptarse a diferentes aplicaciones.

1.2.1. NANOPARTÍCULAS

Una nanopartícula (nanopolvo, nanoracimo, o nanocrystal) es una partícula microscópica con por lo menos una dimensión menor que 100 nm. Actualmente las nanopartículas son un área de intensa investigación científica, debido a una amplia variedad de aplicaciones potenciales en campos biomédicos, ópticos, y electrónicos. Las partículas están calificadas por su diámetro. Las partículas ultra finas son las mismas que las nanopartículas entre 1 y 100 nanómetros en tamaño. Las partículas gruesas cubren un rango de entre 2,500 y 10,000 nanómetros. Las partículas finas están entre los 100 y 2,500 nanómetros (Taylor, Robert, 2013).

Los investigadores han proporcionado excelentes ejemplos de nanómetros en comparación con milímetros y micrómetros para entender claramente cómo pueden verse las nanopartículas (Serrano E, Rus G, Martínez JG. 2009).

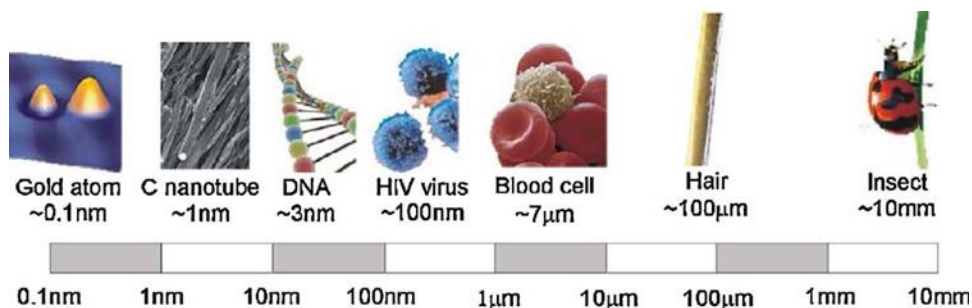


Figura 1.4 Comparativa de tamaños entre nm, micras y mm.

Las nanopartículas son de gran interés científico, de hecho, son un puente entre los materiales a granel y las estructuras atómicas o moleculares. Un material a granel debe tener propiedades físicas constantes, sin importar su tamaño. Así, las propiedades de los materiales cambian mientras su tamaño se aproxima a la nano-escala y conforme al porcentaje de átomos en la superficie de un material se vuelve significativo. Las propiedades interesantes y a veces inesperadas de las nanopartículas están ahí por la gran área de superficie del material, el cual domina las contribuciones hechas por los pequeños gruesos del material.

Las nanopartículas poseen frecuentemente propiedades ópticas inesperadas en tanto sean suficientemente pequeñas a confinar sus electrones y producir efectos cuánticos. Las nanopartículas de oro ebulen en temperaturas más bajas ($\sim 300^\circ\text{C}$ para 2.5 nm) que las láminas de oro (1064°C), (Buffat, Borel, 1976). La absorción de radiación solar es mayor en los materiales compuestos de nanopartículas que en sus capas finas de varias capas del material. En las aplicaciones de energía solar fotovoltaica y solar termal, controlando el tamaño, forma y material de las partículas, haciendo posible el control de la absorción solar (Taylor, Robert A; Phelan, Patrick E; Otanicar, Todd P; Adrian, Ronald; Prasher, Ravi 2011).

Las suspensiones de nanopartículas son posibles puesto que la interacción de la superficie de la partícula con el solvente es suficientemente fuerte para superar las diferencias de densidad, lo cual de otra manera resultaría en un material hundiéndose o flotando en un líquido.

El radio del volumen del área de superficie de las nanopartículas proveen una tremenda fuerza que conduce a la difusión, especialmente en temperaturas elevadas. La sinterización puede llevarse a cabo en temperaturas más bajas, en escalas de tiempos más cortos para partículas más largas. Se ha encontrado que las partículas del óxido de zinc tienen propiedades para bloquear rayos ultravioleta, comparado con su sustituto a granel. Esta es una de las razones por la cual se suele usar en la preparación de protectores solares y es completamente foto estable (Mitchnick, MA; Fairhurst, D; Pinnell, 1999).

Cuando se incorporan nanopartículas de arcilla en matrices de polímeros, incrementa el refuerzo, produciendo plásticos más fuertes, verificables por una temperatura de transición vítrea más alta y otros exámenes de propiedades mecánicas.

1.2.2. FLUIDO

Fluidos comunes tales como agua, etilenglicol, y el aceite de transferencia de calor juegan un papel importante en muchos procesos industriales, tales como la generación de energía, de calefacción o de procesos de enfriamiento, procesos químicos, y la microelectrónica. Sin embargo, estos fluidos tienen conductividad térmica relativamente baja y por lo tanto no puede alcanzar tasas de intercambio de calor en dispositivos de ingeniería térmicas. Una manera de superar esta barrera es el uso de partículas sólidas ultra finas en suspensión en los fluidos comunes para mejorar su conductividad térmica. La suspensión de partículas de tamaño nanométrico (1-100 nm) en un fluido base convencional se denomina nanofluido.

Choi utilizó por primera vez el término " nanofluido " en 1995 (U.S. Choi, 1995). Los nanofluidos, en comparación con suspensiones utilizando partículas de tamaño milimétrico o micrométrico, muestran una mejor estabilidad, propiedades reológicas, y conductividad térmica considerablemente mayor.

En los últimos años, muchos investigadores han investigado los efectos de los nanofluidos en el mejoramiento de la transferencia de calor en los dispositivos de ingeniería térmica, experimentalmente y teóricamente. Los investigadores también han aplicado una variedad de métodos de preparación con diferentes características y diferentes modelos utilizados para el cálculo de propiedades termo físicas de los nanofluidos es decir, conductividad térmica, viscosidad, densidad, capacidad de calor específico (Y. Li, J. Zhou, S. Tung, E. Schneider, S. Xi, 2009, J.H. Lee, S.H. Lee, C.J. Choi, S.P. Jang, S.U.S. Choi, 2010, A. Ghadimi, R. Saidur, H.S.C. 2011,

G. Ramesh, N.K. Prabhu, 2011, K. Khanafer, K. Vafai, 2011, J. Fan, L. Wang, 2011, R.S. Vajjha, D.K. Das, 2012, V. Trisaksri, S. Wongwises, 2007).

Algunos investigadores también han resumido los efectos de los nanofluidos sobre la transferencia de flujo y de calor en convección natural y convección forzada en diferentes sistemas (W. Daungthongsuk, S. Wongwises, 2007, S. Kakaç, Pramuanjaroenkij, 2009, L. Godson, B. Raja, D. Mohan, S. Wongwises, 2009, J. Sarkar, 2011).

El comportamiento térmico mejorado de los nanofluidos podría servir de base para una enorme innovación para la transferencia de calor, lo cual es de gran importancia para una serie de sectores industriales, incluyendo el transporte, la generación de energía, la micro fabricación, la terapia térmica para el tratamiento del cáncer, química y sectores metalúrgicos, así como calefacción, refrigeración, ventilación y aire acondicionado. Los nanofluidos también son importantes para la producción de materiales nano-estructurados para la ingeniería de fluidos complejos, así como para los aceites empleados en la limpieza de las superficies debido a su excelente humectación y el comportamiento de dispersión (Y. Ding *et al.*, 2007).

1.3. MATERIALES

1.3.1. Óxido de Cobre (CuO)

Intrínsecamente la alta resistencia a la corrosión hace que el cobre sea un metal ideal para los intercambiadores de calor de todo tipo, incluidos los sistemas de calefacción de agua solar. El nano cobre se puede utilizar en la fabricación de tintas de impresión que permiten patrones conductores que tienen que pasar a través de una película delgada, creando un camino de conductividad eléctrica para su uso en experimentos científicos, y también para crear circuitos imprimibles para

aplicaciones electrónicas. También en el agua, el nano cobre ha sido utilizado por lo menos desde 1931, como fungicida en el cultivo de la vid y árboles frutales, y como un alguicida en el tratamiento del agua de piscinas.

El nano óxido de cobre es un material ampliamente utilizado. Se ha aplicado para los catalizadores, materiales superconductores, materiales termoeléctricos, materiales sensores, vidrio, cerámica y otros campos (Zoubida Haddad, Chérifa Abid, Hakan F. Oztop, Amina Mataoui, 2013).

1.3.2. Níquel

Es un metal de transición, conductor de la electricidad y del calor, muy dúctil y maleable por lo que se puede laminar, pulir y forjar fácilmente. Es resistente a la corrosión y se suele utilizar como recubrimiento, mediante electro deposición. Reacciona con dificultad en medios agresivos. Su estado de oxidación más normal es +2. Puede presentar otros, se han observado estados de oxidación 0, +1 y +3 en complejos, pero son muy poco característicos.

Estas partículas metálicas, por ser más grandes que átomos individuales y moléculas, pero más pequeñas que el respectivo sólido másico obedecen tanto a la química cuántica como a las leyes de la física clásica, lo que las hace presentar propiedades (eléctricas, químicas, magnéticas, etc.) que difiere marcadamente del material másico. Cuando el tamaño del cristal es reducido, el número de átomos en la superficie del cristal con relación al número de átomos en el interior del mismo aumenta drásticamente. Esto se traduce en una superficie específica muy grande, lo cual implica que propiedades que usualmente son determinadas por la estructura molecular del sólido cristalino, ahora vienen siendo dominadas por los defectos estructurales presentes mayoritariamente en la superficie (G. Schmid, 1994, J. D. Aiken III, R. G. Finke, 1999).

1.4. APLICACIÓN DEL NANOFLUIDO

La nanotecnología está siendo utilizada o considerada para su uso en muchas aplicaciones específicas para proporcionar los suministros de energía y sus usos más limpios y más eficientes. Si bien muchas de estas aplicaciones pueden no afectar a la transmisión de energía directamente, cada una tiene el potencial de reducir la necesidad de utilización de electricidad, de combustible derivado del petróleo, de gas natural o de que otro modo serían movidos a través del sistema de transmisión de energía. La generación de energía más eficiente y el uso puede disminuir la cantidad de construcción, mantenimiento, reparación, y las actividades de desmantelamiento. Algunas de las áreas en que la nanotecnología puede integrarse con aplicaciones específicas de nanofluido son (Elcock D. 2007, Hindawi, 2009):

- Refrigeración de motores.
- Aceite de transmisión de motor.
- Camisas de agua refrigerantes para generadores eléctricos diésel.
- Calentamiento y enfriamiento de edificios.
- Enfriamiento de electrónica.
- Enfriamiento de soldadura.
- Refrigeración de sistemas nucleares.
- Calentamiento solar de agua.
- Nanofluidos en perforaciones.
- Refrigeración (refrigerador doméstico, refrigeradores).
- Láseres de alta potencia, tubos de microondas.
- Aplicaciones biomédicas.
- Lubricación.
- Almacenamiento térmico.

Inicialmente, la aplicación de nanofluidos en colectores y calentadores de agua son investigados por la eficiencia, la economía, y los aspectos medioambientales. Algunos estudios realizados sobre la conductividad térmica y propiedades ópticas

de los nanofluidos también se revisan brevemente, ya que estos parámetros pueden determinar la capacidad de los nanofluidos para mejorar el rendimiento de los sistemas solares (Omid Mahian, Ali Kianifar, Soteris A. Kalogirou, Ioan Pop, Somchai Wongwises, 2013).

Científicos estudiaron la posibilidad de los nanofluidos en el mejoramiento de la transferencia de calor en sistemas de refrigeración. Los autores concluyeron que se necesitan más estudios para encontrar las razones detrás de las mejoras considerables en la transferencia de calor que se produce en un aumento significativo de la presión (R. Saidur, S.N. Kazi, M.S. Hossain, M.M. Rahman, H.A. Mohammed, 2011).

Thomas y Sobhan presentaron estudios experimentales sobre nanofluidos, con énfasis en las técnicas de medición de la conductividad térmica efectiva (S. Thomas, C. Sobhan, 2011).

Escher y otros investigaron las aplicaciones de los nanofluidos en la electrónica de refrigeración (W. Escher, T. Brunschweiler, N. Shalkevich, A. Shalkevich, T. Burgi, B. Michel, D. Poulikakos, 2011).

Recientemente, las aplicaciones de simulaciones por ordenador y la dinámica de fluidos computacionales (CFD) que se utilizan para modelar sistemas que emplean nanofluidos fueron revisados y analizados por los científicos (O. Abouali, G. Ahmadi, 2012, A. Kamyar, R. Saidur, M. Hasanuzzaman, 2012).

Ahn y Kim también publicaron un comentario para el flujo de calor crítico de los nanofluidos tanto para aplicaciones de flujo de ebullición y ebullición convectiva (H.S. Ahn, M.H. Kim, 2012). En otra publicación se examinó las aplicaciones generales de los nanofluidos en algunos campos como la refrigeración de la electrónica, intercambiadores de calor, aplicaciones médicas, las pilas de combustible, los reactores nucleares, y muchos más. También mencionaron brevemente las aplicaciones de los nanofluidos en los calentadores de agua solares.

Se investigaron retos en el uso de nanofluidos, incluyendo un aumento de la caída de presión y potencia de bombeo, la estabilidad a largo plazo de las nanopartículas dispersadas y el alto costo de los nanofluidos (R. Saidur, K.Y. Leong, H.A. Mohammad, 2011).

Otra aplicación de los nanofluidos de flujo es en la entrega de nano-fármacos (C. Kleinstreuer, 2008).

Kostic reportó que los nanofluidos pueden ser utilizados en las siguientes áreas específicas (Kostic, 2009):

- Nanofluido de Transferencia de calor.
- Nanofluidos Tribológicos.
- Nanofluidos Tensioactivos y de recubrimiento.
- Nanofluidos Químicos.
- Nanofluidos para procesamiento / extracción.
- Nanofluidos Ambientales (limpieza de la contaminación).
- Bio Nanofluidos y farmacéuticos.
- Nanofluidos Médicos (administración de fármacos y la interacción de las células del tejido funcional).

Para este estudio, la aplicación se realizara como fluido de transferencia de calor el cual se implementara en un sistema de colector solar en un campo de helióstatos para la conversión de energía calorífica a energía eléctrica.

La energía solar es una de las mejores fuentes de energía renovable con el mínimo impacto ambiental. El colector solar de absorción directa convencional es una tecnología bien establecida, y se ha propuesto para una variedad de aplicaciones tales como calentamiento de agua; sin embargo, la eficacia de estos colectores están limitados por las propiedades de absorción del fluido de trabajo, que es muy pobre para los fluidos típicos usados en colectores solares.

Recientemente, esta tecnología se ha combinado con las tecnologías emergentes de nanofluidos y suspensiones de nanopartículas en líquidos para crear

una nueva clase de colectores solares a base de nanofluidos (Wei Yu, Huaqing Xie, 2011).

1.5. TRANSFERENCIA DE CALOR (CONDUCTIVIDAD TÉRMICA)

Las aplicaciones de los nanofluidos en industrias tales como dispositivos de intercambio de calor parecen prometedoras con el mejoramiento de la transferencia de calor por convección. Sin embargo, el desarrollo y las aplicaciones de los nanofluidos pueden ser obstaculizados por varios factores tales como la estabilidad a largo plazo, el aumento de la potencia de bombeo y la caída de presión, el rendimiento térmico de los nanofluidos en un flujo turbulento y la región completamente desarrollada, menor calor específico de los nanofluidos y mayor costo de producción de los nanofluidos.

En la literatura una serie de revisiones en las propiedades térmicas y reológicas, diferentes modos de transferencia de calor se han reportado por muchos investigadores.

La conductividad térmica de los nanofluidos es considerada para ser una característica atractiva para muchas aplicaciones. Se representa la capacidad del material para conducir o transmitir calor.

El advenimiento de los procesos de flujo de alta temperatura ha creado una importante demanda de las nuevas tecnologías para mejorar la transferencia de calor. Además, hay un creciente interés en la mejora de la eficiencia de los procesos de transferencia de calor existentes. Hay muchos métodos disponibles para mejorar la transferencia de calor en los procesos. El flujo de calor en un proceso puede ser calculado basado en (Beck M. 2008):

$$Q = hAT \quad (1)$$

Donde **Q** es el flujo de calor, **h** es el coeficiente de transferencia de calor, **A** es el área de transferencia de calor, y **T** es la diferencia de temperatura que resulta en

el flujo de calor. Se puede afirmar a partir de esta ecuación que el aumento de la transferencia de calor se puede conseguir por:

(I) el aumento de **T**

(II) el aumento de **A**

(III) el aumento de **h**

Una diferencia de temperatura mayor **T** puede llevar a aumentar el flujo de calor, pero **T** es a menudo limitada por procesos o limitaciones de materiales. Por ejemplo, la temperatura máxima en un reactor nuclear debe mantenerse por debajo de un determinado valor para evitar reacciones fuera de control y fusión. Por lo tanto, el aumento de **T** sólo se puede lograr por la disminución de la temperatura del refrigerante (Beck M. 2008).

Maximizar el área de transferencia de calor **A** es una estrategia común para mejorar la transferencia de calor, y muchos intercambiadores de calor, como radiadores e intercambiadores de calor de placa y marco están diseñados para maximizar el área de transferencia de calor (Beck M. 2008).

El mejoramiento de transferencia de calor también se puede lograr mediante el aumento del coeficiente de transferencia de calor **h**, ya sea mediante el uso de métodos de transferencia de calor más eficientes, o mediante el mejoramiento de las propiedades de transporte del material de transferencia de calor.

Existe un equilibrio entre los costos de bombeo y transferencia de calor. Como el área aumenta, también lo hace la energía necesaria para pasar el fluido a través del intercambiador. El aumento adicional de área de transferencia de calor requiere aumentar el tamaño del sistema de gestión térmica. Un enfoque atractivo para el diseño del intercambiador de calor es desarrollar nuevos fluidos de transferencia de calor de alta eficiencia (Yang Y. 2006).

La nanotecnología puede ayudar a acelerar el desarrollo de la calefacción de alta eficiencia energética. Cuando se añade al agua, nanotubos de carbón se dispersan para formar un nanofluido. Los investigadores han desarrollado

nanofluidos cuyas tasas de transferencia de calor por convección forzada son cuatro veces mejor que la norma mediante el uso de nanotubos de carbono (Elcock D. 2007).

La conductividad térmica de los nanofluidos es uno de los campos más estudiados debido a su gran cantidad de aplicaciones y mejoras de procesos. Saidur et al. (2011) han reportado mejoras del 40% de la conductividad térmica utilizando nanopartículas de cobre en etilenglicol, además han obtenido un aumento del 23.8% en nanofluidos de cobre y agua. Se ha podido verificar que la conductividad térmica aumenta con la fracción en volumen de las nanopartículas y decrece con el tiempo transcurrido. Utilizando nanotubos de carbón se han obtenido resultados mucho mayores, pero además se incrementó la viscosidad del fluido, se han obtenido valores de aumento del 75% utilizando nanopartículas de diamante en etilenglicol con un diámetro de 30 y 50 nm. Entre los factores que afectan a la conductividad térmica de los nanofluidos se encuentran el pH y la adición de surfactante en la etapa de preparación, por lo que una óptima combinación de estos factores puede mejorar la conductividad térmica. Se ha reportado que el aumento de conductividad térmica en nanofluidos de ZnO fue no lineal en comparación con la fracción en volumen, además de que depende del tamaño de las nanopartículas, la temperatura y la concentración, y se ha concluido que sería más beneficioso usar nanofluidos en altas temperaturas.

1.5.1. CÁLCULO DE DENSIDAD Y CALOR ESPECÍFICO EN NANOFLUIDOS

El calor específico y la densidad de los nanofluidos se calcularán usando los modelos descritos por Zhang (2007), para esto se presentan las siguientes ecuaciones.

$$\rho_{eff} = \rho_p \phi_v + \rho_f (1 - \phi_v)$$

$$\phi_v = \frac{\phi_w \rho_f}{\rho_p + \phi_w \rho_f - \phi_w \rho_p}$$

$$C_{p,eff} = C_{p,p} \phi_w + C_{p,f} (1 - \phi_w)$$

En donde Φ_v es la fracción en volumen de las nanopartículas, Φ_w es la fracción en peso de las partículas, ρ_f y ρ_p son la densidad del fluido y las partículas respectivamente, $C_{p,p}$ y $C_{p,f}$ representan el calor específico de: las partículas y el fluido, en ese orden (Tesis Daniel Guerra Garcés, 2012).

1.6. TRANSFERENCIA DE CALOR PRINCIPIOS BÁSICOS

El calor se define como la forma de energía que puede ser transferida de un sistema a otro como resultado de una diferencia de temperatura. El calor siempre fluye desde una región de mayor temperatura hacia una región de menor temperatura, y la transferencia de calor se detiene cuando se llega al equilibrio térmico. Existen tres modos básicos de transferencia de calor: conducción, radiación y convección (Çengel, 2007).

1.6.1. CONDUCCIÓN

La conducción es el modo de transferencia de calor en forma molecular desde una parte de un cuerpo a mayor temperatura hacia otra parte del mismo a menor temperatura, o desde un cuerpo a mayor temperatura que esté en contacto físico con otro a menor temperatura (Rohsenow et al., 1998).

El flujo de calor q'' (W/m²) por conducción es proporcional al gradiente de temperatura y se define como la siguiente ecuación.

$$q'' = -k \frac{dT}{dx}$$

En donde k (W/m·K) es la conductividad térmica, la cual es una medida de la habilidad del material para conducir calor, T (°C) es la temperatura y x (m) es el

grosor de la pared. La transferencia de calor por conducción $\dot{Q}$ (W) está dada por la ecuación siguiente.

$$\dot{Q} = -kA \frac{dT}{dx}$$

Esta ecuación es llamada Ley de Fourier en una dimensión y el signo menos denota el hecho de que la transferencia de calor se da en la dirección de disminución de la temperatura. Considerando la transferencia de calor constante e integrando la ecuación se obtiene la siguiente ecuación.

$$\dot{Q} = \frac{T_1 - T_2}{\Delta x / kA} = \frac{T_1 - T_2}{R_{th}}$$

En donde $R_{th} = \Delta x / kA$ (K/W) se puede considerar como una resistencia térmica y se la puede relacionar con la Ley de Ohm de la teoría de circuitos eléctricos. Esta analogía se usa para resolver problemas complejos en donde se tienen resistencias en serie o en paralelo.

Para sistemas cilíndricos y en estado estable de longitud (L) con conductividades térmicas constantes, la transferencia de calor se expresa a continuación como la expresión:

$$\dot{Q} = \frac{2\pi Lk}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} (T_1 - T_2)$$

En esta ecuación r_1 y r_2 (m) son los radios de la sección anular, la resistencia térmica para estos sistemas cilíndricos se expresa como R_{th} de la ecuación siguiente.

$$R_{th} = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi Lk}$$

1.6.2. CONVECCIÓN

La Convección es el modo de transferencia de calor que relaciona el calor de una superficie límite con un fluido en movimiento, o el calor transferido a través de un plano en el interior de un fluido en movimiento. Si el movimiento del fluido se realiza con una bomba, un ventilador, viento o cualquier aparato similar, el proceso se denomina convección forzada. Si el movimiento del fluido se da como resultado de la diferencia de densidad producido por la diferencia de temperatura, el proceso se llama convección natural (Rohsenow et al., 1998). Para expresar el efecto global de la convección se usa la Ley de Enfriamiento de Newton

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

Donde ***h*** es el coeficiente de transferencia de calor por convección en W/m²·K, ***A_s*** (m²) es el área de la superficie donde se produce la transferencia de calor, ***T_s*** (°C) es la temperatura de la superficie y ***T_∞*** (°C) es la temperatura del fluido lo suficientemente lejos de la superficie.

El coeficiente ***h*** es función de la geometría, de las propiedades físicas y de la velocidad del fluido, se lo puede calcular analíticamente para algunos procesos, pero para situaciones complejas se lo debe determinar experimentalmente. La resistencia térmica en la transferencia de calor por convección es ***R_{HT} = 1 / hA_s*** que representa la resistencia entre la superficie y el líquido o fluido de trabajo.

1.6.3. RADIACIÓN

La transferencia de calor por radiación, a diferencia de la conducción y convección, no requiere de la presencia de un medio material, por lo que se puede producir en el vacío. La energía emitida por la materia en forma de ondas electromagnéticas (o también llamados fotones) se denomina radiación térmica y se debe a su energía interna y su temperatura, cualquier cuerpo que se encuentre a mayor temperatura que el cero absoluto emite radiación térmica. Este tipo de energía se encuentra dentro del espectro electromagnético, por ejemplo la visión humana se encuentra en longitudes de onda entre 0.39 y 0.78 μm mientras que la radiación térmica ocurre entre 0.1 y 100 μm (Rohsenow et al., 1998).

El cálculo de la radiación térmica se basa en la Ley de Stephan-Boltzmann, la cual relaciona el flujo de energía emitido por un irradiador ideal (superficie negra) con la temperatura absoluta a la cuarta potencia.

$$\dot{Q} = \sigma A_s T_s^4$$

En donde $\sigma = 5.17 \times 10^{-8} \text{ W / (m}^2 \cdot \text{K}^4)$ es la constante de Stephan-Boltzmann, A_s (m^2) es el área de la superficie a estudiar y T_s es la temperatura de la superficie ($^\circ\text{C}$), en la realidad las superficies reales no se pueden considerar como un irradiador ideal, por lo que emiten menos energía y la ecuación anterior queda como lo muestra la siguiente ecuación:

$$\dot{Q} = \epsilon \sigma A_s T_s^4$$

En donde ϵ es la emisividad de la superficie, la cual es una medida de cuanto se puede aproximar una superficie a ser una superficie negra y tiene valores entre 0 y 1, siendo $\epsilon=1$ para una superficie negra.

Cuando una superficie se encuentra rodeada por una superficie mucho más grande separada por un gas como el aire, la transferencia de radiación térmica neta entre las superficies se calcula con la ecuación siguiente.

$$\dot{Q} = \varepsilon \sigma A_s (T_s^4 - T_\infty^4)$$

1.6.4. ANTECEDENTES DE TRANSFERENCIA DE CALOR DE LOS NANOFLUIDOS

Los datos experimentales concerniente al uso de nanofluidos en un intercambiador de calor comercial confirmaron que, además de las propiedades físicas, el tipo de flujo (laminar o turbulento) en el interior del equipo de intercambio de calor juega un papel importante en la eficiencia de un nanofluido. Cuando el equipo de intercambio de calor opera en condiciones que promueven la turbulencia, el uso de nanofluidos es beneficioso si y sólo si el aumento de su conductividad térmica es acompañada por un aumento marginal en la viscosidad, que parece muy difícil de lograr. Por otro lado, si el intercambiador de calor opera en condiciones laminares, el uso de nanofluidos parece ventajoso, los únicos inconvenientes están tan lejos como su alto precio y la inestabilidad potencial de la suspensión. Las correlaciones empíricas que caracterizan los procesos de transferencia de calor parecen ser fiables para el coeficiente de transferencia de calor convectivo predichos en el caso de nanofluidos bajo la condición de que se proporcionan valores precisos de las propiedades físicas. Las propiedades de los nanofluidos se deben definir cuidadosamente con el fin de evaluar su eficacia en un intercambiador de calor específico (Pantzali MN, Mouza AA, Paras SV. 2009).

Investigadores como Eastman encontraron que la conductividad térmica de 0.3% de nanopartículas de cobre dispersas en un fluido de etilenglicol aumenta hasta un 40% la eficiencia en comparación con un fluido base. Los autores destacaron que, esta propiedad tiene un papel importante en la construcción de los

equipos de transferencia de calor eficiente de la energía (Eastman JA, Choi SUS, Li S, Yu W, Thompson LJ.2001).

Liu et al., investigaron la conductividad térmica de los nanofluidos en agua de cobre producidos por el método de reducción química. Los resultados mostraron un 23.8% de mejoría en fracción de volumen de 0.1% de las partículas de cobre. Mayor conductividad térmica y mayor área de superficie de nanopartículas de cobre se atribuyen a esta mejora (Liu M-S, Lin MC-C, Tsai CY, Wang C-C. 2006).

Hwang et al., sugirieron que el mejoramiento de la conductividad térmica de los nanofluidos está fuertemente influenciado por la conductividad térmica de las nanopartículas y el fluido base. Por ejemplo, la conductividad térmica del agua con dispersión de nanotubos de carbono de múltiples paredes tienen notablemente más alta conductividad térmica en comparación con las nanopartículas de SiO₂ en el mismo fluido base (Hwang YJ, Ahn YC, Shin HS, Lee CG, Kim GT, Park HS. 2006).

Yoo et al., argumentan que la relación de superficie a volumen de las nanopartículas es un factor dominante que influye en la conductividad térmica de los nanofluidos en lugar de la conductividad térmica de las nanopartículas. La relación de superficie a volumen se incrementa con tamaños más pequeños de las nanopartículas (Yoo D-H, Hong KS, Yang H-S. 2007).

Los científicos Choi et al., informaron de una mejora de la conductividad térmica de 150% de poli aceite (olefina) con la adición de nanotubos de carbono de pared múltiple (del inglés MWCNT) en fracción de volumen de 1% (Choi SUS, Zhang ZG, Yu W, Lockwood FE, Grulke EA. 2001).

Del mismo modo, se informaron de una mejora de la conductividad térmica de 200% para poli aceite (olefina) que contiene 0.35% en fracción de volumen con (MWCNT). Es importante señalar que esta mejoría en la conductividad térmica fue acompañado por un aumento de tres órdenes de magnitud en la viscosidad (Yang Y. 2006).

Se encontró una mejora de la conductividad térmica de 40% de etilen glicol con 0.3% en fracción volumen de nanopartículas de cobre (diámetro 10 nm), aunque

los autores añaden aproximadamente 1% en fracción volumen de ácido tioglicólico para ayudar en la dispersión de las nanopartículas. La adición de este dispersante produjo una mayor conductividad térmica que la misma concentración de las nanopartículas en el etilen glicol sin el dispersante (Eastman JA, Choi SUS, Li S, Yu W, Thompson LJ.2001).

Científicos midieron la conductividad térmica de un cobre similar contenido en un nano fluido, excepto que el fluido base era agua y el dispersante utilizado fue sal de laurato. Los autores observaron una mejoría de la conductividad térmica en 70% para 0.3% en fracción volumen de nanopartículas de Cu en agua (Jana S, Salehi-Khojin A, Zhong WH. 2007).

Se informó también sobre una mejora en la conductividad térmica de 75% en etilen glicol con 1.2% en fracción volumen de nanopartículas de diamante entre 30 y 50 nm de diámetro (Kang HU, Kim SH, Oh JM. 2006).

A pesar de los resultados notables, algunos investigadores han medido la conductividad térmica de los nanofluidos y no han encontrado resultados anómalos. Además, esos resultados a menudo se pueden predecir por los modelos de conductividad térmica convencionales (Zhang X, Gu H, Fujii M. 2006, 2007, Timofeeva EV, Gavrilov AN, McCloskey JM, Tolmachev YV, Sprunt S, Lopatina LM, et al., 2007).

Lee et al., reveló que la conductividad térmica de los nanofluidos se ve afectada por el nivel de pH y la adición de surfactante durante la etapa de preparación de los nanofluidos. Una mejor dispersión de las nanopartículas se logra con la adición de un agente tensioactivo tal como dodecil benceno sulfonato de sodio. La combinación óptima de pH y tensioactivo conduce a 10.7% de mejora de la conductividad térmica en nanofluidos de Cu/H₂O (Lee J-H, Hwang KS, Jang SP, Lee BH, Kim JH, Choi SUS, et al., 2008).

La conductividad térmica de nanofluidos de ZnO con base de etilen glicol medidos con la técnica transitoria corta de hilo caliente demostró que aumentan de

forma no lineal con la fracción de volumen de las nanopartículas (Yu W, France DM, Choi SUS, Routbort JL. 2007).

El investigador Mintsu añadió que la conductividad térmica de los nanofluidos también depende de las nanopartículas y de la temperatura (Mintsu HA, Roy G, Nguyen CT, Doucet D. 2009). Vajjha y Das concuerdan que la conductividad térmica es dependiente no sólo de la concentración de las nanopartículas, sino también de la temperatura. Los autores concluyen que, será más beneficioso si los nanofluidos se utilizan en aplicaciones de alta temperatura (Vajjha RS, Das DK. 2009).

El valor aumenta con la concentración de partículas. La temperatura, tamaño de partícula, dispersión y la estabilidad juegan un papel importante en la determinación de la conductividad térmica de los nanofluidos (Murshed SMS, Leong KC, Yang C. 2009).

Las investigaciones han demostrado que la conductividad térmica y el coeficiente de transferencia de calor por convección del fluido se pueden mejorar en gran medida con la suspensión de nanopartículas (Choi SUS. 1995, Xuan YM, Roetzel W. 2000, Choi SUS, Yu W, Hull JR, Zhang ZG, Lockwood FE. 2001, Keblinski P, Nayak SK, Zapol P. 2002).

Se ha observado que la mayoría de los autores están de acuerdo en que los nanofluidos proporcionan una mayor conductividad térmica en comparación con los fluidos base.

1.7. ANTECEDENTES

La escasez de combustibles fósiles y las consideraciones ambientales motivó a los investigadores a utilizar fuentes de energía alternativas como la energía solar. Por lo tanto, es esencial para mejorar la eficiencia y el rendimiento (Omid Mahian, Ali Kianifar, Soteris A. Kalogirou, Ioan Pop, Somchai Wongwises, 2013).

El uso de los sistemas de energía solar térmica, en casi todos los trabajos realizados sobre las aplicaciones de los nanofluidos en energía solar es con respecto a sus aplicaciones en los colectores y calentadores de agua solares. Por lo tanto, una parte importante es asignada a los efectos de los nanofluidos sobre el rendimiento de los colectores solares y calentadores solares de agua en la eficiencia, la economía y las consideraciones ambientales. Además, algunos investigadores reportaron trabajos sobre las aplicaciones de los nanofluidos de almacenamiento térmico de energía, las células solares y los destiladores solares. Se hacen algunas sugerencias para usar los nanofluidos en diferentes sistemas de energía solar térmica, como los sistemas fotovoltaicos / térmicos, estanques solares, células solares termoeléctricas y se discuten los retos de la utilización de nanofluidos en dispositivos de energía solar.

En los últimos años, el uso de la energía solar ha tenido un auge notable. La escasez percibida de los combustibles fósiles, así como las consideraciones ambientales limitarán el uso de combustibles fósiles en el futuro. Por lo tanto, los investigadores están motivados para encontrar fuentes alternativas de energía. Esto se ha vuelto aún más popular con el aumento de precio de los combustibles fósiles. La tierra recibe en apenas alrededor de 1 h más energía del sol que la consumida por el mundo entero durante 1 año. La mayoría de las aplicaciones de energía solar son financieramente viables mientras que los pequeños sistemas para uso individual requieren sólo unos pocos kilovatios de potencia (M. Thirugnanasambandam, S. Iniyan, R. Goic, 2010, A. Sharma, 2011).

Es importante aplicar la energía solar a una amplia gama de aplicaciones y proporcionar soluciones a través de la modificación de la proporción de energía, mejorando la estabilidad de la energía, el aumento de la sostenibilidad de la energía, y la mejora de la eficiencia del sistema (S. Mekhilef, R. Saidur, A. Safari, 2011).

Científicos informaron los resultados experimentales sobre colectores solares basados en nanofluidos hechos de una variedad de nanopartículas (CNTs, grafito y plata) (T. P. Otanicar, P. E. Phelan, R. S. Prasher, G. Rosengarten, R. A. Taylor, 2010). La mejora de la eficiencia fue hasta el 5% en los colectores térmicos solares

utilizando nanofluidos como los medios de absorción. Además, se compararon los datos experimentales con un modelo numérico de un colector solar con nanofluidos de absorción directa. Los resultados experimentales y numéricos demostraron un aumento inicial rápido en la eficiencia con la fracción de volumen, seguido por una estabilización en la eficiencia con fracción de volumen en aumento. La investigación teórica sobre la viabilidad de la utilización de un colector solar de absorción directa no concentrada mostró que la presencia de nanopartículas aumenta la absorción de la radiación incidente por más de nueve veces que la del agua pura (H. Tyagi, P. Phelan, R. Prasher, 2009). Bajo condiciones de operación similares, la eficiencia de absorción de un colector solar usando nanofluidos como fluido de trabajo se encontró que era de hasta 10% más alta (sobre una base absoluta) que la de un colector de placa plana.

Se evaluaron los impactos económicos y ambientales globales de la tecnología en contraste con los colectores solares convencionales que utilizan la metodología de evaluación del ciclo de vida (T. P. Otanicar, J. S. Golden, 2009). Los resultados mostraron que para el costo actual de nanopartículas del colector solar a base de nanofluidos tenía un periodo de recuperación ligeramente más largo, pero al final de su vida útil tiene el mismo ahorro económico como un colector solar convencional.

El investigador Sani ha investigado las propiedades ópticas y térmicas de los nanofluidos que consisten en suspensiones acuosas de nano-cuernos de carbono de pared simple. Las diferencias observadas en las propiedades ópticas de las nanopartículas inducidas parecieron prometedoras, lo que lleva considerablemente a una mayor absorción de la luz solar. Tanto estos efectos, junto con la posible funcionalización química de los nano-cuernos de carbono, hacen de este nuevo tipo de nanofluidos muy interesantes para aumentar la eficiencia global de los dispositivos de explotación de la luz solar (E. Sani, S. Barison, C. Pagura, 2010).

Científicos investigaron teóricamente los efectos de diferentes parámetros sobre la eficiencia de un colector solar de absorción directa basada con nanofluidos a baja temperatura (DAC), donde el fluido de trabajo es una mezcla de

nanopartículas de agua y de aluminio (H. Tyagi, P. Phelan, R. Prasher, 2009). La eficiencia del colector se obtiene por la siguiente ecuación:

$$\eta = \frac{\text{useful gain}}{\text{available energy}} = \frac{\dot{m}c_p(\bar{T}_{out} - \bar{T}_{in})}{AG_T}$$

Donde $\dot{m}$ es la tasa de flujo de masa del fluido que fluye a través del colector; c_p es el calor específico; T_{in} y T_{out} son las temperaturas de entrada y de salida del fluido respectivamente. A es el área de la cubierta del colector, y G_T es el flujo solar incidente sobre el colector solar. En el análisis, asumieron que los valores de T_{in} , G_T , y $\dot{m}$ sean 35 °C, 1000 W / m², y 1,2 kg / s, respectivamente.

Los investigadores Tyagi, Phelan y Prasher, trazan la variación de la eficiencia del colector como una función de la fracción de volumen de partículas (%), donde la fracción de volumen varía de 0.1% a 5%. Sus resultados mostraron que mediante la adición de nanopartículas para el fluido de trabajo, los aumentos de eficiencia son notablemente remarcados para valores bajos de fracción de volumen de las nanopartículas. Ellos atribuyeron el aumento de la eficiencia del colector al aumento de la atenuación de la luz solar que pasa a través del colector debido a la adición de nanopartículas que conduce al aumento de la eficiencia del colector (H. Tyagi, P. Phelan, R. Prasher, 2009). Sin embargo, para una fracción de volumen mayor que 2%, la eficiencia permanece casi constante, por lo que la adición de más nanopartículas no es beneficioso. Ellos investigaron también los efectos de las nanopartículas sobre el tamaño de la eficiencia del colector, donde la fracción de volumen es igual a 0.8%. Los resultados revelaron que la eficiencia aumenta ligeramente con un aumento en el tamaño de las nanopartículas (H. Tyagi, P. Phelan, R. Prasher, 2009).

Por otro lado se investigaron tanto experimental y numéricamente los efectos de diferentes nanofluidos (nanotubos de carbono, grafito y plata) en el rendimiento de un colector solar de absorción directa micro escala (DASC). Los datos DASC se comparan con una configuración de colector convencional en la que la energía solar

es absorbida en una superficie de la placa de color negro (T. P. Otanicar, P. E. Phelan, R. S. Prasher, G. Rosengarten, R. A. Taylor, 2010).

En 2010 se comparó un sistema concentrador solar térmico a base de nanofluidos con uno convencional. Sus resultados muestran que el uso de un nanofluido en el receptor puede mejorar la eficiencia en un 10% (R.A. Taylor, P.E. Phelan, T.P. Otanicar, C.A. Walker, M. Nguyen, S. Trimble, R. Prasher, 2011). También concluyeron que las plantas de energía de 10-100 MWe, utilizando un nanofluido de grafito/therminol VP-1 con fracciones de volumen de aproximadamente a 0.001% o menos podría ser beneficiosa. Los autores estimaron que combinando un receptor con nanofluido con una torre de energía solar térmica con una capacidad de 100 MWe de operación como la instalada en Tucson, Arizona, podría generar \$ 3,5 millones de dólares más por año (R.A. Taylor, P.E. Phelan, T.P. Otanicar, C.A. Walker, M. Nguyen, S. Trimble, R. Prasher, 2011).

Se investigaron las características de conversión de calor-luz de dos nanofluidos, TiO_2 -agua y nanotubos de carbono-agua (CNT), en un colector solar de tubos de vacío en condiciones meteorológicas como días soleados y nublados. Los resultados experimentales muestran características de conversión de calor-luz muy buena del nanofluido con nano tubos de carbón y agua (CNT- H_2O) con la concentración en peso del 0.5% (Y. He, S. Wang, J. Ma, F. Tian, Y. Ren, 2011). Debido a las mejores características de conversión de calor-luz del nanofluido (CNT- H_2O) en comparación con el nanofluido TiO_2 - H_2O , la temperatura del nanofluido (CNT- H_2O) es mayor que la del TiO_2 - H_2O . Esto significa que el nanofluido (CNT- H_2O) es más adecuado que el TiO_2 - H_2O para ser utilizado en un colector solar con tubos de vacío (Y. He, S. Wang, J. Ma, F. Tian, Y. Ren, 2011).

Otros investigadores estudiaron los efectos de tres diferentes nanofluidos, Al_2O_3 /agua, ZnO /agua, y MgO /agua, en el rendimiento de un colector solar tubular. Sus resultados muestran que el nano fluido de ZnO - H_2O con concentración de volumen de 0.2% es la mejor selección para el colector (Y. Li, H. Xie, W. Yu, J. Li, 2011).

Taylor et al., investigaron la caracterización de propiedades ópticas del grafito, plata, cobre, oro, y nanopartículas de aluminio en agua y VP1 como fluido base para determinar su potencial para ser utilizado en los colectores solares de absorción directa. Se reveló que más del 95% de la luz solar entrante puede ser absorbida (en un nanofluido con espesor mayor o igual que 10 cm) con fracción de volumen de nanopartículas muy bajos menos de 1×10^{-5} (R.A. Taylor, P.E. Phelan, T.P. Otanicar, R. Adrian, R.P. Prasher, 2011).

En Estados Unidos científicos investigaron teóricamente nanofluidos base para un concentrador de un colector solar parabólico (NCPSC) y se compararon los resultados obtenidos con los resultados experimentales de un concentrador de un colector solar parabólico convencional que opera bajo condiciones similares a base de nanofluidos. Estos utilizan nanopartículas de aluminio con 0.05% en fracción volumen suspendidas en therminol VP-1 como fluido de base para el análisis. Ellos encontraron que la eficiencia térmica del (NCPSC) en comparación con un colector solar parabólico convencional es aproximadamente 5-10% superior en las mismas condiciones climáticas (V. Khullar, H. Tyagi, P.E. Phelan, T.P. Otanicar, H. Singh, R.A. Taylor, 2012).

Experimentalmente se ha investigado los efectos de Al_2O_3 en un nanofluido/agua en la eficiencia de un colector solar de placa plana. Se examinaron los efectos de dos fracciones de peso diferentes de los nanofluidos, incluyendo 0.2% y 0.4%, donde el diámetro de las partículas era de 15 nm. Además, se estudiaron los efectos sobre la eficiencia de Triton X-100 utilizado como un agente tensioactivo (T. Yousefi, F. Veysi, E. Shojaeizadeh, S. Zinadini, 2012). También se llevaron a cabo los experimentos utilizando una configuración esquemática, sus resultados son los siguientes:

1. La eficiencia del colector solar con fracción en peso 0.2% del nanofluido es mayor que con el agua por 28.3%.

2. Para un amplio rango del parámetro de reducción de temperatura $(T_i - T_a)/G_T$, la eficiencia del colector con 0.2% en peso el Nanofluido es mayor en comparación con 0.4% en peso.
3. El uso de tensioactivos conduce a una mejora de 15.63% de la eficiencia.

Más tarde, utilizando la misma configuración experimental como en su trabajo anterior, examinaron los efectos de los nanotubos de carbono de pared múltiple en un nanofluido en agua (MWCNT) en la eficiencia del colector de placa plana (T. Yousefi, F. Veysi, E. Shojaeizadeh, S. Zinadini, 2012).

En otro estudio, investigaron los efectos de la variación del pH del nanofluido con nanotubos de carbón (MWCNT) en agua sobre la eficiencia del colector de placa plana. Utilizaron 0.2% en peso de (MWCNT) con diversos valores de pH 3.5, 6.5, y 9.5 y Triton X-100 como un aditivo. Se encontraron que una mayor diferencia entre el pH de nanofluido y el pH del punto isoeléctrico conduce a una mayor eficiencia. El punto isoeléctrico es el punto en el que las moléculas no llevan ninguna carga eléctrica. Para los nanotubos de carbón (MWCNT), el pH del punto isoeléctrico es 7.4 (T. Yousefi, F. Veysi, E. Shojaeizadeh, S. Zinadini, 2012).

Algunos de los trabajos se revisan en el que el potencial de los nanofluidos para su uso en el sistema de energía solar se lleva a cabo a través del estudio de las propiedades ópticas y conductividad térmica de los nanofluidos.

Expertos revisaron las propiedades ópticas de nanopartículas de oro. En particular, estudiaron las propiedades de forma y tamaño de la dependencia radiactiva y foto térmicos de nano cristales de oro (S. Link, M.A. El-Sayed, 2000).

Khlebtsov investigó los efectos del tamaño, la forma y estructura de las nanopartículas de oro y de plata en las propiedades ópticas de los nanofluidos y percibido que la forma y tamaño de la nanopartícula tienen un gran efecto sobre las propiedades ópticas de un nanofluido (N. Khlebtsov, L. Trachuk, A. Mel'nikov, 2005).

Se informó de la caracterización óptica de un nuevo fluido formado por nanotubos semi cerrados de carbono de una sola pared y etilenglicol para aplicaciones de energía solar. Llegaron a la conclusión de que los nano cuernos de carbono podrían mejorar notablemente la absorción de luz del sol con respecto al fluido base puro. Los resultados obtenidos se compararon con los obtenidos para los fluidos con suspensión de formas más convencionales de carbono, es decir, partículas de carbono negras. Se encontraron que los nano cuernos con características espectrales son considerablemente más favorables que las de carbono amorfo para una aplicación específica. Este resultado muestra que el uso de nanofluidos con base en nano cuernos de carbono en los dispositivos solares térmicos conduce al mejoramiento de la eficiencia y compacticidad en los sistemas (E. Sani, L. Mercatelli, S. Barison, C. Pagura, F. Agresti, L. Colla, P. Sansoni, 2011).

Mercatelli investigó el potencial de los nano cuernos de carbono de una sola pared con dos fluidos base diferentes, incluyendo agua y glicol. Sus mediciones mostraron que estos nanofluidos son muy adecuados para los dispositivos de absorción solar directa porque sólo alrededor del 5% del total de la extinción es diseminado por partículas de SWCNH (L. Mercatelli, E. Sani, G. Zaccanti, F. Martelli, D.P. Ninni, S. Barison, C. Pagura, F. Agresti, D. Jafrancesco, 2011, L. Mercatelli, E. Sani, D. Fontani, G. Zaccanti, F. Martelli, D.P. Ninni, 2011).

En otro trabajo, Mercatelli aplica una sencilla espectrofotometría para estimar el albedo de dispersión espectral del nanofluido con SWCNHs/agua (L. Mercatelli, E. Sani, A. Giannini, D.P. Ninni, F. Martelli, G. Zaccanti, 2012).

Por otro lado se investigó el potencial del nanofluido de aluminio/agua para utilizar en colectores solares de absorción directa. Los investigadores llegaron a la conclusión de que el nanofluido de aluminio/agua con fracción de volumen de 1% mejora considerablemente la absorción solar de modo que es una solución fina para un colector solar de luz directa. Para utilizar el nanofluido sugirieron, aunque el tamaño de partícula no tiene efecto sobre el coeficiente de extinción del nanofluido, con el fin de tener la dispersión de Rayleigh el tamaño de las nanopartículas debe

ser inferior a 20 nm. También encontraron que el coeficiente de extinción varía linealmente con la fracción de volumen (R. Saidur, T.C. Meng, Z. Said, M. Hasanuzzaman, A. Kamyar, 2012).

Científicos presentan un trabajo teórico y experimental combinado para optimizar la eficiencia de receptores solares con base líquida el cual se sembró con nanopartículas absorbentes revestidas de carbono. Estos científicos llegaron a la conclusión que la eficiencia del nanofluido en los receptores volumétricos aumenta con el aumento de concentración solar y con la altura del nanofluido (A. Lenert, E.N. Wang, 2011, A. Lenert, 2010).

En el año 2012 se midieron las conductividades térmicas de CuO, Al₂O₃, ZnO y Cu con diferentes formas y diferente fracción de volumen por 3%, donde el agua y el aceite diatérmico son los fluidos base, para evaluar su potencial para utilizarlos en aplicaciones de alta temperatura tales como en colectores solares. Se encontraron que la mejora de la conductividad térmica de los nanofluidos con aceite diatérmico es mayor que con el agua, con las mismas nanopartículas y en las mismas condiciones. También concluyeron que la conductividad térmica se reduce con el aumento del tamaño de las partículas (G. Colangelo, E. Favale, A. de Risi, D. Laforgia, 2012).

Kameya y Hanamura encontraron experimentalmente que la absorción de la radiación solar para el nanofluido de Ni naftaleno/alquilo con fracción de volumen de 0.1% es mucho mayor que el del fluido base (Y. Kameya, K. Hanamura, 2011).

Gan y Qiao investigaron las propiedades ópticas de nanofluidos con base en etanol que contienen nanotubos de carbono de pared múltiple (MWCNT), carbono y nanopartículas de aluminio. Llegaron a la conclusión de que los (MWCNTs) tienen una mayor absorción que las nanopartículas de aluminio y de carbono (Y. Gan, L. Qiao, 2012).

Por último, Gan y Qiao encontraron que para nanofluidos con base en etanol, la absorción de radiación para nanofluidos que contienen Al_2O_3 nanopartículas es mayor que los nanofluidos que contienen nanopartículas de aluminio (Y. Gan, L. Qiao, 2012).

2. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

2.1. HIPÓTESIS

Es posible mejorar las propiedades termo físicas (temperatura, transferencia de calor) del nanofluido con base en nanopartículas de CuO y Ni dispersas en un fluido con base líquida, mediante el control del tamaño, forma, área superficial y propiedades ópticas de las nanopartículas.

2.2. OBJETIVO GENERAL

Desarrollar nanofluidos en fase líquida, con base en agua y/o aceite como fluido base y nanopartículas de CuO y Ni, que presente una adecuada conductividad térmica y un nivel de estabilidad adecuado, para la absorción selectiva de radiación solar y con ello incrementar la eficiencia del colector solar.

2.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- I. Desarrollar la metodología experimental para la síntesis de las nanopartículas de CuO: se sintetizarán por el método químico húmedo.
- II. Desarrollar la metodología experimental para la síntesis de las nanopartículas de Ni: se sintetizarán por el método químico de reducción de sales metálicas en solución acuosa.
- III. Caracterización de las NPs: determinación del tamaño, morfología, fases cristalinas, área superficial y propiedades electrónicas, mediante: Dispersión Dinámica de Luz (DDL), Difracción de Rayos-X

(DRX), Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) y Espectroscopia de Reflectancia Difusa (DRS) en el rango Ultravioleta-Visible (UV-vis).

- IV. Desarrollo de la metodología experimental para la preparación del nanofluido: se preparará dispersando las NPs en agua y/o aceite, variando la fracción volumen de NPs en el rango de 0.3-1.0 % en volumen.
- V. Caracterización térmica de los nanofluidos: estabilidad térmica, conductividad térmica y conductividad térmica efectiva.
- VI. Evaluación de los nanofluidos en los sistemas térmicos solares a pequeña escala (laboratorio).

3. METODOLOGÍA

3.1. SÍNTESIS DE NANOPARTÍCULAS DE CuO

La obtención de las NPs de CuO se realizó por el método químico húmedo, siendo utilizado en los procesos de síntesis acetato de Cu monohidratado como precursor de Cu, ácido acético glacial, e hidróxido de sodio (NaOH). En un procedimiento típico, se disolvieron 24g de Cu (CH₃COO)₂ en 600 ml de agua destilada agregando 2ml de ácido acético, la solución se calienta a 80 °C y posteriormente se adiciona la solución de 10ml conteniendo 32g de hidróxido de sodio 8M (NaOH) previamente diluidos en agua des ionizada. Se observa un cambio en la coloración de la solución, de un azul claro a un café oscuro, indicando la formación de NPs de CuO, se deja en agitación por 1hr y finalmente la solución se deja evaporar. El sólido obtenido se lava, se filtra y se deja secar a temperatura ambiente. Figura proceso de síntesis de Nps de CuO.

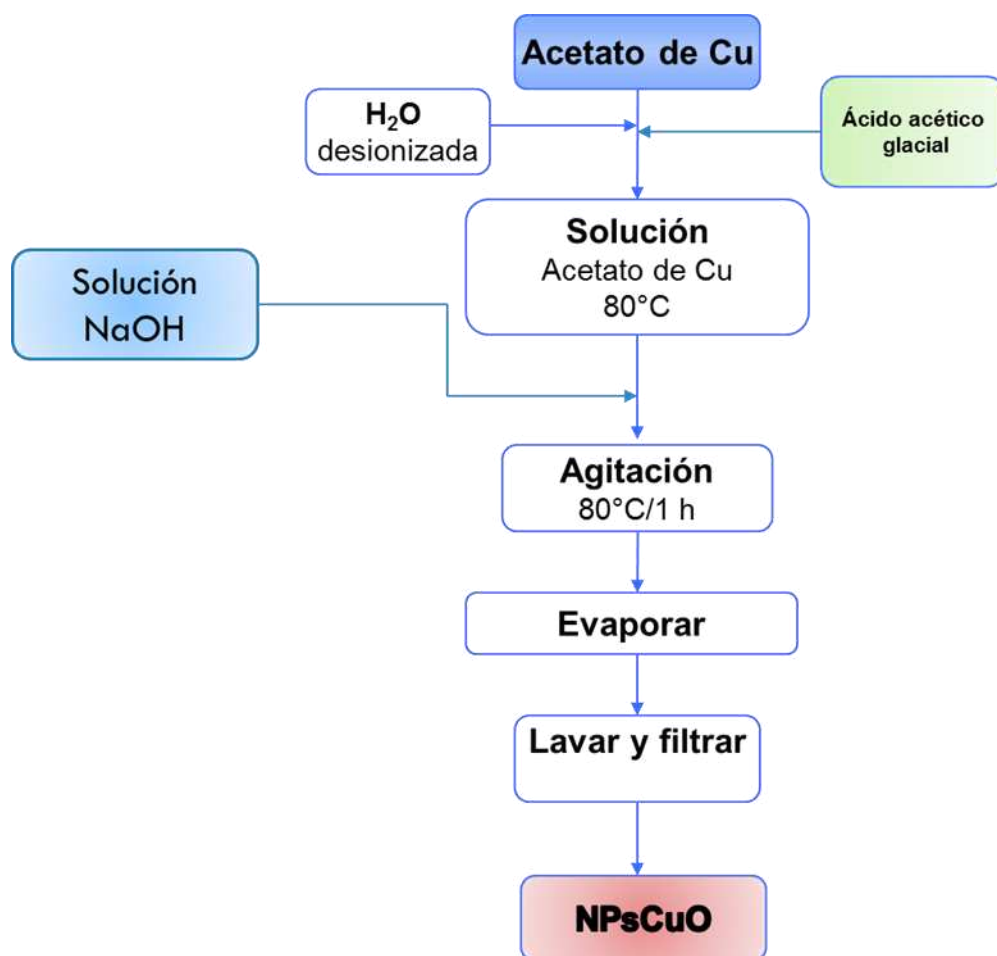


Figura 3.1 Diagrama de la síntesis de CuO

3.2. SÍNTESIS DE NANOPARTÍCULAS DE Ni

Las NPs de Ni se obtuvieron mediante el método de reducción química de sales metálicas, utilizando nitrato de níquel, hidróxido de sodio, poli etilenglicol e hidracina como agente reductor. En el proceso de síntesis, primero se prepara una solución de nitrato de níquel, disolviendo 0.4083g de nitrato de Ni y 0.010g de poli etilenglicol en 10ml de etanol, en agitación constante hasta disolución completa. Posteriormente, por separado se prepara una solución con 10ml de hidracina (N₂ H₄-H₂O) con 1ml de hidróxido de sodio (NaOH) 1M. La solución de hidracina se calentó a 75°C y posteriormente se agregaron gota a gota los 10ml de la solución de níquel. La solución cambió a una coloración azul claro, y posteriormente debido

a la reacción con la hidracina cambió a una tonalidad de café oscuro indicando la formación de los precursores de las NPs de Ni metálico. La solución obtenida se dejó enfriar a temperatura ambiente y se secó a temperatura ambiente. Se pudo observar que las nanopartículas de níquel metálico quedaron adheridas al imán con el cual se llevó a cabo la agitación de la solución. Una vez secas las partículas que se obtuvieron se analizaron por espectroscopia de UV-Vis. La figura 2 muestra el proceso de obtención de Nps de Ni.

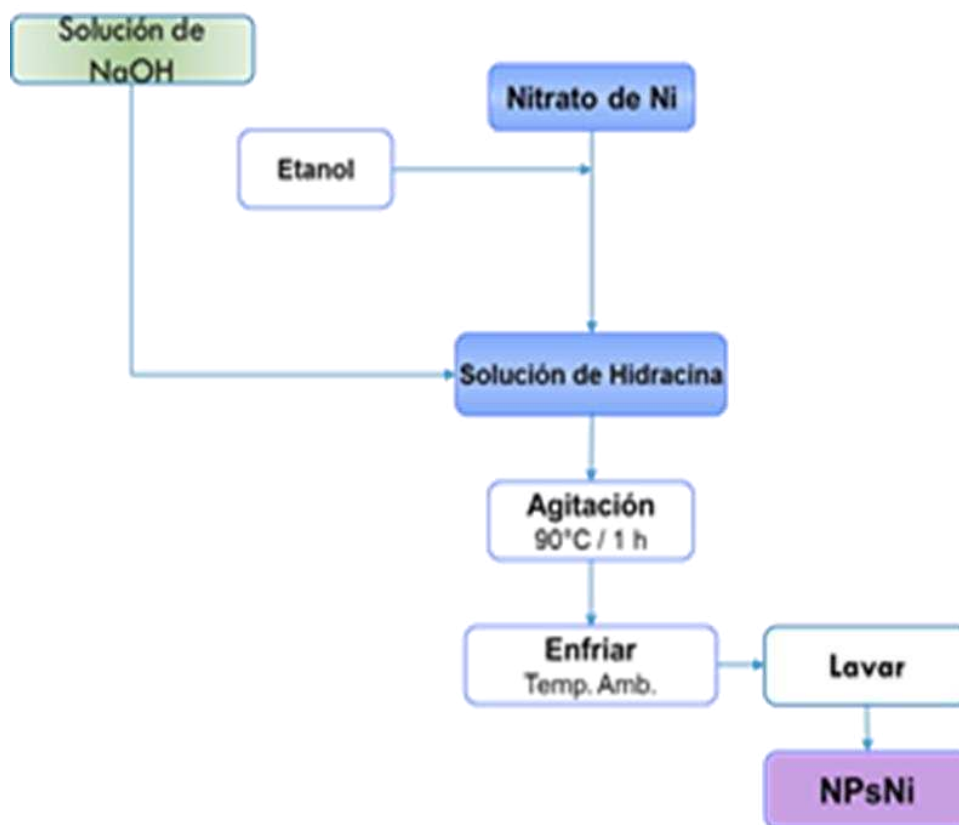


Figura 3.2 Diagrama de la síntesis de Ni

3.3. PREPARACIÓN DEL NANOFLUIDO

Los nanofluidos que se estudiaron en el presente trabajo de tesis se prepararon con nanopartículas de Ni y de CuO dispersas en agua desionizada; con un porcentaje en masa de 0.5 % de Ni/CuO (0.1 % en masa de Ni y 0.4 % en masa de CuO).

La preparación de los nanofluidos se realizó de la siguiente manera:

1. El nanofluido se preparó por etapas. El volumen de nanofluido preparado fue de 1L y se prepararon 5L en total.
2. Se mide 1L de agua desionizada en un matraz aforado de 1L y se pesa en una balanza granataria.
3. De la misma manera se pesan las nanopartículas de níquel metálico y de óxido de cobre (II) en una balanza analítica hasta tener el peso calculado, de acuerdo al porcentaje en masa de nanopartículas de Ni y de CuO. Se seleccionó un porcentaje en masa de 0.5 %, con porcentajes en masa de 0.1 y 0.4 % de Ni y CuO, respectivamente.
4. Con el agitador magnético se realizó la primera dispersión de las nanopartículas de Ni y de CuO, durante 30 minutos.
5. Una vez terminada la agitación magnética, se le aplica a la suspensión la radiación ultrasónica de alta frecuencia durante 1 hora de exposición y a una temperatura constante de 25°C. La aplicación directa de la radiación ultrasónica de alta frecuencia incrementa la temperatura de la suspensión, por lo que fue necesario utilizar un baño de recirculación de agua a 15°C.

Para la generación de la radiación ultrasónica de alta frecuencia se utilizó un sonicador de la marca Hielscher (modelo UP200S, potencia de 200W y volumen de trabajo de 0.1 a 2000 mL).

Mediciones de la conductividad térmica

Las mediciones de las conductividades térmicas se realizaron utilizando un analizador de propiedades térmicas KD2 Pro (Decagon Inc., Pullman, WA, USA) basado en el método del hilo caliente transitorio. Antes de realizar las mediciones, los nanofluidos fueron sonicados por 30 minutos con el propósito de tener las muestras con el mismo grado de dispersión.

Las mediciones de conductividad térmica se realizaron siguiendo el procedimiento reportado por Payán y Patín (2012):

1. Usar una pequeña hielera con agua para colocar el envase de 40 mL con el nanofluido. El agua será el medio con el que se controlará la temperatura mediante un pequeño serpentín conectado a un baño a temperatura constante.
2. Colocar el nanofluido en el envase a medir, cerciorarse que la aguja del aparato no toque las paredes del contenedor ya que se puede tener resultados erróneos.
3. Si la prueba se va a realizar a temperatura ambiente, se debe esperar unos 20 minutos, aproximadamente, hasta que la temperatura del agua y del nanofluido se estabilicen. Controlar la temperatura en la hielera con el termómetro digital.
4. Si la prueba se va a hacer a una temperatura mayor a la ambiente, se debe fijar la temperatura en el baño a temperatura constante y esperar de 20 a 30 minutos a que se estabilicen las temperaturas.
5. Realizar la toma de datos, por sugerencia del manual del equipo se debe esperar 15 minutos entre cada toma de datos y el error debe ser menor a 0.0083 en todas las pruebas.

3.4. CARACTERIZACIÓN DE NANOPARTÍCULAS DE CuO Y Ni

3.4.1. UV-VIS

La espectroscopia ultravioleta-visible o espectrofotometría ultravioleta-visible (UV/VIS) es una espectroscopia de emisión de fotones y una espectrofotometría. Utiliza radiación electromagnética (luz) de las regiones visible, ultravioleta cercana (UV) e infrarroja cercana (NIR) del espectro electromagnético, es decir, una longitud de onda entre 380nm y 780nm. La radiación absorbida por las moléculas desde esta región del espectro provoca transiciones electrónicas que pueden ser cuantificadas.

La espectroscopia UV-visible se utiliza para identificar algunos grupos funcionales de moléculas, y además, para determinar el contenido y fuerza de una sustancia.

Se utiliza de manera general en la determinación cuantitativa de los componentes de soluciones de iones de metales de transición y compuestos orgánicos altamente conjugados.

Se utiliza extensivamente en laboratorios de química y bioquímica para determinar pequeñas cantidades de cierta sustancia, como las trazas de metales en aleaciones o la concentración de cierto medicamento que puede llegar a ciertas partes del cuerpo.

El principio de la espectroscopia ultravioleta-visible involucra la absorción de radiación ultravioleta – visible por una molécula, causando la promoción de un electrón de un estado basal a un estado excitado, liberándose el exceso de energía en forma de calor. La longitud de onda (λ) comprende entre 190 y 800 nm.

La luz visible o UV es absorbida por los electrones de valencia, éstos son promovidos a estados excitados (de energía mayor). Al absorber radiación

electromagnética de una frecuencia correcta, ocurre una transición desde uno de estos orbitales a un orbital vacío. Las diferencias entre energías varían entre los diversos orbitales. Algunos enlaces, como los dobles, provocan coloración en las moléculas ya que absorben energía en el visible así como en el UV, como es el caso del β -caroteno.

Cuando un haz de radiación UV-Vis atraviesa una disolución conteniendo un analito absorbente, la intensidad incidente del haz (I_0) es atenuada hasta I . Esta fracción de radiación que ha logrado traspasar la muestra es denominada transmitancia (T) ($T = I/I_0$). Por aspectos prácticos, se utilizará la absorbancia (A) en lugar de la transmitancia ($A = -\log T$), por estar relacionada linealmente con la concentración de la especie absorbente según la Ley de Lambert-Beer: $A = \epsilon \cdot l \cdot c$ (ϵ : coeficiente de absortividad molar, l : camino óptico, c : concentración de la especie absorbente).



Figura 3.3 Equipo de espectroscopía UV-Vis Varian Cary 3.

3.4.2. DIFRACCIÓN DE RAYOS-X POR POLVOS (XRD)

Los Rayos X son radiaciones cuya longitud de onda oscila entre 0.02 Å a 100 Å y al igual que la luz ordinaria, se manifiesta en forma de energía radiante, siendo emitidos por los átomos debido a profundas perturbaciones en sus estructuras electrónicas. Toda sustancia cristalina dispersa rayos X en su propio patrón de difracción, produciendo una “huella” de su estructura atómica y molecular. La difracción de rayos X presenta una característica única con la cual los componentes se identifican como compuestos específicos a partir de sus diagramas de difracción (Explicación del funcionamiento del Difractómetro en el Anexo 6.3).

Para la medición de la difracción se llevó a cabo los siguientes pasos: Se coloca la muestra a analizar (Nps) hasta llenar el porta muestras al ras, luego el porta muestras fue colocado sobre el Difractómetro Bruker D8 Advance (Figura 3.4) donde se les hace incidir el haz de rayos X a la muestra con una longitud de onda de 1.54 Å correspondiente a la emisión $K\alpha$ de Cu. Las condiciones del equipo para el análisis fueron 30 KV y 30 mA, el análisis se llevó a cabo desde 10 a 80° en 2 theta con un salto .01 y con un tiempo de permanencia de 1 segundo en cada salto.

La identificación de especies a partir de su figura de difracción de polvo cristalino se basa en la posición de las líneas (en términos de θ o 2θ) y de sus intensidades relativas.

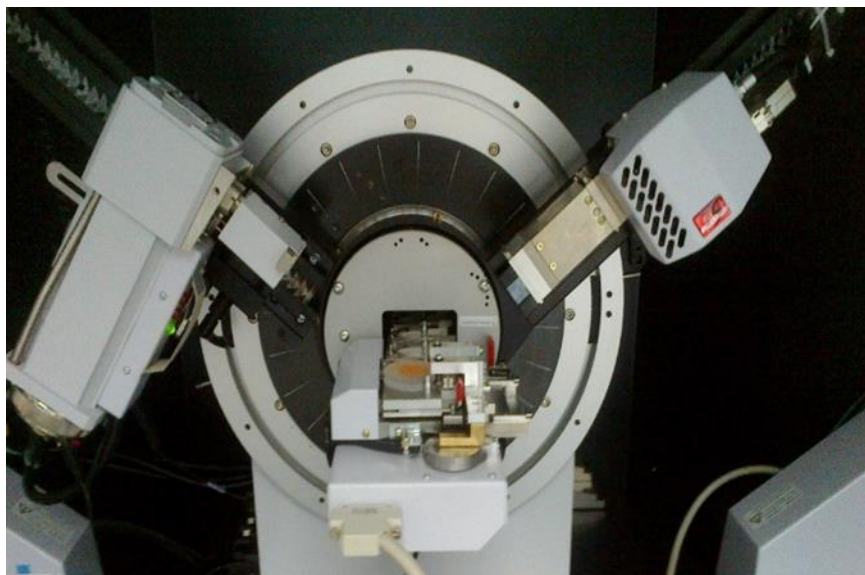


Figura 3.4 Difractómetro de Rayos X por polvos

3.4.3. MICROSCOÍA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM)

Para estudiar en gran detalle la superficie de los sólidos, se cuenta con un aparato llamado microscopio electrónico de barrido (SEM) (Figura 3.5) el cual, a diferencia de los microscopios ópticos, utiliza la interacción de electrones con la superficie bajo estudio para formar una imagen de ella. La microscopía electrónica de barrido se basa en algunos de los procesos que tienen lugar al hacer interaccionar un haz muy fino de electrones de alta energía con un material. Como resultado de esta interacción, la superficie puede emitir electrones reflejados, transmitidos, Auger y retro dispersados. Con estos últimos, es posible obtener imágenes de la morfología superficial de una muestra dada.

Las imágenes en un microscopio electrónico de barrido se obtienen al barrer un haz de electrones enfocado en la superficie del material que se desea analizar.

Se sigue un patrón de líneas paralelas sobre la superficie y se miden los electrones secundarios o retro dispersados que son emitidos desde la superficie de la muestra. La corriente de electrones se colecta y amplifica y la variación en la

intensidad de la señal, que resulta del barrido del haz a través de la muestra, forma un mapa de intensidades con lo cual se forma una imagen (Figura 3.6).

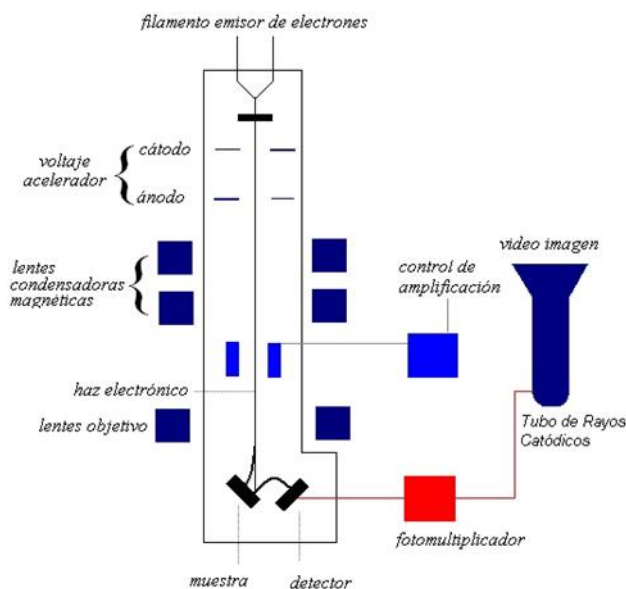


Figura 3.5 Esquema de un microscopio electrónico de barrido (SEM)

Para la observación de las muestras en el microscopio electrónico de barrido es necesario fijarlas en un porta muestras cilíndrico metálico (Cobre, latón aluminio, etc.), previamente pulido y limpio, utilizando cinta de carbón. Las muestras pueden ser recubiertas con una fina capa de Au. Para fines del presente trabajo, las observaciones se realizaron en un microscopio electrónico de barrido marca JEOL modelo JSM-6390L (Figura 3.5) a 20 kV y fueron recubiertas con oro.



Figura 3.6 Microscopio de barrido JEOL JSM-6390L

3.5. DISPERSIÓN DE NANOPARTÍCULAS DE CuO Y Ni EN FLUIDO

3.5.1. SONOQUÍMICA

La sonoquímica se refiere a entender el efecto del ultrasonido en la formación de cavitación acústica en líquidos, lo que resulta en la iniciación o mejora de la actividad química en la solución. La explicación más simple para esto es que las ondas sonoras se propagan a través de un líquido a frecuencias ultrasónicas con una longitud de onda que es significativamente más larga que la longitud del enlace entre los átomos en la molécula. Según los principios de la sonoquímica, cuando las ondas de ultrasonido actúan sobre un líquido se generan en él miles de pequeñas burbujas (cavitación) en el interior de las cuales se producen alteraciones de presión y temperatura. De hecho, la temperatura de los bordes de estas burbujas puede alcanzar miles de grados centígrados. Las pocas millonésimas de segundo que dura la "vida" de estas burbujas son suficientes para que en su interior se produzcan multitud de reacciones químicas, y pueden llegar a cambiar radicalmente la estructura química del líquido [3]. El colapso de estas burbujas es un proceso casi adiabático, lo que resulta en la acumulación masiva de la energía dentro de la burbuja, resultando en temperaturas extremadamente altas y presiones en una

región microscópica del líquido sometido al ultrasonido. Las altas temperaturas y presiones dan como resultado la excitación química de cualquier forma que se encuentre dentro de la burbuja, o en el entorno inmediato de la burbuja, ya que implosionó rápidamente.

La influencia de las ondas sonoras que viajan a través de líquidos fue reportado por primera vez por Robert Williams Madera y Alfred Lee Loomis en 1927. El experimento fue acerca de la frecuencia de la energía que tomó para que las ondas sónicas para "penetrar "la barrera de agua.

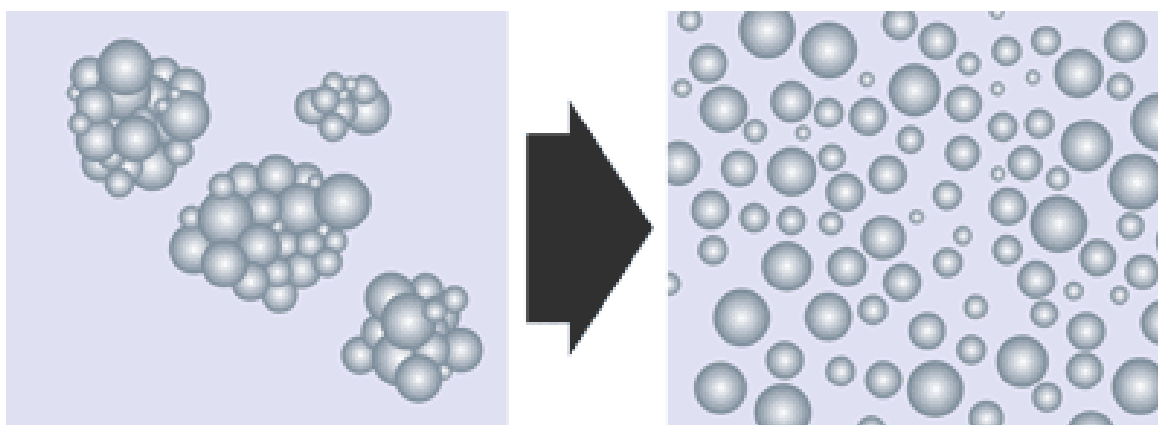


Figura 3.7 Rompimiento de aglomeramientos de partículas por medio de sonoquímica.

La Cavitación ultrasónica genera alto cizallamiento que rompe aglomerados de partículas individuales en partículas dispersas.

Las partículas individuales se mantienen unidas por fuerzas de atracción de distintas naturaleza física y química, incluyendo fuerzas de van der Waals y tensión superficial líquida. Este efecto es más fuerte para líquidos de viscosidades más altas, tales como polímeros o resinas. La aplicación de estrés mecánico rompe los aglomerados de partículas separadas. Cuando se sonifican líquidos las ondas sonoras que se propagan en el medio líquido dan como resultado la alternancia de alta presión (compresión) y ciclos de baja presión (vacío). Esto aplica tensión mecánica sobre las fuerzas electrostáticas de atracción (por ejemplo fuerzas de van

der Waals). Las pruebas realizadas para el uso de ultrasonido fueron realizadas con un sonotrodo de la marca hielcher UP200Ht (200W, 26kHz).



Figura 3.8 Equipo de Sonoquímica marca Hielcher UP200Ht

3.6. CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

3.6.1. MÉTODO TRANSITORIO DE HILO CALIENTE

La técnica transitoria de hilo caliente permite medir la conductividad térmica de fluidos simples y complejos (no conductores eléctricos y conductores eléctricos respectivamente). En esta técnica se permite observar el efecto de transferencia de calor por convección (S. García Duarte, L. Lira Cortés, E. Méndez Lango, 2010).

Esta técnica es un buen método para determinar la conductividad térmica de los materiales que logran amoldarse alrededor de un hilo delgado, siendo esto un factor ideal para medir la conductividad térmica de los líquidos. Por otra parte el mismo hilo funciona como fuente de calor y sensor de temperaturas en el medio.

En esta técnica va colocado un hilo delgado inmerso en un fluido muestra de forma vertical, en equilibrio termodinámico $t=0$, así mismo mientras el hilo es

eléctricamente calentado por efecto Joule, lo cual genere un cambio de resistencia eléctrica siendo esta medida por medio de un circuito puente wheatstone y un sistema computarizado donde se recibe toda la información generada.

El modelo matemático desarrollado para el método de hilo caliente, considera una fuente lineal de calor, infinitamente larga y con una distribución de calor uniforme, que disipa un flujo de calor por unidad de longitud en un medio homogéneo e infinito. La transferencia de calor hacia el medio es solamente por conducción y por lo tanto se incrementan en el tiempo la temperatura de la fuente y la del medio de prueba. La ecuación para este fenómeno se deriva de la ecuación general de la difusión de calor de Fourier, que en componentes cilíndricas para la componente radial r se expresa como sigue.

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right)$$

Donde, $T = T_0 + \Delta T$ es la temperatura del medio a cualquier tiempo t , T_0 es la temperatura inicial de la fuente y el medio y ΔT es la diferencia de temperatura entre el medio y la temperatura inicial (Salvador Alvarado Ramírez, 2011).

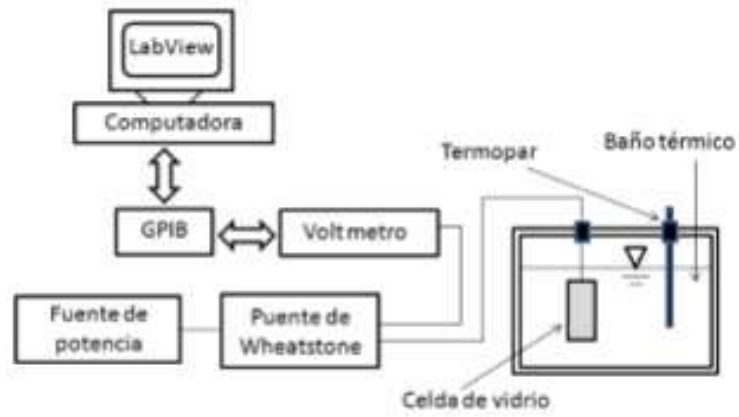


Figura 3.9 Diagrama de funcionamiento del método transitorio de hilo caliente, laboratorio de conductividad térmica CENAM.

4. DISCUSIÓN Y RESULTADOS

4.1. UV- Vis Nps de CuO

En la Figura 4.1 se muestra el espectro de UV-Vis de las NPs de CuO. Se puede ver claramente que el espectro muestra una banda intensa de absorción centrada en 250 nm y un hombro intenso y amplio que va de los 300 a los 350 nm, que se asignan al Cu en estado de oxidación Cu^{2+} y que corresponde al CuO. Estos resultados indican que las NPs de CuO tienen probablemente un tamaño inferior a los 90 nm, esto se corroborará mediante las imágenes de SEM y los resultados de Rayos-X por polvos.

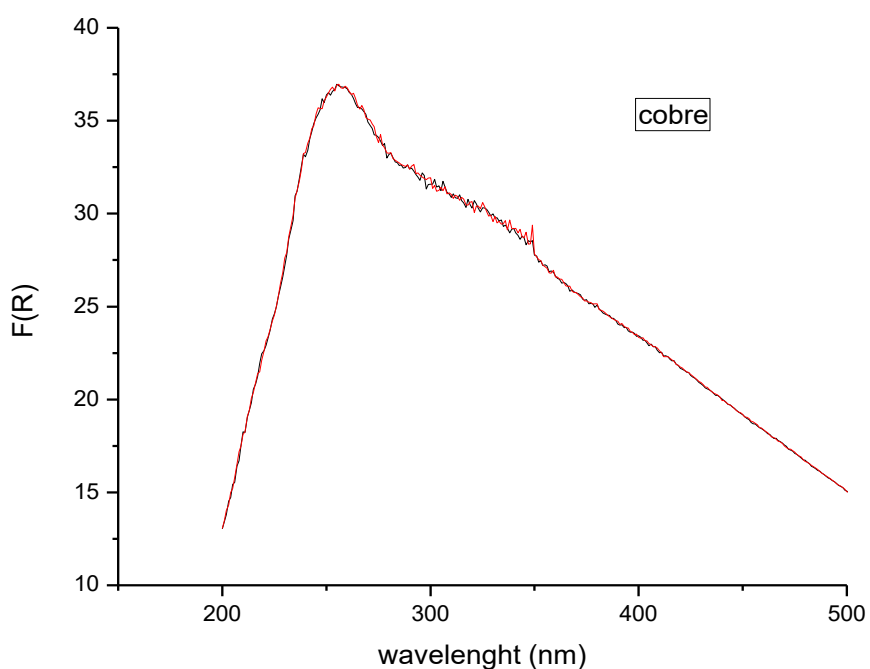


Figura 4.1 Gráfica de UV-Vis de CuO

4.2. DIFRACCIÓN DE RAYOS-X POR POLVOS PARA Nps de CuO

Los resultados de XRD confirmaron la obtención de cristales de CuO. La identificación de la fase se realizó por comparación con los archivos del banco de

PDF's (powder diffraction files) de la International Center for diffraction Data (ICDD) provisto por Brucker. Con el mencionado banco de datos se encontró que la fase de CuO obtenida es la correspondiente al PDF 48-1548 en su estado de Tenorita. A continuación se muestra un difractograma de CuO con crecimiento cristalino aleatorio.

Es importante mencionar que para la prueba de XRD el CuO fue molido para que las estructuras no tuvieran una dirección preferente y el análisis por rayos X sea más preciso. El CuO que se recuperó de la síntesis tiene la apariencia de ser un polvo, por lo cual se molió con mortero para hacer posible el montaje en el porta-muestras para obtener las mayores posibilidades de orientaciones cristalinas presentes en la muestra de CuO.

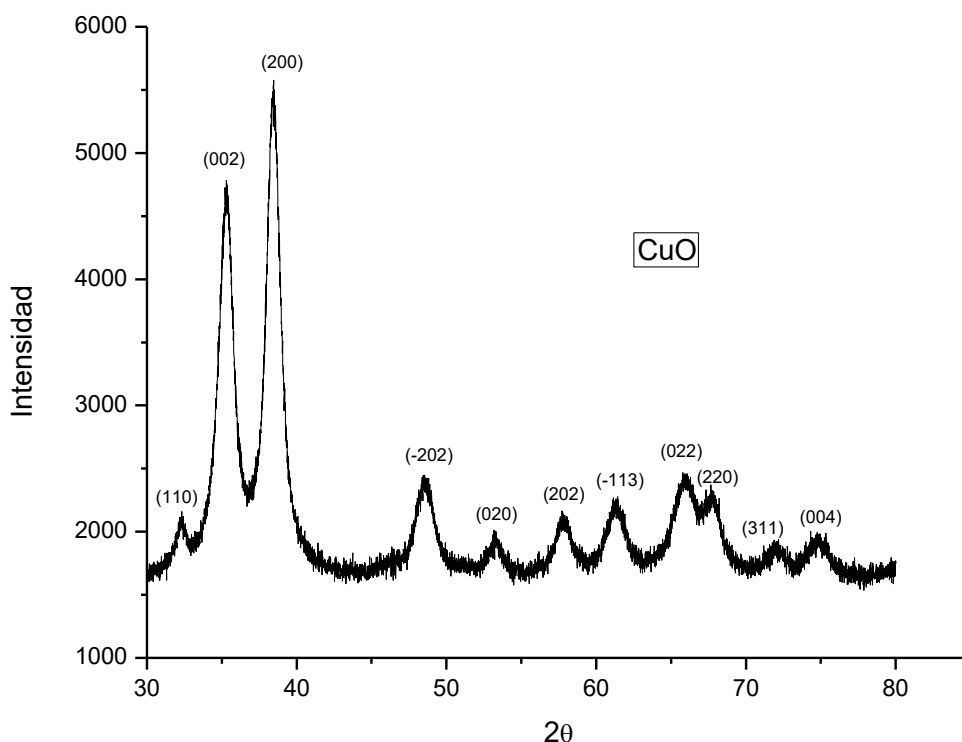


Figura 4.2 Gráfica de XRD del CuO

Se puede observar en el difractograma de la figura 4.2 que la reflexión alrededor de 37° en la escala de 2θ correspondiente a la familia de planos (200), es la que presenta la mayor intensidad registrada, y que dicha intensidad es notoriamente similar a la que se esperaba de acuerdo al registro del PDF 48-1548. Lo anterior es evidencia de una orientación cristalina preferencial en la dirección [200]. Asimismo, es posible observar como las reflexiones a 35° y 47° , las cuales corresponden a la contribución de los (002) y (-202) respectivamente, también presentan una intensidad a la esperada de acuerdo al citado PDF, aunque dicho incremento no es tan notorio como el observado para el (200).

Por otra parte, en el difractograma que aparece en la figura 4.2 están indicados los índices de Miller para las principales reflexiones, las cuales corresponden a los planos (110), (002), (300), (-202), (020), (202), (-113), (022), (220), (311) y (004) y acorde al PDF 48-1548, cabe hacer notar que las señales en el difractograma están bien definidas y tienen bajo nivel de ruido y un ancho de banda amplio lo cual indica la presencia de CuO altamente cristalino y con formación de nanopartículas muy pequeñas, el desplazamiento observado en comparación con el PDF se debe a que la muestra no se mantuvo totalmente aplanada y surgió un pequeño levantamiento generando el desplazamiento de la gráfica. Utilizando el programa “EVA” provisto por Bruker, se determinó el tamaño promedio de cristalita en el CuO y se encontró un valor aproximado de 8nm.

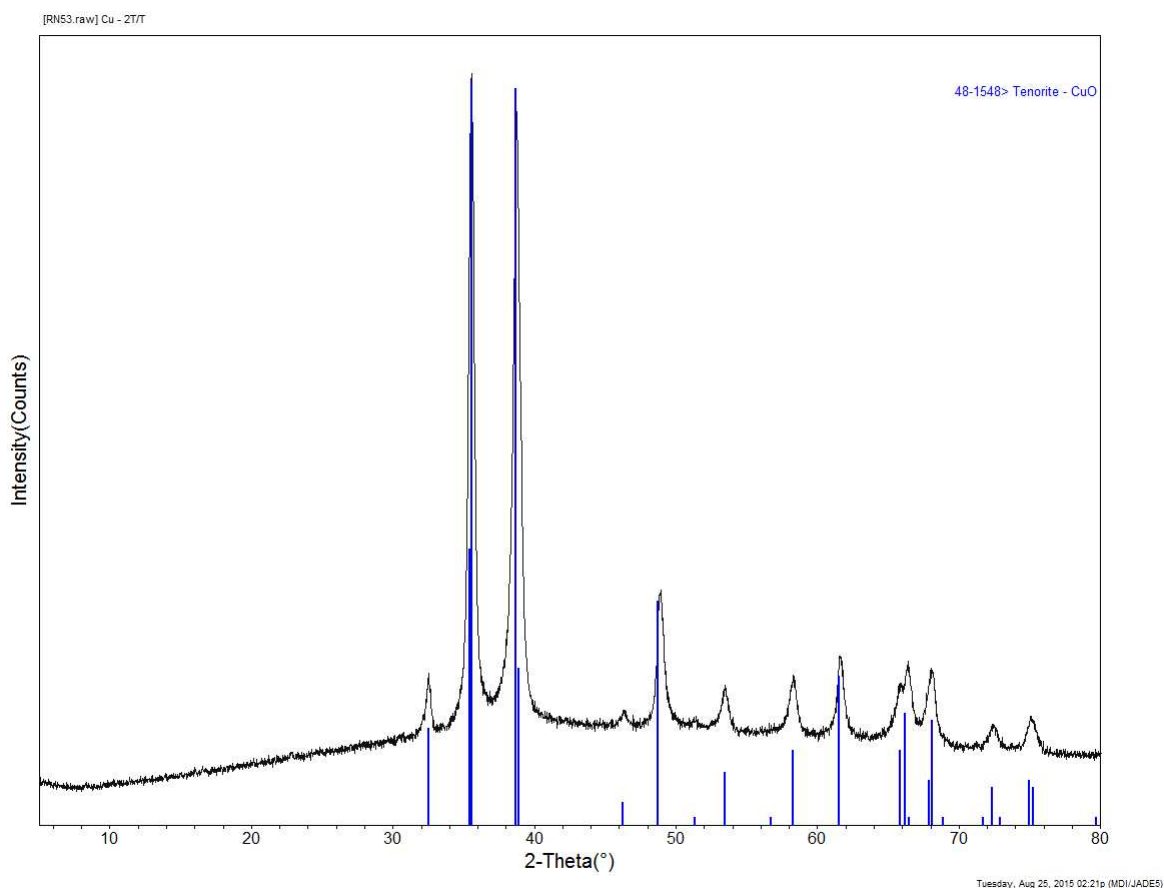


Figura 4.3 Comparación del PDF 48-1548 (azul) con la muestra examinada de CuO (negro).

4.3. MICROSCOPIA (SEM) Nps de CuO

A través de la microscopía SEM, se pueden observar los tamaños de partículas y el tipo de morfología de las mismas, en las figuras siguientes podemos observar que existe una aglomeración de nanopartículas uniformes tipo coliflor con una morfología casi esférica, esto se debe a los procesos de síntesis de las nanopartículas, el método químico húmedo utilizado con las condiciones empleadas en este trabajo nos dan como resultado un tamaño de partículas que se encuentran en el rango de 30 a 80nm.

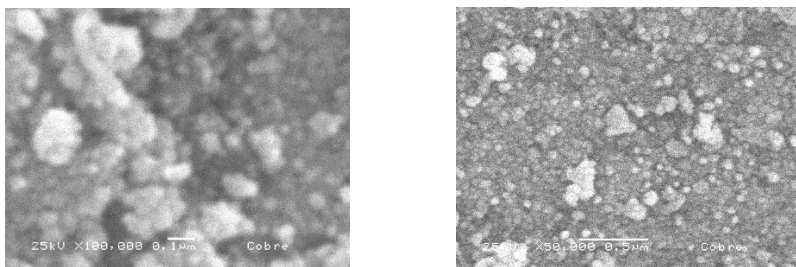


Figura 4.4 Imágenes de la síntesis de CuO.

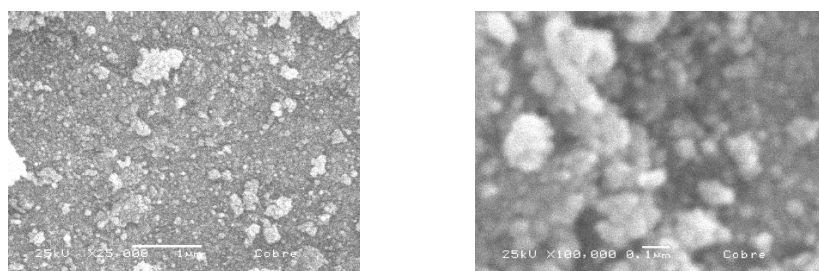


Figura 4.5 Nanopartículas de CuO tomadas SEM.

Es importante mencionar que en las imágenes mostradas solo podemos observar un tipo de morfología de nanopartículas casi esféricas y sin la presencia de nanobarras u otro tipo de morfología.

4.4. UV-VIS Nps de Ni

En la Figura 4.6 se presenta el espectro de UV-Vis de las NPs de Ni. Se Puede ver claramente que el espectro presenta una banda intensa y amplia centrada en aproximadamente 350 nm, que es característica del Ni metálico (estado de oxidación cero). De acuerdo con la literatura, una banda en 400 nm se asigna al óxido de níquel, la cual prácticamente no está presente en nuestras muestras, también podemos observar una banda débil entre 600-650 nm que podría atribuirse al agente estabilizador (Dongsheng Li, Sridhar Komarneni, 2006). Por consiguiente podemos afirmar que prácticamente las NPs obtenidas en este estudio corresponden a Ni metálico. Es muy probable que las NPs de Ni sean menores a

los 70 nm, esto lo corroboraremos con los análisis de Rayos-X por polvos y con las imágenes de SEM.

La interferencia que logramos apreciar se debe a una pequeña falla en el equipo y no existe ningún impedimento que afecte la muestra.

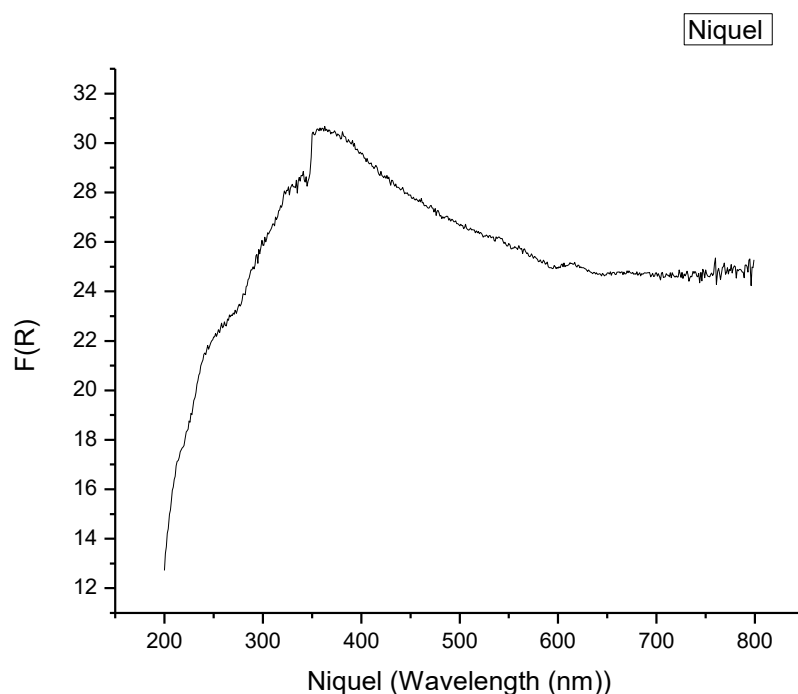


Figura 4.6 Gráfica de curva de UV-Vis de Ni

4.5. DIFRACCIÓN DE RAYOS-X POR POLVOS PARA Nps de Ni

Los resultados de XRD para la muestra de Ni confirmaron la obtención de cristales de Ni metálico. La identificación de la fase se realizó por comparación con los archivos del banco de PDF's (powder diffraction files) de la International Center for diffraction Data (ICDD) provisto por Brucker. Con el mencionado banco de datos se encontró que la fase de CuO obtenida es la correspondiente al PDF 04-0850 en su estado de Níquel. A continuación se muestra un difractograma de Ni con crecimiento cristalino aleatorio.

El Ni que se recuperó de la síntesis tiene la apariencia de láminas metálicas brillantes y un polvo de color oscuro, por lo cual se molió con mortero para hacer posible el montaje en el porta-muestras para obtener las mayores posibilidades de orientaciones cristalinas presentes en la muestra de Ni.

Se puede observar en el difractograma de la figura 4.7 que la reflexión alrededor de 44.49° en la escala de 2θ correspondiente a la familia de planos (111), es la que presenta la mayor intensidad registrada, y que dicha intensidad es notoriamente similar a la que se esperaba de acuerdo al registro del PDF 04-0850. Lo anterior es evidencia de una orientación cristalina preferencial en la dirección [111]. Asimismo, es posible observar como las reflexiones a 51.89° y 76.44° , las cuales corresponden a la contribución de los planos (200) y (220) respectivamente, también presentan una intensidad a la esperada de acuerdo al citado PDF, aunque dicho incremento no es tan notorio como el observado para el (111).

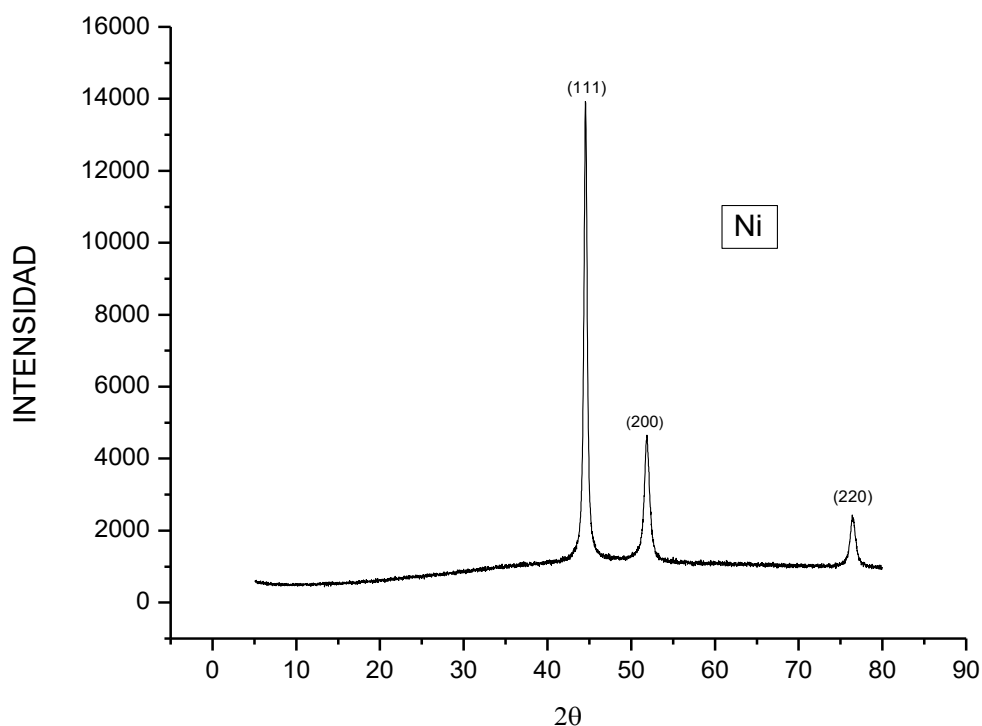


Figura 4.7 Difractograma de muestra de Ni

Por otra parte, en el difractograma que aparece en la figura 4.7 están indicados los índices de Miller para las principales reflexiones, las cuales corresponden a los planos (111), (200), y (220) y acorde al PDF 04-0850, cabe hacer notar que las señales en el difractograma están bien definidas y tienen bajo nivel de ruido y un ancho de banda relativamente angosto lo cual indica la presencia de Ni cristalino y con formación de nanopartículas pequeñas, en la figura 4.8 se muestra el desplazamiento en intensidad observado en comparación con el PDF 04-0850 se debe a que la muestra presenta un pequeño campo magnético debido a que la muestra es Ni metálico generando el desplazamiento de la gráfica sin ser un dato de importancia o que afecte de algún modo la muestra. Utilizando el programa “EVA” provisto por Bruker, se determinó el tamaño promedio de cristalita en el Ni y se encontró un valor aproximado de 18nm.

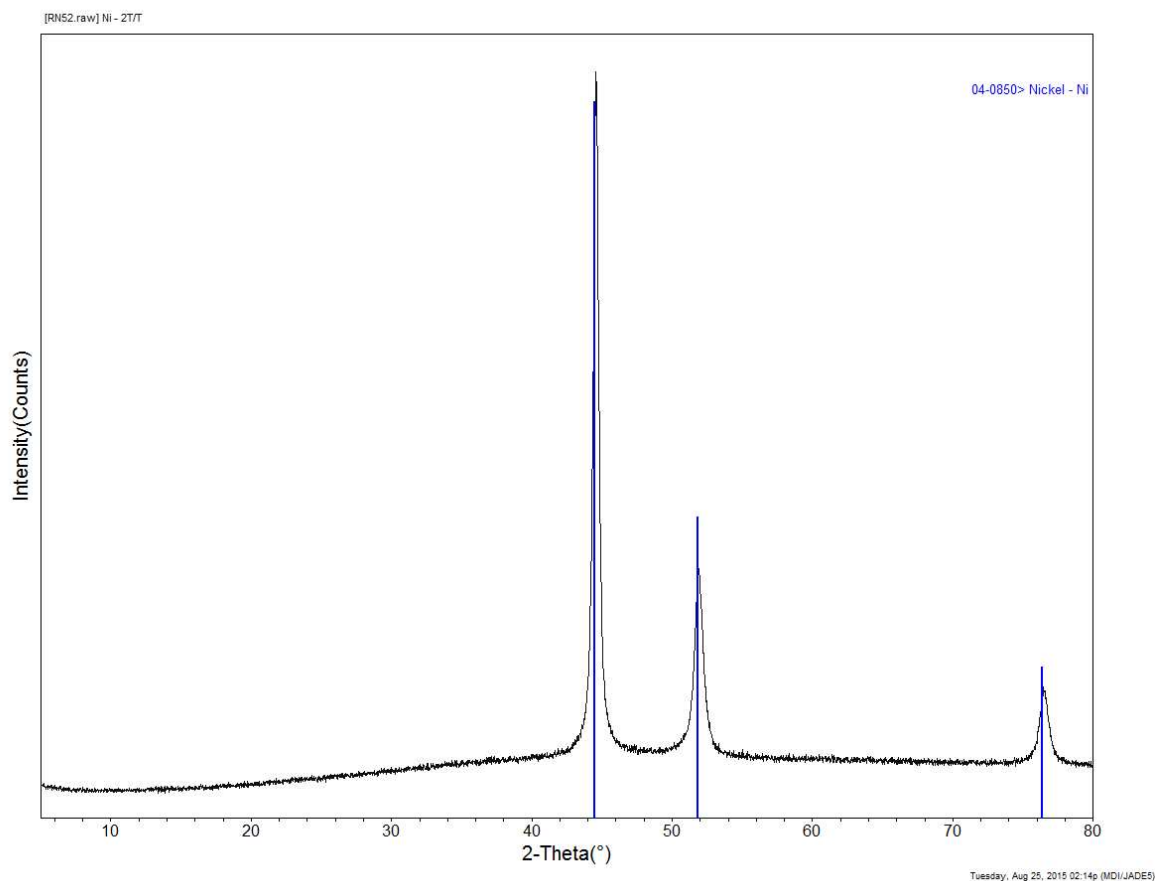


Figura 4.8 Comparación del PDF 04-0850 (azul) y la muestra obtenida de Ni (negro).

4.6. MICROSCOPÍA (SEM) Nps de Ni

Las micrografías tomadas para el Ni metálico sintetizadas por el método químico de reducción de sales metálicas donde se puede observar una aglomeración de nanopartículas tipo tentáculos Fig. 4.9, posteriormente se observan con mayor acercamiento la aglomeración de nanopartículas tipo cúmulos la cual se espera pueda desaglomerarse con la aplicación de sonoquímica, las imágenes posteriores nos muestran que las nanopartículas aglomeradas se encuentran en un rango menor de los 100nm.

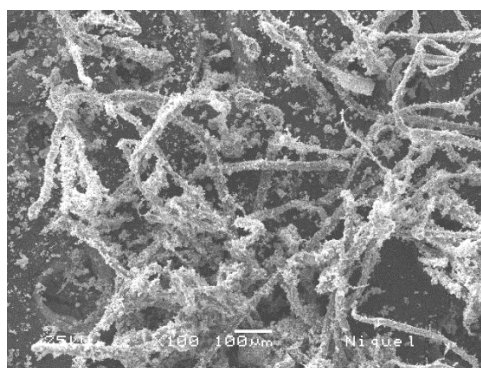


Figura 4.9 Imagen SEM de nanopartículas de Ni metálico.

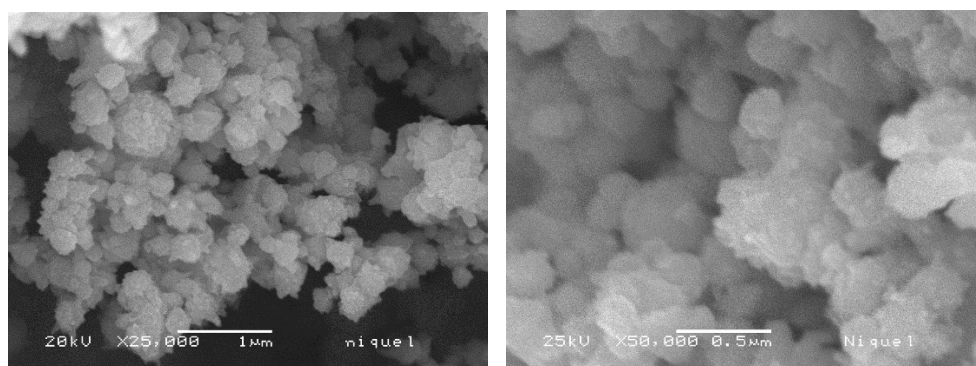


Figura 4.10 Imágenes SEM de la síntesis de Ni metálico

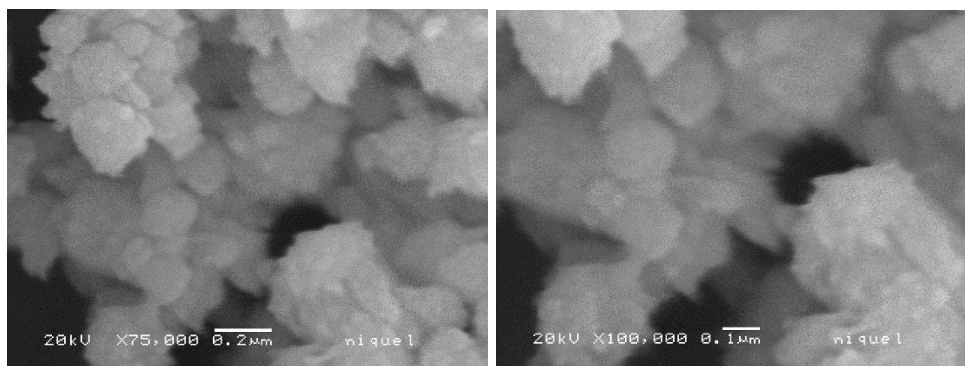


Figura 4.11 Imágenes SEM de Ni tomadas con microscopio del laboratorio de CFATA UNAM

4.7. CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

4.7.1. MÉTODO TRANSITORIO DE HILO CALIENTE

Como se mencionó anteriormente, los nanofluidos se prepararon mediante la dispersión de una cantidad específica de nanopartículas de Ni y CuO en agua desionizada (AD), con la siguiente composición: 0.5 % en masa de Ni y CuO [0.1 % en masa de Ni y 0.4 % en masa de CuO] en AD.

La conductividad térmica de estos nanofluidos se midieron para un porcentaje en masa de nanopartículas de Ni/CuO a diferentes temperaturas. En la Figura X se presenta la conductividad térmica de los nanofluidos teniendo como fluido base AD a diferentes temperaturas. Como se puede ver claramente en la gráfica, la conductividad térmica del nanofluido se incrementa con el incremento en la temperatura. El incremento en la conductividad térmica no es lineal con el incremento en la temperatura. La linealidad/no linealidad de la conductividad térmica con respecto a la temperatura probablemente depende de la naturaleza de las nanopartículas y del fluido base.

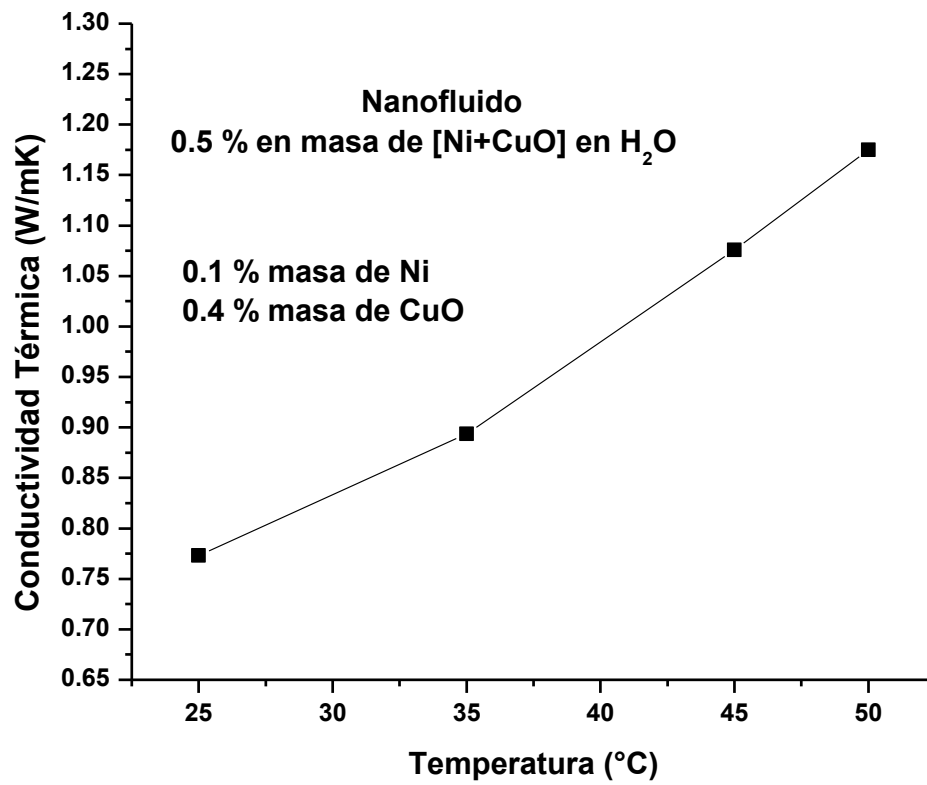


Figura 4.12 Conductividad térmica del nanofluido Ni/CuO dispersado en agua desionizada en función de la temperatura.

El porcentaje en conductividad térmica (k_e) se calcula utilizando la fórmula:

$$\% = [(k - k_0) \times 100] / k_0$$

Donde k_0 es la conductividad térmica del fluido base y k es la del nanofluido.

Para el porcentaje en masa de 0.5 % de Ni/CuO, el mejoramiento en la conductividad térmica es aproximadamente de 28 % a 25°C. Prácticamente un 90 % de mejoramiento se observó para el mismo porcentaje en peso a 50°C.

Este mejoramiento en conductividad térmica se puede deber a la alta conductividad térmica tanto de las nanopartículas de Ni así como de las de CuO.

Los análisis realizados por medio del método transitorio de hilo caliente, fueron evaluados en temperaturas de 25 °C, 35 °C, 45 °C y 50 °C.

5. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se sintetizaron nanopartículas de CuO por el método químico húmedo que demostró ser muy eficiente en tiempo, energía y costos, con el cual se logró la obtención de nanopartículas menores de 80nm.

Para la síntesis de nanopartículas de Ni por el método químico de reducción de sales metálicas demostró ser un método muy eficaz para la obtención de nanopartículas de Ni metálico, siendo un método muy sencillo y eficiente en tiempo, con esta síntesis se logró obtener exitosamente nanopartículas de Ni metálico con diámetros de partícula inferiores a 100nm.

Las técnicas empleadas para la caracterización de las nanopartículas nos ayudan a comprender mejor la funcionalidad de las partículas y sus propiedades, logrando así con la ayuda de la sonoquímica una eficiente dispersión de las nanopartículas en el fluido deseado, siendo esto un gran logro para la aplicación del nanofluido.

Las técnicas de conductividad térmica a nivel laboratorio muestran el desempeño de las nanopartículas dispersas en el fluido base, logrando con esto la mejora en el rendimiento y desempeño del nanofluido.

Con los resultados obtenidos podemos concluir que las propiedades termo físicas del nanofluido afectan favorablemente el desempeño del nanofluido como un fluido de transferencia de calor (HTF) el cual se implementara en un colector solar para garantizar el mayor desempeño en la transferencia de calor y así reducir en gran costo y aumentar considerablemente la eficiencia del colector solar de torre central para un campo de helióstatos para la conversión de energía solar térmica a energía eléctrica.

Las metodologías experimentales desarrolladas en este trabajo de tesis permitieron sintetizar de manera exitosa las nanopartículas de Ni y de CuO.

Las nanopartículas de Ni y CuO obtenidas poseen tamaños menores a los 50 nm de diámetro, con una distribución altamente uniforme y con una morfología casi esférica.

Los nanofluidos preparados mediante la dispersión de las nanopartículas de Ni/CuO en el fluido base (agua desionizada) no requirieron la utilización de surfactante.

Las nanopartículas de Ni y de CuO, de acuerdo con sus tamaños y morfologías, manifestaron una alta dispersión en el fluido base (AD), generando nanofluidos con alta capacidad térmica, en función a las altas capacidades térmicas del Ni y del CuO.

6. REFERENCIAS

- An Overview of CSP in Europe**, North Africa and the Middle East, CSP Today, October; 2008.
- A. Ghadimi, R. Saidur, H.S.C. Metselaar**, A review of nanofluid stability properties and characterization in stationary conditions, *Int. J. Heat Mass Transfer* 54 (2011) 4051–4068.
- A. Lenert, E.N. Wang**, Optimization of nanofluid volumetric receivers for solar thermal energy conversion, *Solar Energy* (2011).
- A. Lenert**, Nanofluid-based receivers for high-temperature, high-flux direct solar collectors. M.Sc. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2010.
- A. Sharma**, A comprehensive study of solar power in India and World, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 15 (2011) 1767–1776.
- Beck M.** Thermal conductivity of metal oxide nanofluids. PhD thesis. Georgia Institute of Technology; 2008.
- Behar Omar, Kellaf Abdallah, Mohammedi Kamal, Belhamel Maiouf.** Instantaneous performance of the first integrated solar combined cycle system in Algeria. *Energy Procedia* 2011; 6:185–93.
- Behar omar, Kellaf Abdallah, Mohammedi Kamal.** Scaling up hybrid solar gas turbine: simulation and results, SEN2012. Algeria: Alger; 2012.
- Buffat, Ph.; Borel, J.-P.** «Size effect on the melting temperature of gold particles». *Physical Review A* 13 (6): 2287. Bibcode: 1976PhRvA.13.2287B. doi:10.1103/PhysRevA.13.2287 (1976).
- Choi SUS.** In: Singer DA, Wang HP, editors. Development and application of non-Newtonian flows, vol. FED 231. New York: ASME; 1995. p. 99–105.
- Choi SUS, Yu W, Hull JR, Zhang ZG, Lockwood FE.** Nanofluids for vehicle thermal management, 2001-01-1706. Society of Automotive Engineers; 2001. p. 139–144.
- Choi SUS, Zhang ZG, Yu W, Lockwood FE, Grulke EA.** Anomalous thermal conductivity enhancement in nanotube suspensions. *Appl Phys Lett* 2001; 79(14):2252–4.

- C. Kleinstreuer, J. Li, J. Koo**, Microfluidics of nano-drug delivery, *Int. J. Heat Mass Transfer* 51 (2008) 5590–5597.
- Duffie A, Beckman A.** Solar engineering of thermal processes. 2nd ed. New York: Wiley; 1991.
- Eastman JA, Choi SUS, Li S, Yu W, Thompson LJ.** Anomalous increase in effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles. *Appl Phys Lett* 2001; 78(6):718–20.
- Elcock D.** Potential impacts of nanotechnology on energy transmission applications and needs. Environmental Science Division, Argonne National Laboratory; November 2007.
- European research on concentrated solar thermal energy.** Directorate-general for research sustainable energy systems. European Union (EU); 2004.
- 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 Mater. Solar Cells* 95 (2011) 2994–3000.
- E. Sani, S. Barison, C. Pagura et al.,** “Carbon nanohorn-based nanofluids as direct sunlight absorbers,” *Optics Express*, vol. 18, p. 4613, 2010.
- Goswami D Yogi, Kreith Frank, Kreider F.** Principles of solar engineering. 2nd ed. Philadelphia, PA: Taylor and Francis; 2000.
- G. Colangelo, E. Favale, A. de Risi, D. Laforgia,** Results of experimental investigations on the heat conductivity of nanofluids based on diathermic oil for high temperature applications, *Appl. Energy* 97 (2012) 828–833.
- G. Ramesh, N.K. Prabhu,** Review of thermo-physical properties, wetting and heat transfer characteristics of nanofluids and their applicability in industrial quench heat treatment, *Nanoscale Res. Lett.* 6 (2011) 334.
- Hwang YJ, Ahn YC, Shin HS, Lee CG, Kim GT, Park HS.** Investigation on characteristics of thermal conductivity enhancement of nanofluids. *Curr Appl Phys* 2006; 6(6):1068–71.
- H. Tyagi, P. Phelan, R. Prasher,** “Predicted efficiency of a low-temperature Nanofluid-based direct absorption solar collector,” *Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 131, no. 4, pp. 0410041–0410047, 2009.

- H.S. Ahn, M.H. Kim**, A review on critical heat flux enhancement with nanofluids and surface modification, *ASME J. Heat Transfer* 134 (2012) 024001.
- IEA**. Technology roadmap concentrating solar power; 2010. /http: //www. iea.org/papers/2010/csp_roadmap.pdfS.
- Jamel MS, AbdRahman A, Shamsuddin AH**. Advances in the integration of solar thermal energy with conventional and non-conventional power plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2013; 20:71–81.
- Jana S, Salehi-Khojin A, Zhong WH**. Enhancement of fluid thermal conductivity by the addition of single and hybrid nano-additives. *Thermochim Acta* 2007; 462(1–2):45–55.
- Jun Li**. Scaling up concentrating solar thermal technology in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2009; 13:2051–60.
- J. Fan, L. Wang**, Review of heat conduction in nanofluids, *ASME J. Heat Transfer* 133 (2011) 040801.
- J.H. Lee, S.H. Lee, C.J. Choi, S.P. Jang, S.U.S. Choi**, A review of thermal conductivity data, mechanics and models for nanofluids, *Int. J. Micro–Nano Scale Transport* 1 (2010) 269–322.
- J. Sarkar**, A critical review on convective heat transfer correlations of nanofluids, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 11 (2011) 3271–3277.
- Kadir Mohd Zainal Abidin Ab, Rafeeu Yaaseen, Adam Nor Mariah**. Prospective scenarios for the full solar energy development in Malaysia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2010; 14:3023–31.
- Kang HU, Kim SH, Oh JM**. Estimation of thermal conductivity of nanofluid using experimental effective particle volume. *Exp Heat Transfer* 2006; 19(3):181–91.
- Keblinski P, Nayak SK, Zapol P**. Charge distribution and stability of charged carbon nanotubes. *Phys Rev Lett* 2002; 89(December (25)) [article number: 255503].
- Kolb, GJ, Jones, SA, Donnelly, MW, et al.**, 2007. Heliostat cost reduction study, SAND2007-3293. Available from: <http://www.prod.sandia.gov/cgi-bin/techlib/accesscontrol.pl/2007/073293.pdfS>.
- Kostic**. www.kostic.niu.edu/DRnanofluids; 2009 [14.11.2009].
- Kryza Frank**. The power of light. New York: McGraw-Hill; 2003.

- K. Khanafer, K. Vafai**, A critical synthesis of thermophysical characteristics of nanofluids, *Int. J. Heat Mass Transfer* 54 (2011) 4410–4428.
- Lee J-H, Hwang KS, Jang SP, Lee BH, Kim JH, Choi SUS, et al.**, Effective viscosities and thermal conductivities of aqueous nanofluids containing low volume concentrations of Al₂O₃ nanoparticles. *Int J Heat Mass Transfer* 2008; 51(11–12):2651–6.
- Liu M-S, Lin MC-C, Tsai CY, Wang C-C**. Enhancement of thermal conductivity with Cu for nanofluids using chemical reduction method. *Int J Heat Mass Transfer* 2006; 49(17–18):3028–33.
- L. Godson, B. Raja, D. Mohan, S. Wongwises**, Enhancement of heat transfer using nanofluids – An overview, *Renew. Sustain. Energy Rev.* (2009), <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2009.10.004>.
- L. Mercatelli, E. Sani, G. Zaccanti, F. Martelli, D.P. Ninni, S. Barison, C. Pagura, F. Agresti, D. Jafrancesco**, Absorption and scattering properties of carbón nanohorn-based nanofluid for direct sunlight absorbers, *Nanoscale Res. Lett.* 6 (1) (2011) 282.
- L. Mercatelli, E. Sani, D. Fontani, G. Zaccanti, F. Martelli, D.P. Ninni**, Scattering and absorption properties of carbón nanohorn-based nanofluids for solar energy applications, *J. Euro. Optical Soc.* 6 (2011) 11025.
- L. Mercatelli, E. Sani, A. Giannini, D.P. Ninni, F. Martelli, G. Zaccanti**, Carbon nanohorn-based nanofluids: characterization of the spectral scattering albedo, *Nanoscale Res. Lett.* 7 (2012) 96.
- Mahian Omid, Kianifar Ali, Kalogirou A, Pop Ioan, Wongwises Somchai**. A review of the applications of nanofluids in solar energy. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 2013; 57:582–94.
- Mintsa HA, Roy G, Nguyen CT, Doucet D**. New temperature dependent thermal conductivity data for water-based nanofluids. *Int J Therm Sci* 2009; 48(2):363–71.
- Montes MJ, Rovira A, Martínez-Val JM, Ramos A**. Proposal of a fluid flow layout to improve the heat transfer in the active absorber surface of solar central cavity receivers. *Applied Thermal Engineering* 2012; 35:220–32.

- Murshed SMS, Leong KC, Yang C.** A combined model for the effective thermal conductivity of nanofluids. *Appl Therm Eng* 2009; 29(11–12):2477–83.
- M. Thirugnanasambandam, S. Iniyan, R. Goic,** A review of solar thermal technologies, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 14 (2010) 312–322.
- N. Khlebtsov, L. Trachuk, A. Mel'nikov,** The effect of the size, shape, and structure of metal nanoparticles on the dependence of their optical properties on the refractive index of a disperse medium, *Optics Spectrosc.* 98 (1) (2005) 77–83.
- Omar Behar a, n, Abdallah Khellaf b, Kamal Mohammedi.** A review of studies on central receiver solar thermal power plants. L.E.M.I Laboratory, University of M'hamed Bougara, UMBB, Boumerdes, Algeria *Developpement des Energies Renouvelables, CDER, Bouzareah, Algeria Centre*, 2013.
- Omid Mahian^a, Ali Kianifar^a, Soteris A. Kalogirou^b, Ioan Pop^c, Somchai Wongwises^{d, e}.** A review of the applications of nanofluids in solar energy.
- ^aDepartment of Mechanical Engineering, Engineering Faculty, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. ^bDepartment of Mechanical Engineering and Materials Science and Engineering, Cyprus University of Technology, Cyprus. ^cDepartment of Mathematics, Babes-Bolyai University, 400084 Cluj-Napoca, CP 325, Romania. ^dFluid Mechanics, Thermal Engineering and Multiphase Flow Research Lab. (FUTURE), Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangmod, Bangkok 10140, Thailand. ^eThe Academy of Science, The Royal Institute of Thailand, Sanam Suea Pa, Dusit, Bangkok 10300, Thailand.
- O. Abouali, G. Ahmadi,** Computer simulations of natural convection of single phase nanofluids in simple enclosures: a critical review, *Appl. Therm. Eng.* 36 (2012) 1–13.
- Pantzali MN, Mouza AA, Paras SV.** Investigating the efficacy of nanofluids as coolants in plate heat exchangers (PHE). *Chem Eng Sci* 2009;64:3290– 300.
- Pitz-Paal, R, Dersch, J Milow,** (2005). European Concentrated Solar Thermal Road-Mapping (ECOSTAR): roadmap document. SES6-CT-2003-502578. [/http://www.promes.cnrs.fr/uploads/pdfs/ecostar/ECOSTAR.Summary.pdfS](http://www.promes.cnrs.fr/uploads/pdfs/ecostar/ECOSTAR.Summary.pdfS).

- Py Xavier, Azoumah Yao, Olives Regis.** Concentrated solar power: current technologies, major innovative issues and applicability to West African countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2013;18:306–15.
- R. Saidur^{a,*}, K.Y. Leong^b, H.A. Mohammad^c.** A review on applications and challenges of nanofluids (2011). ^aDepartment of Mechanical Engineering, University of Malaya, 50603 Kuala Lumpur, Malaysia. ^bDepartment of Mechanical Engineering, National Defense University of Malaysia, Sg Besi Camp, 57000 Kuala Lumpur, Malaysia. ^cDepartment of Mechanical Engineering, College of Engineering, Universiti Tenaga Nasional, Km 7, Jalan Kajang-Puchong, 43009 Kajang, Selangor, Malaysia.
- Renewable energy technologies:** cost analysis series. Volume 1: power sector issue 2/5, Concentrating solar power. IRENA, June; 2012.
- Rohsenow, W., Hartnett, J., Cho, Y.** Handbook of heat transfer (3rd Edition ed.). New York, N. Y., United States of America: McGraw-Hill (1998).
- Romero-Álvarez Manuel, Zarza Eduardo.** Concentrating solar thermal power. energy conversion (19). LLC: Taylor & Francis Group; 2007.
- R. Saidur, K.Y. Leong, H.A. Mohammad,** A review on applications and challenges of nanofluids, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 15 (2011) 1646–1668.
- R. Saidur, S.N. Kazi, M.S. Hossain, M.M. Rahman, H.A. Mohammed,** A review on the performance of nanoparticles suspended with refrigerants and lubricating oils in refrigeration systems, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 15 (2011) 310–323.
- R. Saidur, T.C. Meng, Z. Said, M. Hasanuzzaman, A. Kamyar,** Evaluation of the effect of nanofluid-based absorbers on direct solar collector, *Int. J. Heat Mass Transfer* 55 (2012) 589–5907.
- R.A. Taylor, P.E. Phelan, T.P. Otanicar, C.A. Walker, M. Nguyen, S. Trimble, R. Prasher,** Applicability of nanofluids in high flux solar collectors, *J. Renew. Sustain. Energy* 3 (2011) 023104.
- R.A. Taylor, P.E. Phelan, T.P. Otanicar, R. Adrian, R.P. Prasher,** Nanofluid optical property characterization: towards efficient direct absorption solar collectors, *Nanoscale Res. Lett.* 6 (2011) 225.
- R.S. Vajjha, D.K. Das,** A review and analysis on influence of temperature and concentration of nanofluids on thermophysical properties, heat transfer and

- pumping power, *Int. J. Heat Mass Transfer* (2012), <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.03.048>.
- Samir Rafaat, Maadi** 1904-1962, Society and historic in a Cairo suburb, Using the sun's force, *Al alhram Newspaper*, July 9, 1913, Maadi introduces solar energy to the World in 1913, [/http://www.egy.com/maadi/S](http://www.egy.com/maadi/S).
- Serrano E, Rus G, Martínez JG**. Nanotechnology for sustainable energy. *Renew Sust Energy Rev* 2009; 13 (December (9)):2373–84.
- Soteris AKalogirou**. Solar thermoelectric power generation in Cyprus: selection of the best system. *Renewable Energy* 2013;49:278–81.
- Steinmann W-D, Eck M**. Buffer storage for direct steam generation. *Solar Energy* 2006;80:1277–82.
- S.A. Kalogirou**, *Solar Energy Engineering: Processes and Systems*, Elsevier, Oxford, 2009.
- S. Kakaç, Pramuanjaroenkij**, Review of convective heat transfer enhancement with nanofluids, *Int. J. Heat Mass Transfer* 52 (2009) 3187–3196.
- S. Link, M.A. El-Sayed**, Shape and size dependence of radiative, non-radiative and photothermal properties of gold nanocrystals, *Int. Rev. Phys. Chem.* 19 (2000) 409–453.
- S. Mekhilef, R. Saidur, A. Safari**, A review on solar energy use in industries, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 15 (2011) 1777–1790.
- S. Thomas, C. Sobhan**, A review of experimental investigations on thermal phenomena in nanofluids, *Nanoscale Res. Lett.* 6 (2011) 377.
- Tamme R, Laing D, Steinmann W-D**. Advanced thermal energy storage technology for parabolic trough. *Journal of Solar Energy Engineering* 2004;126:794–800.
- Taylor, Robert A; Phelan, Patrick E; Otanicar, Todd P; Adrian, Ronald; Prasher, Ravi**. «Nanofluid optical property characterization: Towards efficient direct absorption solar collectors». *Nanoscale Research Letters* 6 (1): 225. Bibcode: 2011NRL.....6...225T. Doi: 10.1186/1556-276X-6-225. PMC 3211283. PMID 21711750. (2011).
- Taylor, Robert Coulombe, Sylvain Otanicar, Todd Phelan, Patrick Gunawan, Andrey Lv, Wei Rosengarten, Gary Prasher, Ravi et al.** (2013). «Small particles, big impacts: A review of the diverse applications of nanofluids».

Journal of Applied Physics 113: 011301. Bibcode:2013JAP...113a1301T.
doi:10.1063/1.4754271.

The European Academies Science Advisory Council (EASAC). Concentrating solar power: its potential contribution to a sustainable energy future. Policy report 16, November; 2011.

Timofeeva EV, Gavrilov AN, McCloskey JM, Tolmachev YV, Sprunt S, Lopatina LM, et al., Thermal conductivity and particle agglomeration in alumina nanofluids: experiment and theory. Phys Rev E 2007;76(6):16.

T. P. Otanicar, J. S. Golden, “Comparative environmental and economic analysis of conventional and nanofluid solar hot water technologies,” Environmental Science and Technology, vol. 43, no. 15, pp. 6082–6087, 2009.

T. P. Otanicar, P. E. Phelan, R. S. Prasher, G. Rosengarten, R. A. Taylor, “Nanofluid-based direct absorption solar collector,” Journal of Renewable and Sustainable Energy, vol. 2, no. 3, Article ID 033102, 13 pages, 2010.

T. Yousefi, F. Veysi, E. Shojaeizadeh, S. Zinadini, An experimental investigation on the effect of MWCNT–H₂O nanofluid on the efficiency of flat-plate solar collector, Exp. Therm. Fluid Sci. 39 (2012) 207–212.

T. Yousefi, F. Veysi, E. Shojaeizadeh, S. Zinadini, An experimental investigation on the effect of Al₂O₃–H₂O nanofluid on the efficiency of flat-plate solar collectors, Renew. Energy 39 (2012) 293–298.

T. Yousefi, F. Veysi, E. Shojaeizadeh, S. Zinadini, An experimental investigation on the effect of pH variation of MWCNT–H₂O nanofluid on the efficiency of a flat-plate solar collector, Solar Energy 86 (2012) 771–779.

U.S. Choi, Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, ASME FED 231 (1995) 99–103.

Vajjha RS, Das DK. Experimental determination of thermal conductivity of three nanofluids and development of new correlations. Int J Heat Mass Transfer 2009; 52(October (21–22)):4675–82.

V. Khullar, H. Tyagi, P.E. Phelan, T.P. Otanicar, H. Singh, R.A. Taylor, Solar energy harvesting using nanofluids-based concentrating solar collector, in:

Proceedings of MNHMT2012 3rd Micro/Nanoscale Heat & Mass Transfer International Conference on March 3–6, Atlanta, Georgia, USA, 2012.

- V. Trisaksri, S. Wongwises**, Critical review of heat transfer characteristics of nanofluids, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 11 (2007) 512–523.
- Wei Yu, Huaqing Xie**, A Review on Nanofluids: Preparation, Stability Mechanisms, and Applications, School of Urban Development and Environmental Engineering, Shanghai Second Polytechnic University, Shanghai 201209, China. 2011.
- William, BS, Micheal**, 2001. Power from the sun. Available from: [/http: // www.powerfromthesun.net/book.htmS](http://www.powerfromthesun.net/book.htmS).
- W. Daungthongsuk, S. Wongwises**, A critical review of convective heat transfer of nanofluids, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 11 (2007) 797–817.
- W. Escher, T. Brunschweiler, N. Shalkevich, A. Shalkevich, T. Burgi, B. Michel, D. Poulikakos**, On the cooling of electronics with nanofluids, *ASME J. Heat Transfer* 133 (2011) 051401.
- Xuan YM, Roetzel W.** Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids. *Int J Heat Mass Transfer* 2000; 43(October (19)):3701–7.
- Yang Y.** Carbon nanofluids for lubricant application. PhD thesis. University of Kentucky; 2006.
- Yoo D-H, Hong KS, Yang H-S.** Study of thermal conductivity of nanofluids for the application of heat transfer fluids. *Thermochim Acta* 2007; 455(1–2):66–9.
- Yu W, France DM, Choi SUS, Routbort JL.** Review and assessment of nanofluid technology for transportation and other applications. Energy Systems Division, Argonne National Laboratory; 2007.
- Y. Ding, H. Chen, L. Wang, C.-Y. Yang, Y. He, W. Yang, W.P. Lee, L. Zhang, R. Huo**, Heat transfer intensification using nanofluids, *Kona*, Nr. 25 (2007) 23–38.
- Y. Gan, L. Qiao**, Optical properties and radiation-enhanced evaporation of nanofluid fuels containing carbon-based nanostructures, *Energy Fuels* 26 (2012) 4224–4230.
- Y. Gan, L. Qiao**, Radiation-enhanced evaporation of ethanol fuel containing suspended metal nanoparticles, *Int. J. Heat Mass Transfer* 55 (2012) 5777–5782.

- Y. He, S. Wang, J. Ma, F. Tian, Y. Ren**, Experimental study on the light-heat conversion characteristics of nanofluids, *Nanosci. Nanotechnol. Lett.* 3 (2011) 494–496.
- Y. Kameya, K. Hanamura**, Enhancement of solar radiation absorption using nanoparticle suspension, *Solar Energy* 85 (2011) 299–307.
- Y. Li, H. Xie, W. Yu, J. Li**, Investigation on heat transfer performances of nanofluids in solar collector, *Mater. Sci. Forum* 694 (2011) 33–36.
- Y. Li, J. Zhou, S. Tung, E. Schneider, S. Xi**, A review on development of nanofluid preparation and characterization, *Powder Technol.* 196 (2009) 89–101.
- Zanganeh G, Pedretti A, Zavattoni S, Barbato M, Steinfeld A.** Packed-bed thermal storage for concentrated solar power—pilot-scale demonstration and industrial-scale design. *Solar Energy* 2012; 86:3084–98.
- Zhang X, Gu H, Fujii M.** Effective thermal conductivity and thermal diffusivity of nanofluids containing spherical and cylindrical nanoparticles. *J Appl Phys* 2006; 100(4):044325.
- Zhang X, Gu H, Fujii M.** Effective thermal conductivity and thermal diffusivity of nanofluids containing spherical and cylindrical nanoparticles. *Exp Therm Fluid Sci* 2007; 31(6):593–9.
- Zhang X, Gu H, Fujii M.** Experimental study on the effective thermal conductivity and thermal diffusivity of nanofluids. *Int J Thermophys* 2006; 27(2):569–80.
- Zhang, X., Gu, H., & Fujii, M.** (2007). Effective thermal conductivity and thermal diffusivity of nanofluids containing spherical and cylindrical nanoparticles. *Experimental Thermal and Fluid Science* (31), 593-599.
- Zoubida Haddad^{a,b}, Chérifa Abid^b, Hakan F. Oztop^c, Amina Mataoui^d.**
^aDepartment of Electronics and Electrical Engineering, University of Boumerdes, Algeria. ^bAix-Marseille University, CNRS, IUSTI UMR 7343, 13453 Marseille, France. ^cDepartment of Mechanical Engineering, Technology Faculty, Firat University, 23119 Elazig, Turkey. ^dDepartment of Fluid Mechanics, Faculty of Physics, University of Sciences and Technology e Houari Boumediene, Algiers, Algeria. 2013 Elsevier Masson SAS. All rights reserved.