

Universidad Católica de Santa María
Facultad de Ciencias e Ingenierías Físicas y Formales
Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica, Mecánica
Eléctrica y Mecatrónica



**“OBTENCIÓN DE NANOFLUIDOS A PARTIR DE
NANOTUBOS DE CARBONO EN AGUA DEIONIZADA
COMO FLUIDO BASE”**

Tesis presentada por el Bachiller:
Marrón Matta, César Antonio
para optar el Título Profesional de
Ingeniero Mecánico

Asesor: Carpio Rivera Marco

AREQUIPA – PERÚ
2018



Universidad Católica de Santa María

☎ (51 54) 382038 Fax: (51 54) 251213 ✉ ucsm@ucsm.edu.pe 🌐 http://www.ucsm.edu.pe Apartado: 1350

AREQUIPA - PERÚ

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA, MECÁNICA
ELÉCTRICA Y MECATRÓNICA**

INFORME DICTAMINATORIO

VISTO

EL BORRADOR DE TESIS TITULADO:

**“OBTENCION DE NANOFLUIDOS A PARTIR DE
NANOTUBOS DE CARBONO EN AGUA
DEIONIZADA COMO FLUIDO BASE”**

Presentado por el Bachiller:

MARRON MATTA CESAR ANTONIO

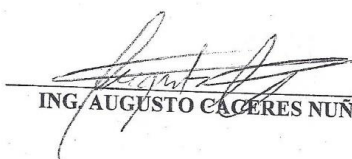
Nuestro **DICTAMEN** es:

Aprobado

OBSERVACIONES: *Sin observaciones*

Arequipa, _____ 201


ING. MARCO CARPIO RIVERA


ING. AUGUSTO CÁCERES NUÑEZ



Universidad Católica de Santa María

☎ (51 54) 382038 Fax: (51 54) 251213 ✉ ucsm@ucsm.edu.pe 🌐 <http://www.ucsm.edu.pe> Apartado: 1350

AREQUIPA - PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍAS FÍSICAS Y FORMALES

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA, MECÁNICA ELÉCTRICA Y
MECATRÓNICA**

SE NOMBRA DICTAMINADOR DE BORRADOR DE TESIS

DECRETO N°009-EPIMMEM-2018

Arequipa, 30 de Mayo 2018

Visto el expediente N°180025805 presentado por el (la) (los) Bachiller(s) Sr(ita) **MARRON MATTA CESAR ANTONIO** de acuerdo el informe emitido por los dictaminadores del Plan de Tesis: Ings. **MARCO CARPIO RIVERA** y **AUGUSTO CACERES NUÑEZ** el informe presentado por el Asesor de Tesis: **MARCO CARPIO RIVERA**, Estando de acuerdo con el Reglamento de Grados y Títulos de la Facultad de Ciencias e Ingenierías Físicas y Formales.

Dictaminadores del Plan de Tesis, documento que presenta el (la) (los) señor (ita) (es) **MARRON MATTA CESAR ANTONIO** Bachiller: estando conforme con lo informado por el Jurado Dictaminador del Plan de Tesis, esta Dirección:

**SE RESUELVE
PRIMERO:**

Designar al Jurado Dictaminador del Borrador de Tesis, presentado por el (la) señor (ita) Bachiller (s): quien (es) pretende (n) optar el Título Profesional de **Ingeniero Mecánico**, con la tesis titulada:

"OBTENCION DE NANOFLUIDOS A PARTIR DE NANOTUBOS DE CARBONO EN AGUA DEIONIZADA COMO FLUIDO BASE"

SEGUNDO:

Se nombra a los señores Docentes Ingenieros:

Ing. **MARCO CARPIO RIVERA**
Ing. **AUGUSTO CACERES NUÑEZ**

El Jurado Dictaminador elaborará el dictamen conjunto en el término de **VEINTE DÍAS** a partir de la fecha.

TERCERO

La Dirección y Secretaría de la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica, Mecánica Eléctrica y Mecatrónica, se encargará del cumplimiento del presente.





DEDICATORIA

A Dios, a mi familia por ser el soporte durante mis años de estudio y la confianza que siempre depositaron en mí.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres y mi familia que son las primeras personas que creyeron en mí, y me brindaron la oportunidad de desarrollar mis habilidades, aptitudes que hoy se ven reflejados en esta tesis.

A mi alma mater Universidad Católica Santa María, al vice rectorado de investigación, y especialmente al Dr. Hermann Alcázar por su guía constante, al equipo de trabajo del Laboratorio de Investigación de Ciencia de los Materiales por permitirme ser parte de él.

Al equipo de trabajo y miembros de laboratorio de ciencias de los materiales, especialmente a la bachiller Alejandra Macedo Uscamayta por su apoyo constante en el desarrollo de esta tesis.

Ingeniera Jacqueline Uscamayta Estefanero, por su asesoramiento en el proceso de filtrado y la facilitación de los equipos necesarios.

Ingeniera Angel Giuliana Ramirez Valverde, por su apoyo y orientación en los procesos químicos.

Al laboratorio de investigación de la Universidad Católica San Pablo por permitirme realizar pruebas en sus instalaciones, especialmente al jefe del laboratorio, Ingeniero Juan Carlos Valdez.

Al laboratorio de Biología Moclular de la Universidad Católica de Santa María, especialmente a la Dra. Rita Milagros Nieto Montesinos.

RESUMEN

Se denomina nanofluidos a la solución compuesta de un nanomaterial en el cual al menos una de sus dimensiones principales sea menor a 100 nanómetros y un fluido líquido base. Los nanofluidos se presentan como nuevas alternativas en sistemas de transferencia de calor debido a que diversos estudios indican que se presentan mejoras en las propiedades térmicas en comparación al fluido base. La gran limitante para que estos sean usados en campos industriales es la facilidad con que el nanomaterial se precipita rápidamente en la solución denominada nanofluido, es por esto que muchos estudios se dedican a caracterizar la dispersión de dichas nanopartículas en el fluido base. En el laboratorio de investigación de ciencia de los materiales de la Universidad Católica de Santa María se sintetiza nanotubos de carbono, el cual será el nanomaterial a partir del cual se obtendrá el nanofluido. Posterior a la síntesis del nanofluido se estudiará la relación de las variables de: porcentaje en volumen del nanomaterial en la solución final, tratamientos físicos y químicos, tiempo de sonicación, así como potencia, con la finalidad de observar cómo afectan estos procesos en la dispersión final de la solución.

Palabras clave: Nanofluido, Nanotubos de carbono NTC, Dispersión, sonicación.

ABSTRACT

Nanofluids are the solution composed of a nanomaterial whose size is less than 100 nanometers and a liquid base fluid. Nanofluids are presented as new alternatives in heat transfer systems due to the fact that several studies indicate that there are improvements in thermal properties compared to the base fluid. The great limitation for these to be used in industrial fields is the ease with which the nanomaterial is rapidly precipitated in the solution called nanofluid, which is why many studies are devoted to characterizing the dispersion of said nanoparticles in the base fluid. In the materials science research laboratory of the Catholic University of Santa María, carbon nanotubes are synthesized, which will be the nanomaterial from which the nanofluid will be obtained. After the synthesis of the nanofluid, the relationship of the variables of: percentage in volume of the nanomaterial in the final solution, physical and chemical treatments, sonication time, as well as power will be studied in order to observe how these processes affect the final dispersion of the solution.

Key words: Nanofluid, Carbon Nanotubes NTC, Dispersion, Sonication.



INTRODUCCIÓN

En la actualidad los desarrollos en la nanotecnología en el campo de la ingeniería mecánica están orientados a la disminución del uso de recursos, y a la eficiencia energética, en consecuencia, este proyecto tiene como finalidad obtener nanofluidos a partir de nanotubos de carbono. Estudios indican que dichos nanofluidos tienden a aumentar la eficiencia en sistemas de transferencia de calor a través de la mejora de sus propiedades térmicas. Tienen algunas ventajas en comparación con las suspensiones sólido-líquido convencionales, tales como alta superficie específica, alta estabilidad a la dispersión, potencia de bombeo reducida y obstrucción por partículas reducidas (Kakade & Pillai, 2008). Estudios demuestran que se obtuvo un 7% de aumento en la conductividad térmica adicionando 1% en concentración en volumen de nanotubos de carbono de paredes múltiples (Assael, Chen, Metaxa, & Wakeham, 2004).

El problema en el uso de nanotubos de carbono en medios acuosos es su tendencia a formar aglomerados y su baja dispersión en soluciones acuosas (Schierz & Zanker, 2009). La estabilidad de estas soluciones es el factor clave que limita el uso industrial de nanofluidos. La carga superficial de los nanotubos de carbono que reciben tratamiento químico a su superficie, les permite repelerse mutuamente en soluciones acuosas, por lo que pueden dispersarse homogéneamente y formarse en solución (Eastman, Choi, Li, Yu, & Thompson, 2001). Para la preparación del nanofluido se aplicará dos métodos, químicamente se procederá a su purificación, y posteriormente a la oxidación de su superficie; estos dos procedimientos son parte del tratamiento químico. Como tratamiento físico se hará uso de un equipo de ultrasonido para su homogenización (Farbod, Ahangarpur, & Gholamreza, Stability and thermal conductivity of water-based carbon nanotube nanofluids., 2014).

En el desarrollo de este proyecto se realizará el estudio de la dispersión a partir de los tratamientos físicos y químicos, variación de su concentración en volumen de las nanopartículas.

TABLA DE CONTENIDOS

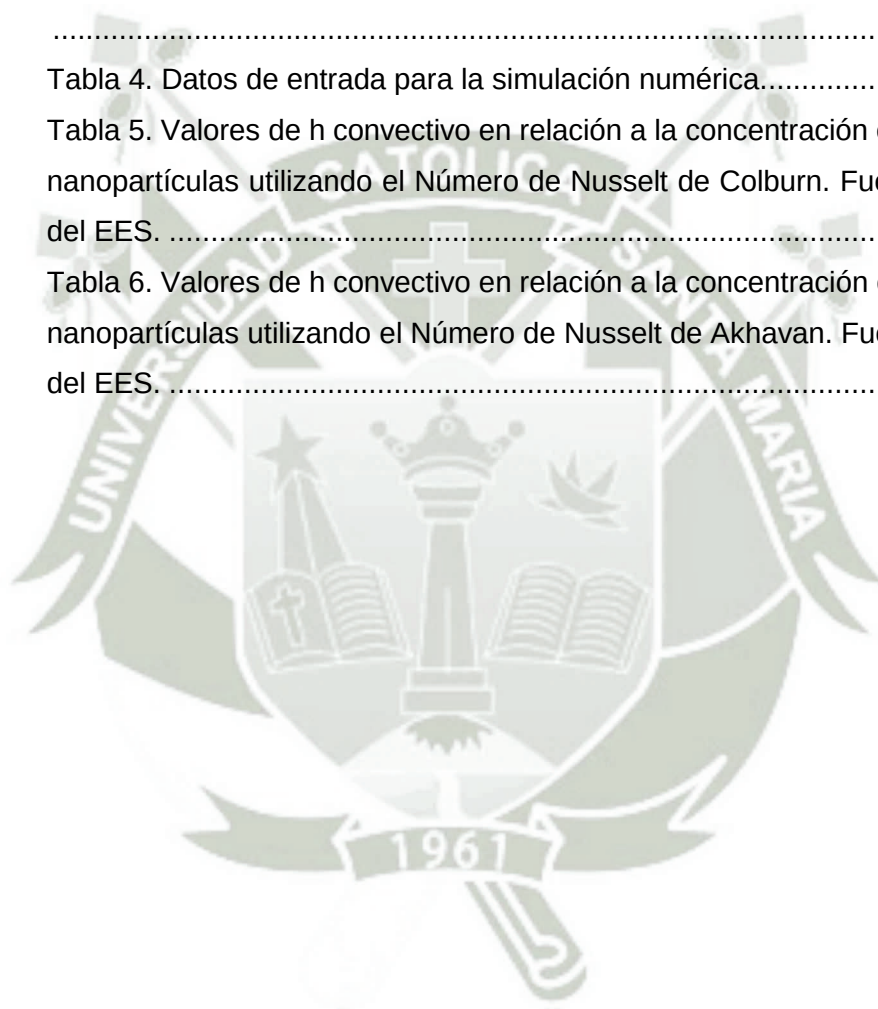
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS.....	iii
RESUMEN.....	iv
ABSTRACT	v
INTRODUCCIÓN.....	vi
LISTA DE TABLAS	x
LISTA DE FIGURAS	xi
Capítulo I: MARCO METODOLÓGICO	1
1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	1
1.2 JUSTIFICACIÓN.....	1
1.3 HIPÓTESIS	2
1.4 VARIABLES INDEPENDIENTES	2
1.5 VARIABLES DEPENDIENTES	2
1.6 OBJETIVOS	3
1.6.1 OBJETIVO GENERAL.....	3
1.6.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
1.7 ALCANCES	3
1.8 ANTECEDENTES	4
Capítulo II: MARCO TEÓRICO	6
2.1 NANOFLUIDO.....	6
2.2 NANOMATERIALES DE CARBONO	6
2.2.1 Nanotubos de carbono	7
2.3 PREPARACIÓN DE NANOFLUIDOS	8
2.3.1 Método de dos pasos.....	9
2.3.2 Método de un paso.....	10

2.4	DISPERSIÓN EN NANOFLUIDOS.....	10
2.5	MECANISMO DE DISPERSIÓN.....	13
2.6	NANOFLUIDOS DE CARBONO.....	15
2.6.1	Tratamiento de superficie de nanomateriales de carbono.....	16
2.7	EVALUACIÓN DE LA ESTABILIDAD EN LA DISPERSIÓN DE NANOFLUIDOS.....	18
2.8	APLICACIONES DE LOS NANOFLUIDOS.....	22
2.8.1	Mejorar la transferencia de calor.....	22
2.8.2	Aplicaciones en energía.....	22
2.9	CONVECCIÓN INTERNA FORZADA.....	23
2.10	PROPIEDADES DE LOS NANOFLUIDOS.....	26
2.10.1	Conductividad Térmica.....	26
2.10.2	Calor Específico.....	28
2.10.3	Viscosidad en nanofluidos.....	28
2.10.4	Densidad.....	29
Capítulo III: METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....		30
3.1	UBICACIÓN DEL ÁREA DE INVESTIGACIÓN.....	30
3.2	MATERIALES E INSTRUMENTOS.....	30
3.2.1	Materiales y Reactivos.....	30
3.2.2	Instrumentos y Maquinaria.....	30
3.2.3	Insumos.....	31
3.3	PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....	31
3.3.1	Procedimiento de obtención de nanofluido con tratamiento físico	31
3.3.2	Procedimiento de obtención de nanofluido con tratamiento químico y físico.....	41

3.4	CARACTERIZACIÓN DE LOS NANOFLUIDOS OBTENIDOS	57
3.4.1	Potencial Zeta	57
3.4.2	Nanosizer	57
3.4.3	Espectrofotometría	58
3.5	SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA CONVECCIÓN FORZADA EN UNA TUBERÍA RECTA.....	58
Capítulo IV: PRUEBAS Y RESULTADOS.....		60
4.1	OBTENCIÓN DE NANOFLUIDOS CON TRATAMIENTO FÍSICO A DIFERENTES CONCENTRACIONES EN VOLUMEN	60
4.2	OBTENCIÓN DE NANOFLUIDOS CON TRATAMIENTOS QUÍMICO Y FÍSICO A DIFERENTES CONCENTRACIONES EN VOLUMEN	63
4.3	CARACTERIZACIÓN DE NANOFLUIDOS POR MEDICIÓN DEL POTENCIAL ZETA, NANOSIZER Y ESPECTROFOTOMETRÍA	68
4.3.1	Resultados de la medición del potencial zeta.....	68
4.3.2	Resultados del nanosizer	76
4.3.3	Resultados de espectrofotometría.....	82
4.4	SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA CONVECCIÓN FORZADA EN UNA TUBERÍA RECTA.....	89
CONCLUSIONES.....		94
RECOMENDACIONES		96
BIBLIOGRAFÍA.....		97
ANEXOS		103

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Valores de conductividad térmica, según diversos autores. Fuente: Propia.	27
Tabla 2. Cantidad necesaria de nanotubos de carbono en volumen y peso, para la preparación de nanofluidos con tratamiento físico. Fuente: Propia.	38
Tabla 3. Cantidad necesaria de nanotubos de carbono en volumen y peso, para la preparación de nanofluidos con tratamiento químico y físico. Fuente: Propia.	54
Tabla 4. Datos de entrada para la simulación numérica.....	58
Tabla 5. Valores de h convectivo en relación a la concentración en volumen de nanopartículas utilizando el Número de Nusselt de Colburn. Fuente: Obtenido del EES.	90
Tabla 6. Valores de h convectivo en relación a la concentración en volumen de nanopartículas utilizando el Número de Nusselt de Akhavan. Fuente: Obtenido del EES.	92



LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Número de artículos en nanofluidos y nanofluidos a base de nanotubos de carbono CNT publicados desde 2004 a 2016. Fuente: (Yazid, Sidik, & Yahya, 2017)	5
Figura 2. Estados de hibridación de nanomateriales basados en carbono. Fuente: (Mauter & Elimelech, 2008).....	7
Figura 3. Grafeno y nanotubos de carbono como (A) nanotubos de carbono de capa simple y (B) nanotubos de carbono de capa múltiple. Fuente: (Vidu, y otros, 2014)	8
Figura 4. Funcionalización química de los NTC. Fuente: (Ghozatloo, Morad Rashidi, & Shariaty-Niasar, 2014).....	9
Figura 5. Esquema de la dispersión de nanofluidos, que muestra varios tipos de fuerzas ejercidas sobre una sola partícula, y la interacción entre nanopartículas vecinas, lo que conduce a formar agregados en el fluido base. Fuente: (Yu, y otros, 2017)	12
Figura 6. Esquema de mecanismos de estabilización para nanofluidos. (A) estabilización electrostática, (B) estabilización estérica, (C,D) estabilización electrostérica. Fuente: (Yu, y otros, 2017).	15
Figura 7. Esquema que muestra la modificación superficial no covalente y covalente de los nanomateriales de carbono para lograr una dispersión estable de nanofluidos a base de carbono. Fuente: (Yu, y otros, 2017)	17
Figura 8. Modificación covalente de la superficie del óxido de grafeno con aplicación química de nitreno. Fuente: (He & Gao, 2010)	18
Figura 9. Técnicas de caracterización representativas para el comportamiento de dispersión y la estabilidad de los nanofluidos térmicos que incluyen la medición del potencial Zeta, el análisis del espectro visible, la sedimentación natural, centrifugación, microscopio electrónico, y dispersión dinámica de la luz. Fuente: (Yu, y otros, 2017).	19
Figura 10. Interacciones energéticas para un volumen diferencial de control en un tubo. Fuente: (Cengel & A., 2011).....	23
Figura 11. Catalizador Fe ₅₀ -NiO, para la obtención de nanotubos de carbono. Fuente: Propia.	33

Figura 12. Nanotubos de carbono envasados. Fuente: Propia.....	34
Figura 13. Picnómetro de 10 ml. Fuente: Propia.	34
Figura 14. Esquema del uso del picnómetro para determinar la densidad del sólido. Fuente: (Covaleda, 2015)	35
Figura 15. Peso del picnómetro copado de agua ultrapura. Fuente: Propia. ..	36
Figura 16. Picnómetro con nanotubos de carbono. Fuente: Propia.....	36
Figura 17. Peso del picnómetro con nanotubos de carbono. Fuente: Propia.	37
Figura 18. Peso del picnómetro con nanotubos de carbono y agua ultrapura. Fuente: Propia.	37
Figura 19. Nanotubos de carbono para preparar nanofluido con tratamiento físico al 0.05% de concentración en volumen. Fuente: Propia.	39
Figura 20. Mezcla de nanotubos de carbono y agua ultrapura para 430 ml al 0.05% de concentración en volumen. Fuente: Propia.	39
Figura 21. Parámetros del equipo de ultrasonido para la síntesis de nanofluidos.	40
Figura 22. Ácido Nítrico. Fuente: Propia.	44
Figura 23. Ácido sulfúrico. Fuente: Propia.	44
Figura 24. 120 ml de ácido preparado para el tratamiento químico. Fuente: Propia.	45
Figura 25. NTC para el tratamiento químico. Fuente: Propia.	46
Figura 26. 3 gramos de NTC y 120 ml de ácido preparado para el tratamiento químico. Fuente: Propia.	47
Figura 27. Mezcla de NTC y ácido preprado. Fuente: Propia.	47
Figura 28. Mezcla para tratamiento químico en el equipo de ultrasonido para homogeneizar. Fuente: Propia.	48
Figura 29. Parámetros para el proceso de ultrasonicación de la mezcla para el tratamiento químico. Fuente: Propia.	48
Figura 30. Mezcla producto del tratamiento químico y ultrasonicación. Fuente: Propia.	49
Figura 31. Membrana de 0.45 μm de diámetro de poro. Fuente: Propia.	49
Figura 32. Membrana en el embudo bushner. Fuente: Propia.	50
Figura 33. Esquema del sistema de filtrado. Fuente: Propia.	50
Figura 34. Proceso de lavado de los nanotubos de carbono. Fuente: Propia.	51
Figura 35. Papel indicador, valores de PH 2 y PH 7. Fuente: Propia.	51

Figura 36. Mezcla lavada en crisol de porcelana. Fuente: Propia.	52
Figura 37. Proceso de secado en el horno eléctrico BINDER. Fuente: Propia.	52
Figura 38. Nanotubos de carbono, después del secado a 100°C. Fuente: Propia.	53
Figura 39. Mortero para el proceso de trituración de los nanotubos de carbono. Fuente: Propia.	53
Figura 40. Nanotubos de carbono para preparar nanofluido con tratamiento químico y físico al 0.05% de concentración en volumen. Fuente: Propia.	54
Figura 41. Adición de agua ultra pura hasta el volumen deseado para la obtención del nanofluido. Fuente: Propia.	55
Figura 42. Nanotubos de carbono en agua ultra pura, en el equipo de ultrasonido. Fuente: Propia.	56
Figura 43. Parámetros del equipo de ultrasonido para la síntesis de nanofluidos.	56
Figura 44. Trasvase del nanofluido obtenido a un recipiente para pruebas térmicas. Fuente: Propia.	57
Figura 45. Planteo del sistema de solución numérica en el EES. Fuente: Imagen obtenida del Software EES.	59
Figura 46. Nanofluidos con tratamiento físico a diferentes concentraciones. Fuente: Propia.	60
Figura 47. Nanotubos de carbono sin tratamiento químico en agua ultra pura antes del proceso de ultrasonificación. Fuente: Propia.	61
Figura 48. Nanotubos de carbono sin tratamiento químico en agua ultra pura después de agitación física. Fuente: Propia.	62
Figura 49. Muestras de nanofluido con tratamiento físico diluidas 1:1 en agua ultra pura. Fuente: Propia.	63
Figura 50. Peso de los nanotubos de carbono después de haber aplicado el tratamiento químico. Fuente: Propia.	64
Figura 51. Nanofluidos con tratamiento físico a diferentes concentraciones. Fuente: Propia.	65
Figura 52. Nanotubos de carbono con tratamiento químico en agua ultra pura. Fuente: Propia.	66

Figura 53. Muestras de nanofluido con tratamientos químicos y físicos diluidas 1:1 en agua ultra pura. Fuente: Propia.....	67
Figura 54. Proceso de filtrado para preparación de muestras para la caracterización en el Zetasizer. Fuente: Propia.	68
Figura 55. Muestras preparadas para caracterización en el Zetasizer. Fuente: Propia.	69
Figura 56. Potencial Zeta de Nanotubos de carbono sin tratamiento químico en concentración en volumen de 0.05%. Fuente: Obtenida del Zetasizer Nano ZS90.....	70
Figura 57. Potencial Zeta de Nanotubos de carbono sin tratamiento químico en concentración en volumen de 0.1%. Fuente: Obtenida del Zetasizer Nano ZS90.....	71
Figura 58. Potencial Zeta de Nanotubos de carbono sin tratamiento químico en concentración en volumen de 0.2%. Fuente: Obtenida del Zetasizer Nano ZS90.....	72
Figura 59. Potencial Zeta de Nanotubos de carbono con tratamiento químico en concentración en volumen de 0.05%. Fuente: Obtenida del Zetasizer Nano ZS90.....	73
Figura 60. Potencial Zeta de Nanotubos de carbono con tratamiento químico en concentración en volumen de 0.1%. Fuente: Obtenida del Zetasizer Nano ZS90.....	74
Figura 61. Potencial Zeta de Nanotubos de carbono con tratamiento químico en concentración en volumen de 0.2%. Fuente: Obtenida del Zetasizer Nano ZS90.....	75
Figura 62. Potencial Zeta vs Concentración en volumen de nanotubos de carbono en el nanofluido. Fuente: Propia.	75
Figura 63. Tamaño de los aglomerados de Nanotubos de carbono sin tratamiento químico en concentración en volumen de 0.05%. Fuente: Obtenida del Zetasizer Nano ZS90.	76
Figura 64. Tamaño de los aglomerados de Nanotubos de carbono sin tratamiento químico en concentración en volumen de 0.1%. Fuente: Obtenida del Zetasizer Nano ZS90.	77

Figura 65. Tamaño de los aglomerados de Nanotubos de carbono sin tratamiento químico en concentración en volumen de 0.2%. Fuente: Obtenida del Zetasizer Nano ZS90.	78
Figura 66. Tamaño de los aglomerados de Nanotubos de carbono con tratamiento químico en concentración en volumen de 0.05%. Fuente: Obtenida del Zetasizer Nano ZS90.	79
Figura 67. Tamaño de los aglomerados de Nanotubos de carbono con tratamiento químico en concentración en volumen de 0.1%. Fuente: Obtenida del Zetasizer Nano ZS90.	80
Figura 68. Tamaño de los aglomerados de Nanotubos de carbono con tratamiento químico en concentración en volumen de 0.2%. Fuente: Obtenida del Zetasizer Nano ZS90.	81
Figura 69. Tamaño de los aglomerados vs Concentración en volumen de las nanopartículas. Fuente: Propia.	81
Figura 70. Probeta NTC sin tratamiento químico en 0.05% de concentración en volumen diluida 1:1 en agua ultra pura. Fuente: Propia.	82
Figura 71. Absorbancia vs longitud de onda, NTC sin tratamiento químico en 0.05% de concentración en volumen diluida 1:1 en agua ultra pura. Fuente: Obtenida de espectrofotómetro UNICO SQ-2800.	83
Figura 72. Probeta NTC sin tratamiento químico en 0.1% de concentración en volumen diluida 1:1 en agua ultra pura. Fuente: Propia.	83
Figura 73. Absorbancia vs longitud de onda, NTC sin tratamiento químico en 0.1% de concentración en volumen diluida 1:1 en agua ultra pura. Fuente: Obtenida de espectrofotómetro UNICO SQ-2800.	84
Figura 74. Probeta NTC sin tratamiento químico en 0.2% de concentración en volumen diluida 1:1 en agua ultra pura. Fuente: Propia.	84
Figura 75. Absorbancia vs longitud de onda, NTC sin tratamiento químico en 0.2% de concentración en volumen diluida 1:1 en agua ultra pura. Fuente: Obtenida de espectrofotómetro UNICO SQ-2800.	85
Figura 76. Probeta NTC con tratamiento químico en 0.05% de concentración en volumen diluida 1:1 en agua ultra pura. Fuente: Propia.	85
Figura 77. Absorbancia vs longitud de onda, NTC con tratamiento químico en 0.05% de concentración en volumen diluida 1:1 en agua ultra pura. Fuente: Obtenida de espectrofotómetro UNICO SQ-2800.	86

Figura 78. Probeta NTC con tratamiento químico en 0.1% de concentración en volumen diluida 1:1 en agua ultra pura. Fuente: Propia.	86
Figura 79. Absorbancia vs longitud de onda, NTC con tratamiento químico en 0.1% de concentración en volumen diluida 1:1 en agua ultra pura. Fuente: Obtenida de espectrofotómetro UNICO SQ-2800.	87
Figura 80. Probeta NTC con tratamiento químico en 0.2% de concentración en volumen diluida 1:1 en agua ultra pura. Fuente: Propia.	87
Figura 81. Absorbancia vs longitud de onda, NTC con tratamiento químico en 0.2% de concentración en volumen diluida 1:1 en agua ultra pura. Fuente: Obtenida de espectrofotómetro UNICO SQ-2800.	88
Figura 82. Gráfico Absorbancia vs Longitud de onda, caracterización de espectrofotometría. Fuente: Propia.	88
Figura 83. Reynolds vs concentración en volumen de nanopartículas. Fuente: Software EES.	89
Figura 84. H convectivo vs concentración en volumen de nanopartículas, usando el Número de Nusselt de Colburn. Fuente: Software EES.	89
Figura 85. H convectivo vs concentración en volumen de nanopartículas, usando el Número de Nusselt de Akhavan. Fuente: Software EES.	91
Figura 86. Simulación para hallar el H convectivo utilizando agua como fluido. Fuente: Obtenida en el EES.	93
Figura 87. Resultados obtenidos para el H convectivo utilizando agua como fluido. Fuente: Obtenida del EES.	93

Capítulo I: MARCO METODOLÓGICO

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

En las instalaciones del laboratorio de investigación de ciencia de los materiales de la Universidad Católica de Santa María se sintetiza nanotubos de carbono a través del método de deposición química de vapor (CVD). Se desea elaborar nanofluidos a partir de los nanotubos, este es un procedimiento nuevo a llevarse a cabo en las instalaciones del laboratorio, por lo cual no se tienen registros del proceso necesario para dicha obtención, por lo tanto, en base al estudio de antecedentes se tomará en cuenta procesos y parámetros recomendados y se ajustarán al contexto de nuestro laboratorio.

En sistemas de transferencia de calor, tomando como ejemplo a los intercambiadores de calor, a través del uso de un fluido que presente mejores propiedades térmicas en comparación al agua, que es el fluido más utilizado, se presentarían dos alternativas: Disminuir el tamaño de los equipos a utilizar o trabajar con mayores tasas de calor a disipar. Antes de poder estudiar sus propiedades térmicas es necesario estudiar su estabilidad y la dispersión de las nanopartículas en el fluido base para determinar su posible aplicación en sistemas reales.

1.2 JUSTIFICACIÓN

Con los nuevos enfoques en la gestión de la energía, los avances tecnológicos se dirigen a mejorar la eficiencia de los sistemas, aumentar la potencia de los sistemas o de hacer los sistemas más compactos, es por esto que los nanofluidos ven su aplicación en todos los sistemas que impliquen transferencia de calor, desde equipos de refrigeración, intercambiadores de calor, colectores solares.

Recientemente los nanotubos de carbono han ganado un gran interés, desde su descubrimiento en 1991 (Saito & Dresselhaus, 1998). Lo más significativo son sus propiedades térmicas, ya que demuestran valores muy altos de conductividad térmica ($2000 - 3000 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$) (Assael & al., 2005).

Por ende, la investigación de las condiciones que permitan la síntesis de nanofluidos y su posterior aplicación, son importantes para continuar desarrollando nuevas tecnologías. Posteriormente a este trabajo podrán caracterizarse los parámetros para mejorar sus propiedades térmicas y la estabilidad de las nanopartículas en la solución en periodos de tiempo prolongados, para luego ser aplicado y analizado en sistemas reales.

1.3 HIPÓTESIS

Al emplear el método de deposición química de vapor (CVD), en el laboratorio de Investigación de Ciencia de los Materiales de la Universidad Católica de Santa María, se obtiene nanotubos de carbono. Para que estos se mezclen con agua deionizada, es necesario realizar un tratamiento químico a los nanotubos para, posteriormente ejecutar un proceso de homogenización por ultrasonido (proceso físico). A partir de los pasos mencionados se espera obtener como resultado el nanofluido.

Una vez obtenido el nanofluido se desea estudiar la dispersión a través de un ensayo de espectrofotometría, además de dicho estudio, también se realizará la medición del potencial zeta para determinar la estabilidad de la nanopartícula en el fluido base y se comparará el tamaño de los aglomerados para determinar la importancia de los tratamientos en la obtención de nanofluidos.

1.4 VARIABLES INDEPENDIENTES

- Concentración en volumen de nanotubos en el fluido.
- Tratamientos físicos y químicos.

1.5 VARIABLES DEPENDIENTES

- Estabilidad en dispersión.
- Absorción de haz de luz.
- Tamaño de los aglomerados.

1.6 OBJETIVOS

1.6.1 OBJETIVO GENERAL

Obtener nanofluidos a partir de una solución de agua deionizada y nanotubos de carbono.

1.6.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Elaborar un procedimiento para la elaboración de nanofluidos, en el laboratorio de investigación de ciencia de los materiales de la Universidad Católica de Santa María.
- Caracterizar la incidencia de los procesos físicos y químicos en el tratamiento de las nanopartículas para mejorar la dispersión de las mismas en el fluido base.
- Evaluar teóricamente las propiedades térmicas de los nanofluidos a base de nanotubos de carbono en base a los modelos matemáticos existentes.

1.7 ALCANCES

Este proyecto considera las condiciones necesarias, a partir de un estudio previo de la información que se pueda obtener en libros, artículos de revistas científicas, para elaborar nanofluidos a partir de los nanotubos que ya se obtienen en el laboratorio.

Por lo tanto, el proyecto comprende la elaboración del procedimiento y la ejecución del mismo. El procedimiento comprenderá: La preparación previa de los nanotubos (purificación y oxidación de la superficie), dispersión en el fluido base, ejecución de pruebas e interpretación de resultados para determinar su estabilidad. Los modelos matemáticos, para su evaluación en aplicaciones térmicas, serán tomadas en referencia a estudios que ya se han realizado, y los valores necesarios para dicha simulación, serán tomados a partir de ensayos disponibles en la literatura encontrada.

1.8 ANTECEDENTES

Los nanofluidos ya llevan un siglo de estudio, desde que en 1904 Maxwell-Garnett modelaran y predijeran como podía incrementar la conductividad térmica en fluidos con suspensiones de micro partículas, y que posteriormente en 1962, el modelo propuesto se desarrolló por Hamilton y Crosser. Dicho trabajo sirvió de base para que luego, en 1973 Jeffrey introdujera diferentes parámetros, pero efectivos al momento de evaluar la conductividad térmica. (Farbod, Ahangarpur, & Gholamreza, 2014).

(Schierz & Zanker, 2009) estudiaron que el problema de trabajar con NTC para obtener nanofluidos era su tendencia a sedimentarse y formar una masa compacta; como también su baja dispersibilidad en soluciones acuosas. Farbod, Tadavani & Kiasat (2011) utilizaron la funcionalización química y oxidación en los NTC, y lograron mejorar la dispersión de los NTC en el fluido base.

Desde los modelos matemáticos, hasta los experimentos actuales se concluye en que se produce un aumento en la conductividad térmica del nanofluido a partir del fluido base utilizado, pero más allá de sus propiedades térmicas, su aplicación industrial se ve limitada por la sedimentación de estas nanopartículas en el fluido. Es por esto que los estudios que se han realizado en los nanofluidos se han orientado a estudiar métodos que ayuden a mejorar su resistencia a la sedimentación.

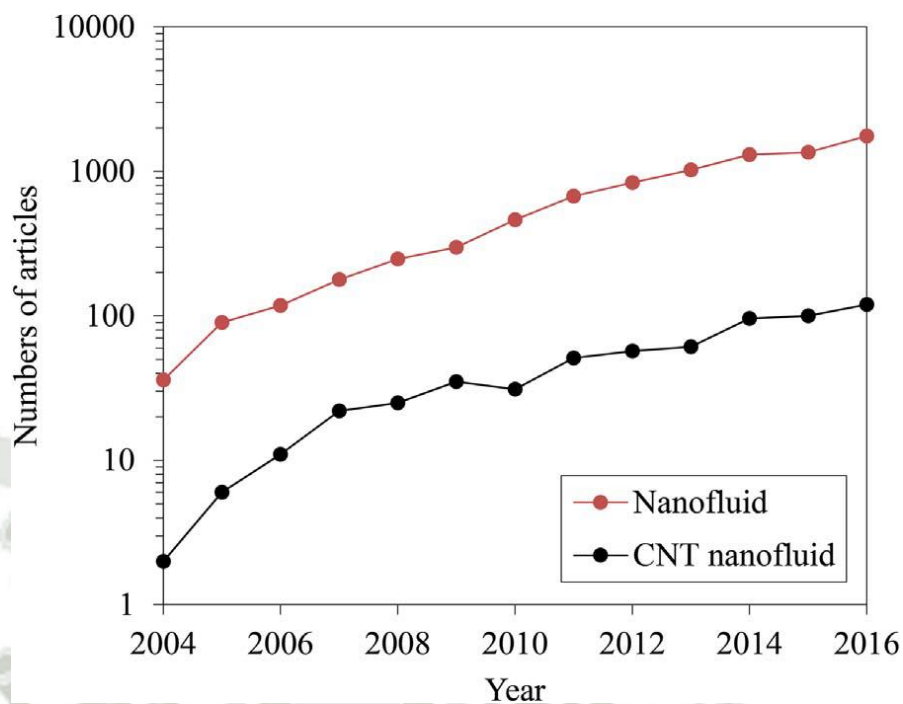


Figura 1. Número de artículos en nanofluidos y nanofluidos a base de nanotubos de carbono CNT publicados desde 2004 a 2016. Fuente: (Yazid, Sidik, & Yahya, 2017)

Capítulo II: MARCO TEÓRICO

2.1 NANOFLUIDO

Se denomina nanofluido a las suspensiones de nanopartículas en fluidos que muestran mejoras significativas en sus propiedades al tener concentraciones pequeñas de estas nanopartículas. (Wong, 2010).

Los nanofluidos son suspensiones líquidas diluidas de nanopartículas con al menos una de sus dimensiones principales más pequeña que 100 nm. De investigaciones anteriores, nanofluidos han sido encontrado que posee propiedades termofísicas mejoradas tales como conductividad térmica, difusividad térmica, viscosidad y coeficientes convectivos de transferencia de calor en comparación con los de fluidos base como aceite o agua. (Choi, Zhang, & Keblinski, Nanofluids, 2004).

2.2 NANOMATERIALES DE CARBONO

El carbono, uno de los materiales más abundantes que se encuentran en la tierra, se puede encontrar en la naturaleza en su forma elemental como grafito, diamante y carbón. Su producción es de aproximadamente 9 Gt/año para aplicaciones tecnológicas, constituyendo la producción más alta en comparación con todos los demás elementos (J., 1990).

Las formas alotrópicas nanoestructuradas de carbono se han investigado intensamente en las últimas dos décadas debido a sus propiedades únicas de hibridación y su sensibilidad a la perturbación durante la síntesis, lo que permite una manipulación fina de las propiedades del material. En particular, el carbono se puede encontrar en varios estados de hibridación diferentes, cada uno con propiedades únicas (Figura 2). De hecho, las propiedades químicas, mecánicas. Térmicas y eléctricas de las diferentes formas alotrópicas están directamente relacionadas con su estructura y estado de hibridación, lo que abre la posibilidad de utilizar el mismo material para una amplia gama de aplicaciones (Mauter & Elimelech, 2008).

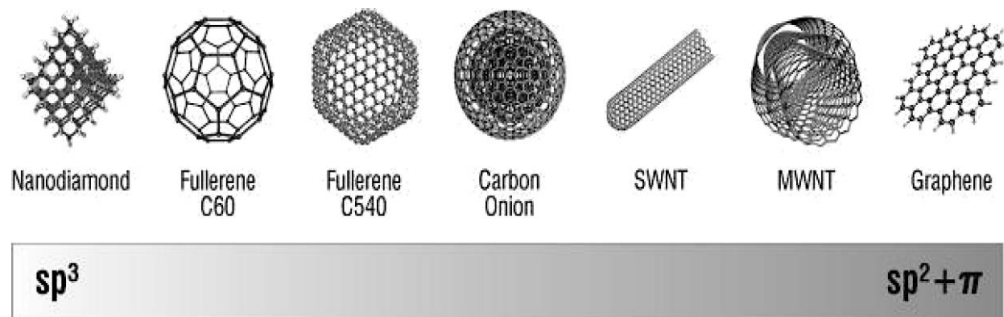


Figura 2. Estados de hibridación de nanomateriales basados en carbono. Fuente: (Mauter & Elimelech, 2008)

2.2.1 Nanotubos de carbono

Nanotubos de carbono (NTC), descubiertos por Iijima en 1991 (Iijima, 1991), son otra forma alotrópica del carbono con una estructura cilíndrica. La estructura única de los NTC da como resultado muchas propiedades extraordinarias. Desde el descubrimiento de los NTC, los científicos han progresado mucho en el estudio experimental y teórico de sus propiedades mecánicas, eléctricas y térmicas. Los NTC exhiben propiedades notables que incluyen:

- Resistencia a la tracción de al menos 37 GPa y tensión a la falla de al menos 6% (Yu, Files, Arepalli, & Ruoff, 2000).
- Módulo de Young $\approx 0.62 - 1.25$ TPa (Gao, Çagin, & Goddard III, 1998).
- Resistencia eléctrica $\approx 1 \mu\Omega$ cm (Tans, y otros, 1997).
- Conductividad térmica ≈ 3000 W/mK (Hone, Whitney, Pistoki, & Zettl, 1999).

Además de sus extraordinarias propiedades, la densidad de los NTC es alrededor de $1.33 - 1.4$ g/cm³ (Gao, Çagin, & Goddard III, 1998), haciéndolo atractivo para aplicaciones ligeras.

Como se aprecia en la Figura 3, los NTC se clasifican como Nanotubos de carbono de capa simple (SWNT) y Nanotubos de carbono de capa múltiple (MWNT). SWNT son hojas de grafeno individuales que forman un tubo, mientras que los MWNT consisten en múltiples capas laminadas (tubos concéntricos) de grafeno (Ajayan, 1999).

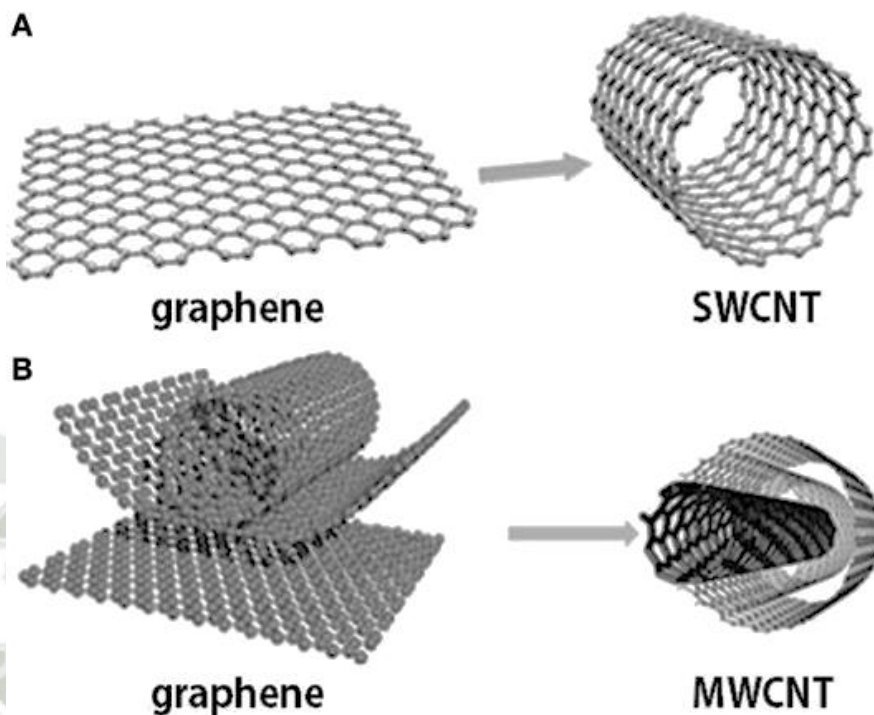


Figura 3. Grafeno y nanotubos de carbono como (A) nanotubos de carbono de capa simple y (B) nanotubos de carbono de capa múltiple. Fuente: (Vidu, y otros, 2014)

2.3 PREPARACIÓN DE NANOFLUIDOS

Uno de los puntos más críticos en la preparación de los nanofluidos es la dispersión de los nanotubos de carbono en el fluido base. Debido a su alta proporción de aspecto y fuertes fuerzas de Van der Waals entre las superficies de carbono, la dispersión de los nanotubos de carbono en medios acuosos, resulta todo un reto. Los NTC son hidrofóbicos por naturaleza, por esta razón no pueden dispersarse en agua bajo condiciones normales. Para dispersar los NTC en el fluido base se utilizan, usualmente, dos métodos: físico y químico. (Hilding, Grulke, & Zhang, 2003).

Los métodos mecánicos generalmente incluyen ultrasonido, usando una sonda o un baño. Mientras los métodos químicos incluyen el uso de surfactantes y la funcionalización de los NTC usando ácidos. El método que incorpora el uso de surfactantes afecta a su comportamiento de adhesión, lo que reduce la tendencia de formar aglomerados por parte de los NTC. Por otro

lado, la funcionalización química, generalmente, incluye el tratamiento de los NTC con ácidos a altas temperaturas, el resultado es la adición de grupos polares como -COOH o -OH en los puntos defectuosos en la superficie de los nanotubos, lo que los hace más hidrofílicos. Ambos, los métodos físicos y químicos pueden reducir la distribución de la relación de aspecto de los NTC. (Hamilton & Crosser, Thermal conductivity of heterogeneous twocomponent, 1962).

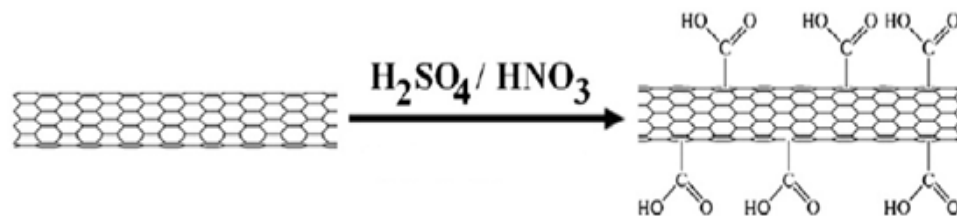


Figura 4. Funcionalización química de los NTC. Fuente: (Ghozatloo, Morad Rashidi, & Shariaty-Niasar, 2014)

2.3.1 Método de dos pasos

Es el método más usado para la síntesis de nanofluidos. Las nanopartículas, nanofibras, nanotubos u otro nanomaterial usado en este método se producen como un polvo seco ya sea por métodos físicos o químicos. Posteriormente la nanopartícula se dispersa en el fluido, este es el segundo paso del proceso, con la ayuda de agitación por fuerza magnética intensiva, agitación ultrasónica, homogenización.

Este método es considerado el más económico para elaborar nanofluidos a gran escala, ya que las nanopartículas ya pueden ser sintetizadas de manera industrial. Debido a la superficie de área y la actividad en la superficie, las nanopartículas tienen la tendencia a formar aglomerados, la importancia de este método radica en mejorar la estabilidad de las nanopartículas en el fluido, también se considera el uso de surfactantes para mejorar dicha estabilidad, sin embargo, la funcionalidad de los surfactantes a alta temperatura también es una gran preocupación, especialmente para aplicaciones de alta temperatura. (Yu & Xie, 2012).

2.3.2 Método de un paso

Para reducir la aglomeración de las nanopartículas, (Eastman, Choi, Li, Yu, & Thompson, 2001) desarrollaron un método de un paso físico de condensación de vapor para preparar nanofluidos a base de cobre y etilenglicol. Este método consiste en simultáneamente hacer y dispersar las partículas en el fluido, en este método, los procesos de secado, almacenamiento, se evita el transporte y la dispersión de nanopartículas, por lo que la aglomeración de nanopartículas se minimiza, y la estabilidad de los fluidos se incrementa. (Li, Zhou, Tung, Schneidar, & Xi, 2009). El método de un paso puede preparar nanopartículas dispersadas uniformemente, y a la vez las partículas pueden suspenderse de forma estable en el fluido base, El sistema de síntesis de nanopartículas de arco sumergido (vacuum-SANSS), es otro método eficiente para preparar nanofluidos con diferentes líquidos dieléctricos. (Lo, Tsung, & Chen, 2005).

Las diferentes morfologías son las que principalmente influyen y determinan las propiedades de conductividad térmica de los líquidos dieléctricos, las nanopartículas preparadas exhiben formas morfológicas similares a agujas, polígonos, cuadrados y círculos; el método de un paso evita muy bien la formación de aglomerados. La principal ventaja del método de un paso es que las nanopartículas están suspendidas uniformemente en el fluido base, pero su desventaja en comparación al método de dos pasos es que los nanofluidos no pueden ser sintetizados de a gran escala, y el proceso requiere de un costo mayor, pero la mayor desventaja radica en el reactante residual que se quedan en el nanofluido producto a la reacción incompleta (Zhu, Lin, & Yin, 2004).

2.4 DISPERSIÓN EN NANOFLUIDOS

El comportamiento de dispersión de los nanofluidos depende de la interacción de muchas fuerzas microscópicas que se ejercen sobre las nanopartículas. Para una sola partícula dentro del fluido base, debido a la diferencia de densidad, la fuerza de la gravedad tiende a causar la sedimentación de las nanopartículas. Mientras tanto, La nanopartícula dentro del fluido experimenta un movimiento térmico aleatorio y, por lo tanto, está sometido a la fuerza browniana, que es capaz de contrarrestar la sedimentación

producto de la fuerza de gravedad y al mismo tiempo ayudar a dispersar la nanopartícula (Figura 5). (Sharma, Park, Srinivasarao, & Mater, 2009).

Para el movimiento de la nanopartícula, otro factor a tener en cuenta es la viscosidad y la fuerza que produce que ayuda a mitigar la sedimentación, conforme a la ley de Stokes. (Bond, 1927). Además, las fuerzas ya mencionadas, otras fuerzas a tener en cuenta que actúan sobre una nanopartícula son las fuerzas de interacción entre partículas, que juegan un papel dominante en afectar el comportamiento de dispersión en nanofluidos térmicos. (Israelachvili, 1992). Durante la interacción entre nanopartículas, las nanopartículas vecinas tienden a aglomerarse bajo las fuerzas de interacción de atracción, claramente en este caso las fuerzas de Van der Waals, como se puede apreciar en la Figura 5. (Pierre, 2013).

Las fuerzas electrostáticas entre las nanopartículas vecinas, también son otras fuerzas a tener en cuenta para la dispersión. La magnitud absoluta de las fuerzas de interacción entre las nanopartículas es fuertemente dependiente de la distancia entre las nanopartículas vecinas. En el rango de distancias cortas entre las nanopartículas, cuando la fuerza atractiva domina sobre la fuerza repulsiva, las nanopartículas tienden a aglomerarse. Además de la distancia entre las partículas, la forma de la nanopartícula también influye en la interacción de atracción entre las nanopartículas vecinas. Las nanopartículas con forma de plato o de varilla presentan mayor área de contacto en comparación con las de forma esférica, en consecuencia, las primeras tienen mayor tendencia a formar agregados. (Israelachvili, 1992).

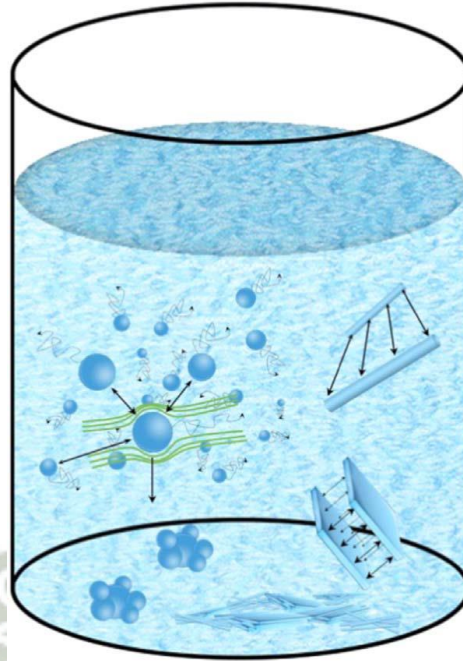


Figura 5. Esquema de la dispersión de nanofluidos, que muestra varios tipos de fuerzas ejercidas sobre una sola partícula, y la interacción entre nanopartículas vecinas, lo que conduce a formar agregados en el fluido base. Fuente: (Yu, y otros, 2017)

Para las partículas aglomeradas, la fuerza de sedimentación o de gravedad misma, que son mucho menores a la fuerza browniana antes de que se produzca la aglomeración, son las que dominan el comportamiento de dispersión. Termodinámicamente, el nanofluido, como un todo, está sujeto a la fuerza entrópica, que homogeniza la distribución de las nanopartículas dentro del fluido base maximizando la entropía del sistema de dispersión. Para nanofluidos térmicos, la alta temperatura de servicio, por un lado, favorece el movimiento Browniano de las nanopartículas dentro del fluido base. El movimiento acelerado puede aumentar la probabilidad de colisión entre las diferentes nanopartículas, y de esta manera favorecer a su aglomeración. Por otro lado, la viscosidad del fluido decrece rápidamente con la temperatura y, por lo tanto, la reducida fuerza de arrastre también favorece a la aglomeración de las nanopartículas. Para los nanofluidos térmicos que tienen aplicación bajo ciclos repetitivos de calentamiento/enfriamiento, el gradiente de temperatura local causaría un movimiento convectivo de las nanopartículas. Tal movimiento colectivo direccional de las nanopartículas podría perturbar la homogeneidad

de la dispersión de los nanofluidos y promover la aglomeración de las nanopartículas. (Yu, y otros, 2017).

2.5 MECANISMO DE DISPERSIÓN

Es fundamental superar la interacción de atracción entre partículas para obtener una dispersión estable en los nanofluidos. En general, se tienen dos tipos de mecanismos de dispersión, estabilización electrostática y estabilización esférica, se han desarrollado para aumentar la interacción repulsiva entre partículas, que puede contrarrestar la fuerza de atracción de Van der Waals.

Para la estabilización electrostática, la fuerza de repulsión existe entre nanopartículas con las mismas cargas superficiales positivas o negativas. Las cargas en la superficie pueden ser introducidas por estos enfoques:

- 1) Adsorción de iones.
- 2) Sustitución de iones.
- 3) Disociación de especies cargadas en superficie.
- 4) Adsorción física de especies cargadas.
- 5) Acumulación o agotamiento de electrones en las superficies.

En el medio líquido de dispersión, un número igual de contra-iones rodeará las partículas cargadas para mantener la neutralidad de carga total, formando así una doble capa eléctrica con la capa de Stern firmemente unida en el interior y la capa difusora de Gouy en el exterior. (Brinker & Scherer, 1990).

En la estabilización electrostática, es la superposición de capas dobles eléctricas que causa la repulsión mutua y proporciona estabilidad de dispersión (Figura 6A). La estabilización electrostática de las partículas del coloide es descrita con éxito por la teoría DLVO, que establece que la interacción total entre partículas electrostáticamente estabilizadas es la combinación de la atracción de Van der Waals y la repulsión electrostática. De acuerdo a la teoría, el potencial de repulsión disminuye exponencialmente con el incremento de la distancia entre las partículas y con el aumento de la concentración y el estado de valencia de los contra-iones. El potencial repulsivo aumenta con una mayor constante dieléctrica del medio de dispersión. La adición del electrolito a

nanofluidos puede reducir el potencial de repulsión, alterar la estabilidad electrostática e inducir a la acumulación de nanopartículas, además, aumentar la concentración de las mismas reduce la distancia entre nanopartículas adyacentes y conduce a una menor repulsión electrostática. Por lo tanto, dicha estabilización electrostática solo es efectiva para la dispersión de nanopartículas diluidas en un medio polar, como agua y etanol, en los que están presentes fuerzas electrostáticas. En esencia, la estabilización electrostática es un método de estabilización cinética. Una vez formados los agregados, no es posible redispersarlos, además, es difícil dispersar diferentes nanopartículas dentro del mismo medio ya que tienen diferentes densidades de carga superficial y de potencial eléctrico. La estabilización estérica es otro enfoque de estabilización ampliamente utilizado para dispersiones en coloides. Como se muestra en la Figura 6B, el método se basa en unir macromoléculas, típicamente cadenas de polímeros, en la superficie de las nanopartículas como una barrera estérica entre las nanopartículas para filtrar la atracción de Van der Waals entre partículas (Somasundaran, Markovic, Krishnakumar, & Yu, 1997).

El polímero podría estar unido irreversiblemente a la superficie de la partícula a través de enlaces químicos, o solo débilmente unido sobre la superficie de la partícula mediante adsorción química o física, las cadenas de polímero adheridas deben tener buena compatibilidad con el fluido base para que sirva como un buen disolvente para expandir el polímero. El injerto de alta cobertura superficial y las largas cadenas de polímero generalmente presentan mejor filtrado del núcleo interno de la partícula. Cuando las partículas injertadas se acercan, la libertad de las cadenas superficiales del polímero se ve comprometida, lo que conduce a la reducción de la entropía de la mezcla. Al mismo tiempo, la alta concentración de las moléculas poliméricas en la región entre las nanopartículas injertadas dan como resultado un efecto osmótico, la entropía reducida y el efecto osmótico inducido, juntos contribuyen a la base física para la estabilización estérica. Comparando la estabilización electrostática, la estabilización estérica presenta las siguientes ventajas:

1. Como método de estabilización termodinámica, tiene mayor aplicabilidad a diferentes sistemas de dispersión.

2. Altas concentraciones de nanopartículas pueden acomodadas e incluso temporalmente las partículas aglomeradas pueden redispersadas.
3. La dispersión no es sensible al electrolito.
4. Es capaz de dispersar simultáneamente diferentes partículas dentro del mismo fluido base.

La estabilización esférica y la estabilización electrostática se pueden combinar para estabilizar la dispersión de las nanopartículas, y tal combinación se conoce como estabilización electrostérica. En este caso, las cadenas del polímero están unidas a superficies de partículas cargadas (Figura 6C), o cadenas de polielectrolitos (Figura 6D) están unidas a superficies sin carga. Cuando dos partículas modificadas superficialmente se aproximan, tanto la estabilización electrostática como la estérica contribuirían a la prevención de la aglomeración. (Yu, y otros, 2017).

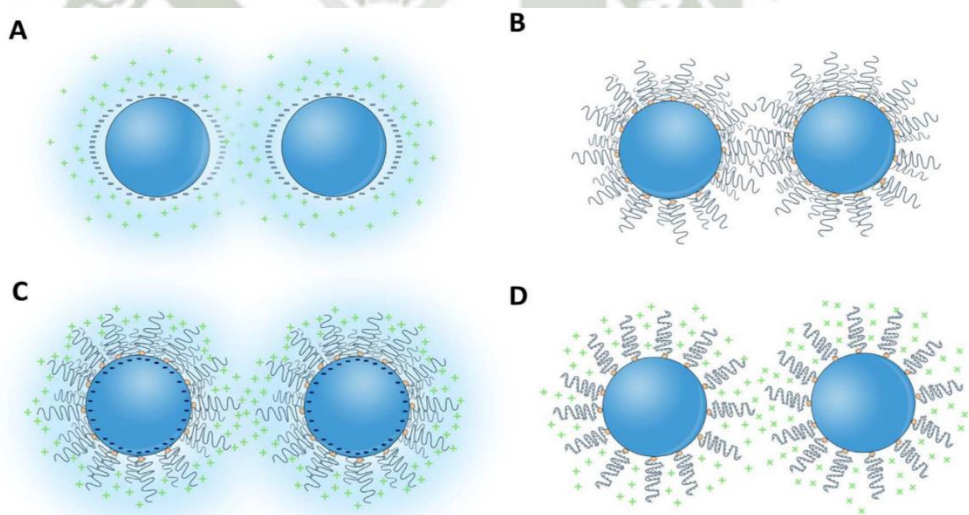


Figura 6. Esquema de mecanismos de estabilización para nanofluidos. (A) estabilización electrostática, (B) estabilización estérica, (C,D) estabilización electrostérica. Fuente: (Yu, y otros, 2017).

2.6 NANOFLUIDOS DE CARBONO

Debido a sus ventajas como alta densidad, alta conductividad térmica, y excelente capacidad de conversión solar – térmica, nanomateriales de carbono como el grafito, nanotubos de carbono, grafeno, óxido de grafeno (GO) y otros

carbonos alotrópicos, han sido investigados con mucha intensidad como las nanopartículas para sintetizar los nanofluidos térmicos. Entre ellos, los últimos años los nanofluidos de grafeno han recibido atención, debido a su desarrollado proceso de fabricación que hace que el proceso sea rápido y sus propiedades termofísicas muy altas. Los nanomateriales de carbono, sin embargo, suelen tener una mayor tendencia a la aglomeración por su alto valor de la constante de Hamaker y más importante, debido a su geometría en forma de hojas o barras. En particular, tener una mayor área de contacto entre nanopartículas vecinas daría lugar a una mayor de atracción entre ellas producto de la fuerza de Van der Waals y aglomeración irreversible. Para prevenir el apilamiento o la aglomeración de estas nanopartículas, se han propuesto varios esquemas para mejorar la estabilidad de dispersión de los nanofluidos. Muy a menudo, la agitación mecánica por vibración ultrasónica se toma como primer paso para separar físicamente las nanopartículas apiladas. Esta técnica es solo efectiva para lograr una dispersión temporal en nanofluidos a base de agua, entonces la sonicación es usada como una técnica secundaria para la preparación de nanofluidos con estabilidad de dispersión a largo plazo. En contraste, el tratamiento a la superficie es el enfoque más utilizado y efectivo para realizar una dispersión estable con duraciones más largas. (Amiri, y otros, 2015).

2.6.1 Tratamiento de superficie de nanomateriales de carbono

Las modificaciones en la superficie donde el material no covalente, se refieren a interacciones débiles tales como Van der Waals, interacciones hidrofóbicas y en los enlaces π - π , entre las nanopartículas y las moléculas modificadas. (Sarsam, Amiri, Kazi, & Badarudin, 2016).

La modificación covalente de la superficie depende de la reacción química entre los grupos funcionales en el modificador y la superficie del nanomaterial de carbono. (Veca, y otros, 2009). Como se muestra en la Figura 7, los nanomateriales de carbono presentan grupos hidroxilo y epoxi en el plano basal y grupos carboxilo principalmente en el borde, lo que permite la posterior reacción química entre estos grupos funcionales y los químicos que permiten la modificación de la superficie.

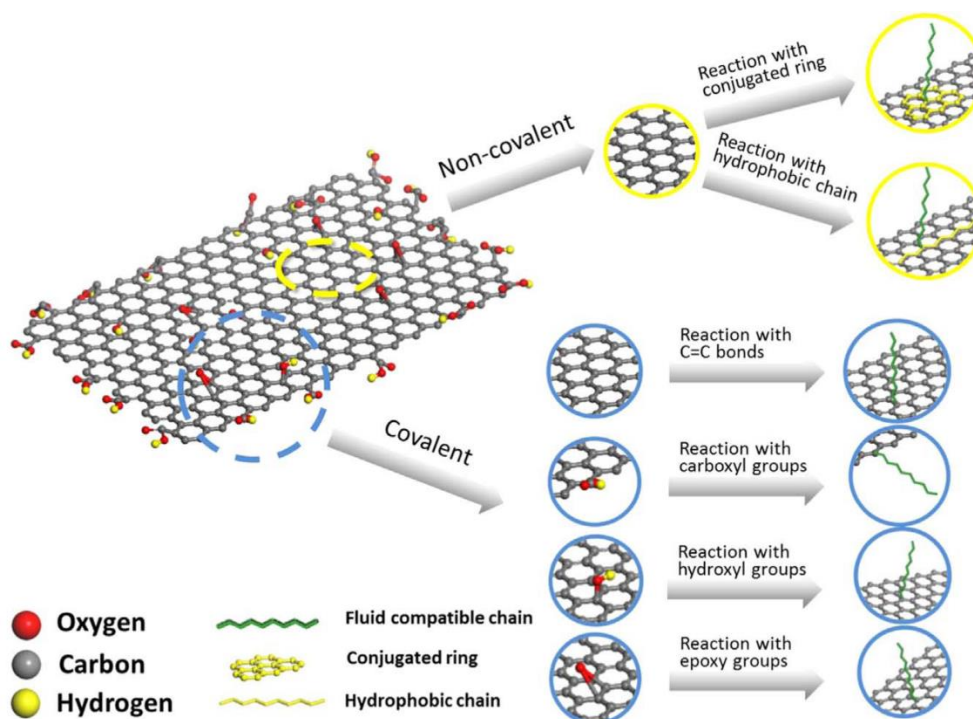


Figura 7. Esquema que muestra la modificación superficial no covalente y covalente de los nanomateriales de carbono para lograr una dispersión estable de nanofluidos a base de carbono. Fuente: (Yu, y otros, 2017)

Otros investigadores injertaron cadenas de polímeros en la superficie de óxidos de grafeno a través de la reacción de sustitución nucleofílica. En este caso, los grupos amina ($-NH_2$), presentes en los modificadores de superficie que llevan un par de electrones solitarios pueden atacar a los grupos epoxi en la superficie del óxido de grafeno. Poli-L-lisina, que presenta una gran cantidad de grupos amino activos libres, se han utilizado para modificar la superficie en los óxidos de grafeno y preparar nanofluidos a partir de dicho nanomaterial que sean solubles en agua. (Shan, y otros, 2009).

Se ha señalado que la reacción de sustitución nucleofílica puede proceder fácilmente dentro de un medio acuoso, incluso a temperatura ambiente. Dicho método de modificación de superficie podría ser muy útil y valioso para la producción de grafeno, o cualquier otro nanomaterial de carbono funcionalizado a gran escala. (Yu, y otros, 2017).

En la figura 8 se muestra una nanocapa de grafeno covalentemente funcionalizada por el Nitreno. Bajo activación térmica, los compuestos de azida pueden producir intermediarios de nitreno para formar un enlace covalente con el grafeno a través de la cicloadición de nitrenos a enlaces C = C de los anillos aromáticos de grafeno. Mientras tanto, las nanoláminas del óxido de grafeno se reducen térmicamente durante el proceso de modificación de superficie. Diversas cadenas de polímeros podrían ser ancladas covalentemente a la superficie del grafeno y las nanoláminas de grafeno resultantes podrían dispersarse fácilmente en una variedad de disolventes. (He & Gao, 2010).

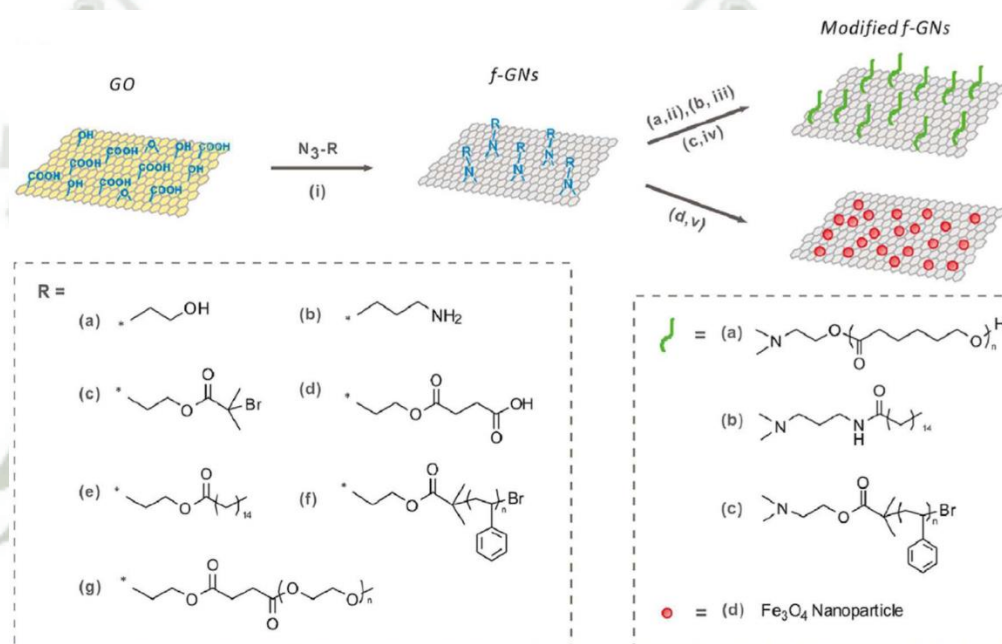


Figura 8. Modificación covalente de la superficie del óxido de grafeno con aplicación química de nitreno. Fuente: (He & Gao, 2010)

2.7 EVALUACIÓN DE LA ESTABILIDAD EN LA DISPERSIÓN DE NANOFLUIDOS

La caracterización adecuada de la estabilidad de dispersión de nanofluidos es crucial para desarrollar estrategias de dispersión y explorar las aplicaciones prácticas de nanofluidos térmicos. La figura 9 enumera varias técnicas comunes que se han desarrollado para evaluar el comportamiento de dispersión y la estabilidad de dispersión de nanofluidos térmicos. La medición del potencial Zeta generalmente se adoptó como el paso inicial para verificar y

predecir la estabilidad de la dispersión. Como un indicador crítico de la estabilidad de la dispersión, especialmente para los nanofluidos a base de agua, el potencial Zeta es la diferencia de potencial eléctrico entre el medio de dispersión y la capa estacionaria de fluido que se une a las nanopartículas dispersas. Se cree que los nanofluidos con altos potenciales de Zeta pueden tener una dispersión estable, mientras que los que presentan un bajo potencial de Zeta tienden a causar agregados. En la práctica, se considera que los nanofluidos con un potencial Zeta superior a 30 mV están estabilizados eléctricamente.

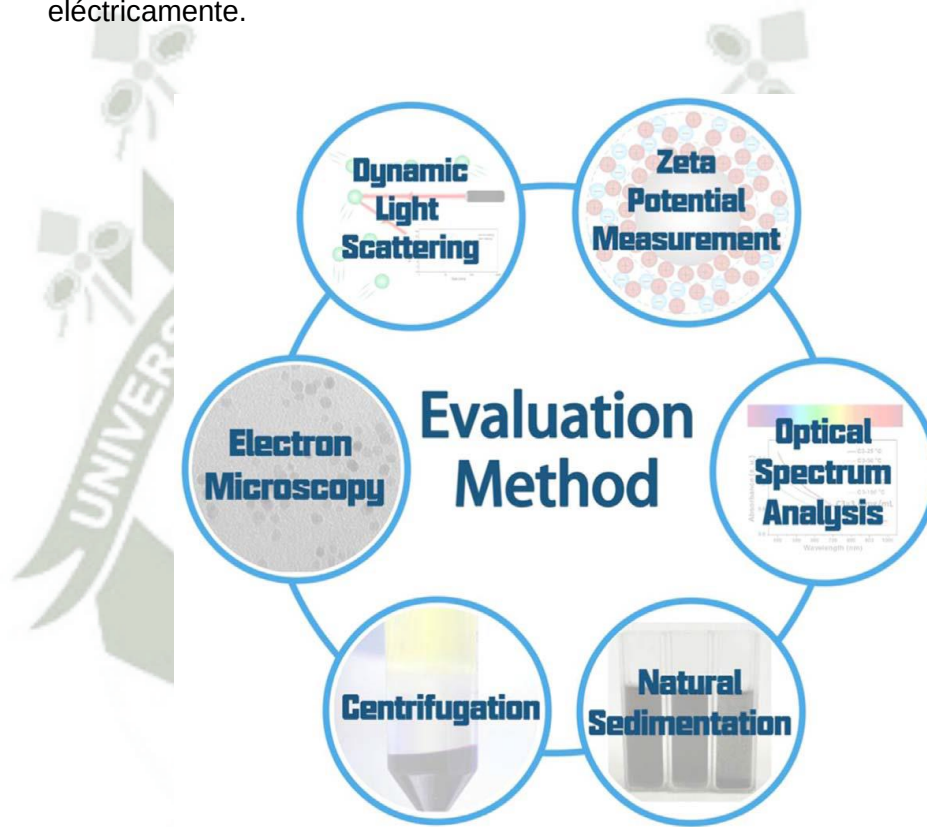


Figura 9. Técnicas de caracterización representativas para el comportamiento de dispersión y la estabilidad de los nanofluidos térmicos que incluyen la medición del potencial Zeta, el análisis del espectro visible, la sedimentación natural, centrifugación, microscopio electrónico, y dispersión dinámica de la luz. Fuente: (Yu, y otros, 2017).

Hasta ahora, varias técnicas, incluyendo sedimentación, espectro visible, microscopía electrónica, y análisis de dispersión de la luz se han desarrollado para analizar el comportamiento de dispersión de nanofluidos térmicos. Si bien cada método tiene sus propias ventajas, a menudo se combinan para

proporcionar una visión integral de la calidad de dispersión de nanofluidos. Entre ellos la sedimentación es un método primario para evaluar visualmente la estabilidad de dispersión de los nanofluidos, debido a la diferencia de densidades entre las nanopartículas y el fluido base, las nanopartículas suspendidas tienden a sedimentarse con el paso del tiempo. La velocidad de sedimentación depende en gran medida de la estabilidad de dispersión. Para los nanofluidos que presentan una pobre dispersión, las nanopartículas se precipitan rápidamente y la dispersión homogénea inicial pasa a convertirse en fases separadas. A menudo se toman fotos digitales de la dispersión, después de intervalos de tiempo predeterminados, para ser comparadas y evaluar cualitativamente la estabilidad de dispersión. Para nanofluidos con una dispersión relativamente buena, es difícil observar una sedimentación obvia durante intervalos cortos de tiempo, puede tomar mucho tiempo antes que los nanofluidos pierdan su estabilidad de dispersión. En este caso, la centrifugación generalmente se aplica como un método conveniente para evaluar la estabilidad de la dispersión estática a largo plazo de una manera acelerada. Aunque la técnica de sedimentación, ya sea natural o centrífuga, es simple y directa, solo puede proporcionar un análisis cualitativo del comportamiento de dispersión de nanofluidos.

Para obtener información cuantitativa de la dispersión en nanofluidos, se ha desarrollado la técnica de la medición del espectro para acoplarlo con el análisis de sedimentación, esta técnica se basa en el principio de que los agregados y los nanofluidos dispersados tienen diferentes grados de absorción de la luz. Con mayor frecuencia, los espectros de absorción dependientes del tiempo de los nanofluidos son registrados por un espectrómetro UV-vis. Con suficientes nanofluidos diluidos, la intensidad de absorción es lineal a la concentración de nanopartículas en el nanofluido, por lo tanto, la calidad de la dispersión podría ser fácilmente comprobada, comparando la absorción de los nanofluidos. La medición de espectros puede ser aplicada para analizar nanofluidos que hayan sido centrifugados, comparando las partículas que flotan con la dispersión original. Si los nanofluidos tienen una excelente estabilidad, la dispersión debería presentar mejores espectros de forma consistente,

independientemente de las duraciones de reposo o los procesos de centrifugación.

A diferencia de los métodos antes mencionados, la microscopía es una forma de observar directamente el tamaño de la partícula, forma y estado de dispersión dentro de nanofluidos. Para caracterizar la materia a nanoescala, Microscopio electrónico de transmisión (TEM) y el Microscopio electrónico de barrido (SEM), son los dos equipos más utilizados. La captura digital de imágenes puede analizarse por software para obtener la distribución de tamaño de la partícula. Para los agregados, estas técnicas permiten obtener detalles sobre la cantidad de partículas que se aglomeran y con qué tipo de orientación. Además, los TEM de alta resolución pueden ofrecer información sobre la distancia entre partículas y espesor de la capa de superficie. Cabe señalar que las muestras para el SEM y el TEM son preparadas secando la dispersión y, por lo tanto, se debe tener cuidado para garantizar que la agregación observada no sea resultado del proceso de secado, otro problema asociado al proceso de secado es la dificultad para obtener muestras microscópicas de alta calidad para nanofluidos a base de aceite, a diferencia de los nanofluidos a base de agua en los que el agua puede ser eliminado fácilmente, el fluido de aceite se absorbería en la superficie de las nanopartículas, que causarían un fuerte efecto de descarga en la observación del SEM y que difumina la imagen en el TEM.

Otra forma muy común de analizar la dispersión en nanofluidos es la dispersión de luz dinámica (DLS), que puede detectar el tamaño de la partícula en suspensión sin necesidad del proceso de secado, esta técnica hace uso de la dispersión Raleigh de luz incidente, típicamente luz láser, por nanopartículas suspendidas. El movimiento browniano de las nanopartículas dentro del fluido podría causar la fluctuación de la intensidad de la dispersión de la luz y el comportamiento del movimiento browniano depende del tamaño de la partícula, por lo tanto, el análisis de tal variación de intensidad produce información acerca de la distribución del tamaño de la partícula. Mientras que los microscopios electrónicos caracterizan el tamaño físico de las nanopartículas sólidas, el método DLS mide el tamaño hidrodinámico de las nanopartículas.

Combinando las dimensiones físicas e hidrodinámicas juntas, el espesor y la conformación de ligandos de superficie o cadenas de polímeros insertados pueden ser inferidos a partir de dicha combinación. (Yu, y otros, 2017).

2.8 APLICACIONES DE LOS NANOFLUIDOS

2.8.1 Mejorar la transferencia de calor

2.8.1.1 Electrónica

El desarrollo tecnológico ha impulsado a que los componentes eléctricos sean cada vez más compactos, lo que hace que la disipación de calor sea más difícil. En general, hay dos enfoques para mejorar la eliminación de calor para equipos electrónicos. Una es encontrar una geometría óptima de dispositivos de enfriamiento; otra es aumentar la capacidad de transferencia de calor. Investigaciones recientes demuestran que los nanofluidos podrían aumentar el coeficiente de transferencia de calor al aumentar la conductividad térmica de un refrigerante. (Jang & S., 2006).

2.8.1.2 Transporte

Los nanofluidos tienen un gran potencial de aplicación en el campo automotriz, especialmente en los sistemas de refrigeración de motores de carga pesada, reduciendo lo complejo de los sistemas de refrigeración haciendo que los sistemas puedan disipar mayores tasas de calor, como también generarían una disminución considerable en los radiadores, lo que llevaría a sistemas más eficientes y en menores consumos de combustible.

2.8.2 Aplicaciones en energía

2.8.2.1 Almacenamiento de energía

El almacenamiento de energía térmica en forma de calor latente ha cobrado real importancia especialmente en nuestros tiempos que buscan sistemas eficientes y el aprovechamiento de energía residual y temas como la energía solar cada vez son opciones más reales a ser usadas. (Demirbas, 2006)

2.8.2.2 Absorción solar

La energía solar es una de las fuentes de energía renovables y de menor impacto ambiental que se conocen. Los sistemas de absorción solar se establecen como métodos que permiten el calentamiento del agua, entre otras de sus muchas aplicaciones, pero se ven limitados por las propiedades térmicas del fluido de sus colectores. Estudios indican que los nanofluidos a base de nanotubos de carbono pueden mejorar la eficiencia de estos colectores en 5% y este valor puede seguir aumentando. (Otanicar, Phelan, Prasher, Rosengarten, & Taylor, 2010).

2.9 CONVECCIÓN INTERNA FORZADA

Según (Cengel & A., 2011), en las aplicaciones de calentamiento y enfriamiento, es común el uso del flujo de líquido en tuberías o ductos, a través de estas, el fluido es forzado a desplazarse a través de bombas, dicha tubería debe ser lo suficientemente larga para realizar la transferencia de calor deseada.

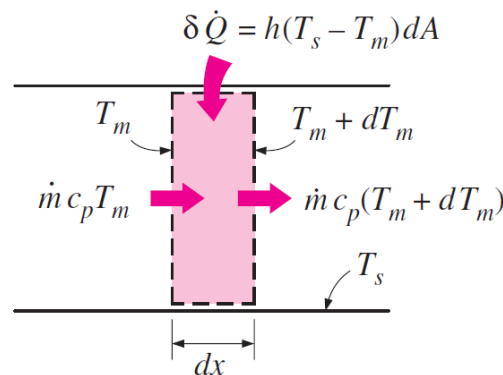


Figura 10. Interacciones energéticas para un volumen diferencial de control en un tubo. Fuente: (Cengel & A., 2011)

La convección interna forzada se expresa mediante:

$$\dot{Q} = \dot{m}c_p(T_e - T_i) = h(T_s - T_m)A_s \quad (1)$$

Donde:

$\dot{Q}$: Razón de transferencia de calor desde el fluido [W]

$\dot{m}$: Flujo másico de fluido $\left[\frac{kg}{s}\right]$

c_p : Calor específico del fluido $\left[\frac{J}{kg \cdot ^\circ C}\right]$

T_e : Temperatura de salida $[^\circ C]$

T_i : Temperatura de entrada $[^\circ C]$

h : Coeficiente de calor convectivo $\left[\frac{W}{m^2 \cdot K}\right]$

T_s : Temperatura en la superficie $[^\circ C]$

T_m : Temperatura media del fluido $[^\circ C]$

A_s : Área superficial del tubo $[m^2]$

Para poder caracterizar la convección, es necesario definir el flujo al interior del tubo

$$Re = \frac{\rho V_{prom} D}{\mu}$$

(2)

Donde:

Re : Número de Reynolds

ρ : Densidad del nanofluido $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$

V_{prom} : Velocidad promedio del flujo $\left[\frac{m}{s}\right]$

D : Diámetro del tubo $[m]$

μ : Viscosidad dinámica del fluido $\left[\frac{kg}{m \cdot s}\right]$

En la práctica, la mayor parte de los flujos son turbulentos, para flujos laminares

$Re < 2300$ y para flujos turbulentos $Re > 10000$

$$Nu = \frac{hD}{k}$$

(3)

Donde:

Nu : Número de Nusselt

h : Coeficiente de transferencia de calor por convección $\left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}\right]$

D : Diámetro de la tubería $[m]$

k : Coeficiente de conductividad térmica $\left[\frac{W}{m \cdot ^\circ C}\right]$

Para el flujo turbulento en tubos lisos, se utiliza la ecuación de Colburn.

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{1/3} \quad \left(\begin{array}{l} 0.7 \leq Pr \leq 160 \\ Re > 10000 \end{array} \right)$$

(4)

Donde:

Nu : Número de Nusselt

Re : Número de Reynolds

Pr : Número de Prandtl

Número de Prandtl

$$Pr = \frac{\mu c_p}{k}$$

(5)

Donde:

Pr : Número de Prandtl

μ : Viscosidad dinámica del fluido [Pa.s]

c_p : Calor específico del fluido $\left[\frac{J}{kg K} \right]$

k : Coeficiente de conductividad térmico $\left[\frac{W}{m. ^\circ C} \right]$

Según (Akhavan-Behabadi, Shahidi, & Aligoodarz, 2015), se puede determinar el Número de Nusselt para nanotubos de carbono funcionalizados en agua como:

$$Nu = 0.1763 Re^{0.6837} Pr^{0.5} (1 + \phi)^{0.6877} \left(1 + \frac{p}{D} \right)^{0.0761} \left(1 + \frac{e}{D} \right)^{0.8125}$$

(6)

Donde:

ϕ : Concentración en peso de los nanotubos de carbono en el nanofluido

Re : Régimen turbulento > 10000

Pr : 4.5~6.5

p/D : 1.70~2.83

e/D : 0.113~0.170

2.10 PROPIEDADES DE LOS NANOFLUIDOS

2.10.1 Conductividad Térmica

La conducción es la transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia hacia las adyacentes menos energéticas, como resultado de interacciones entre esas partículas. La conducción puede tener lugar en los sólidos, líquidos o gases. En los gases y líquidos la conducción se debe a las colisiones y a la difusión de las moléculas durante su movimiento aleatorio.

$$\dot{Q}_{cond} = kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (7)$$

Donde:

$\dot{Q}_{cond}$: Razón de conducción de calor [W]

k : Constante de conductividad térmica del material $\left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$

A : Área perpendicular a la dirección a la dirección de la transferencia de calor [m^2]

ΔT : Diferencia de temperatura a través del cuerpo [K]

Δx : Espesor del cuerpo [m]

La conductividad térmica k es una medida de la capacidad del material para conducir calor. De la ecuación 7, también se puede definir como la razón de transferencia de calor a través de un espesor unitario del material por unidad de área por unidad de diferencia de temperatura. La conductividad térmica de un material es una medida de la capacidad del material para conducir calor. (Cengel & A., 2011)

2.10.1.1 Conductividad térmica en nanofluidos

La característica de transferencia de calor de un fluido puede ser representada por un número de Nusselt, que tiene en cuenta el número de Prandtl que incluye conductividad térmica. Por lo tanto, una primera evaluación del potencial de transferencia de calor de un nanofluido es medir su conductividad térmica. Hasta la fecha, se ha publicado mucha información producto de investigación en esta área para nanofluidos de óxido de metal, pero

en comparación en menor cantidad para nanofluidos de nanotubos de carbono (Das, Putra, & Roetzel, 2003).

Los valores de conductividad térmica de los nanotubos de carbono son variados según los estudios encontrados.

Tabla 1. Valores de conductividad térmica, según diversos autores. Fuente: Propia.

Valor de conductividad térmica k $\left[\frac{W}{m K} \right]$	Fuente
3000	(Osorio, Silveira, Bueno, & Bergmann, 2008)
3500	(Pop, Mann, Wang, Goodson, & Dai, 2006)
3000	(Wen & Ding, 2004)
2000	(Choi, Zhang, Yu, Loockwood, & Grulke, 2001)

A partir del valor de conductividad térmica de la nanopartícula y del fluido base, se han determinado modelos matemáticos capaces de predecir el valor de conductividad térmica del nanofluido, muchos de estos estudios están basados en el modelo de Hamilton y Crosser (Hamilton & Crosser, Thermal conductivity of heterogeneous two-component systems, 1962).

$$k = k_1 \left[\frac{k_2 + (n-1)k_1 - (n-1)\phi_2(k_1 - k_2)}{k_2 + (n-1)k_1 + \phi_2(k_1 - k_2)} \right] \quad (8)$$

Donde:

k : Conductividad térmica del nanofluido $\left[\frac{W}{m K} \right]$

k_1 : Conductividad térmica de la nanopartícula $\left[\frac{W}{m K} \right]$

k_2 : Conductividad térmica del fluido base $\left[\frac{W}{m K} \right]$

ϕ_2 : Concentración en volumen de la nanopartícula

n : Factor de forma de la nanopartícula. Para nanotubos $n = 4,9$

2.10.2 Calor Específico

El calor específico o C_p , se define como una medida de la capacidad de un material para almacenar energía térmica y se expresa en $\frac{J}{kg \cdot ^\circ C}$. (Cengel & A., 2011).

2.10.2.1 Calor específico en nanotubos de carbono

Para los nanotubos de carbono, se tiene el valor de calor específico a presión constante de: $500 \frac{J}{kg \cdot K}$ (Yi, Lu, Lin-Dian, Pan, & Xie, 1999).

Según (Kumaresan & Velraj, 2012)

$$C_{pnf} = \frac{\phi \cdot \rho_{np} \cdot c_{pnp} + (1 - \phi) \cdot \rho_f \cdot c_{pf}}{\rho_{nf}} \quad (9)$$

Donde:

C_{pnf} : Calor específico del nanofluido $\left[\frac{J}{kg \cdot ^\circ C} \right]$

ϕ : Concentración en volumen de la nanopartícula

ρ_{np} : Densidad de la nanopartícula $\left[\frac{kg}{m^3} \right]$

c_{pnp} : Calor específico de la nanopartícula $\left[\frac{J}{kg \cdot ^\circ C} \right]$

ρ_f : Densidad del fluido $\left[\frac{kg}{m^3} \right]$

c_{pf} : Calor específico del fluido $\left[\frac{J}{kg \cdot ^\circ C} \right]$

ρ_{nf} : Densidad del nanofluido $\left[\frac{kg}{m^3} \right]$

2.10.3 Viscosidad en nanofluidos

Algunas fórmulas teóricas han sido desarrolladas para relacionar la viscosidad relativa de suspensiones coloidales y estas se derivan a partir del

modelo de Einstein. Este es un modelo que se basa en la suposición que el fluido contiene partículas en fracción de volumen menor a 1%.

$$\mu_r = (1 + 2.5\phi)$$

(10)

(Einstein, 1956)

Donde:

μ_r : Viscosidad dinámica relativa

ϕ : Concentración en volumen de la nanopartícula en el nanofluido

Actualmente, se han realizado comparaciones entre los modelos teóricos y los resultados prácticos, se determinó que el modelo más adecuado para determinar la viscosidad relativa en nanofluidos a partir de nanotubos de carbono, es el modelo Maron-Pierce Modificado (Halefadi, Estellé, Aladag, Doner, & Maré, 2013)

$$\mu_r = \left(1 - \frac{\phi_a}{\phi_m}\right)^{-2}$$

(11)

(Chevalier, Tillement, & Ayela, 2009)

Donde:

μ_r : Viscosidad relativa

ϕ_a : Concentración en volumen de la nanopartícula en el nanofluido

ϕ_m : Fracción volumétrica en volumen cuando la viscosidad infinita

EL valor de $\phi_m = 0.65$ Valor típico (Mueller, Llewellyn, & Mader, 2010).

2.10.4 Densidad

La densidad del nanofluido se puede definir como:

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

(12)

(Shahrul, Mahbubul, Khaleduzzaman, Saidur, & Sabri, 2014)

Capítulo III: METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

3.1 UBIACIÓN DEL ÁREA DE INVESTIGACIÓN

La preparación y la elaboración de los nanofluidos se realizarán en los laboratorios de la Universidad Católica de Santa María. El tipo de investigación es experimental aplicada.

3.2 MATERIALES E INSTRUMENTOS

3.2.1 Materiales y Reactivos

3.2.1.1 Reactivos Químicos

- Ácido sulfúrico 95-97%.
- Ácido nítrico 65%.

3.2.1.2 Materiales

- Bagueta de vidrio.
- Pinza para crisol.
- Luna de reloj de vidrio.
- Cisoles de porcelana.
- Espátula de acero inoxidable.
- Frasco de polipropileno de tapa ancha.
- Cápsula de porcelana.
- Pipetas gravimétricas de vidrio.
- Probeta de vidrio.
- Matraz de vidrio boro silicato de fondo redondo.
- Vaso de precipitado de vidrio.
- Matraz aforado.
- Embudo bushner.
- Matraz kitazato.

3.2.2 Instrumentos y Maquinaria

- Balanza analítica de capacidad máx. 300 gr con precisión de 0.01gr.

- Secador eléctrico 200°C.
- Homogeneizador ultrasónico de 650W de potencia.
- Espectrofotómetro que abarca longitudes de onda desde 190 a 1100 nm.
- Bomba de vacío de 1/8 HP de potencia.
- Zetasizer.

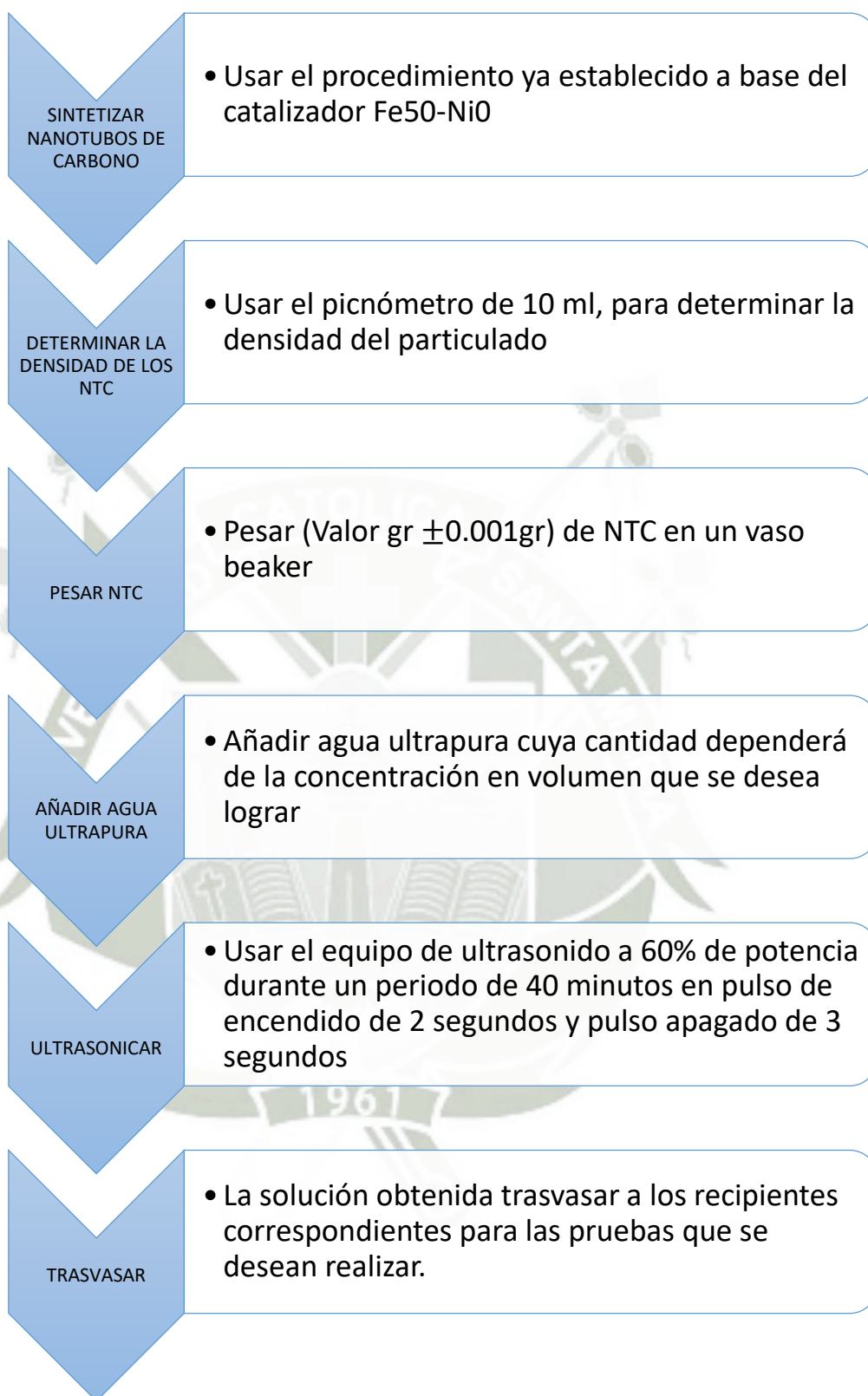
3.2.3 Insumos

- Agua destilada
- Agua ultrapura
- Alcohol puro grado 96°
- Filtro 0.45 μm de poro

3.3 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

3.3.1 Procedimiento de obtención de nanofluido con tratamiento físico

3.3.1.1 Metodología de obtención



3.3.1.2 Desarrollo de la metodología de obtención del nanofluido con tratamiento físico

Para las pruebas posteriores se realizaron tres variantes respecto a la concentración en volumen, 0.05%, 0.1% y 0.2%; cada uno en un total de 430 ml. Se procedió a sintetizar siguiendo la metodología anteriormente indicada

1. El proceso inicia en la obtención de los nanotubos de carbono, para esto se siguió con el procedimiento ya existente para dicho nanomaterial, el catalizador base usado fue el de Fe50-Ni0. Para este proceso es necesario pesar 0.20 gramos de catalizador, como se parecía en la Figura 11, y esparcirlo en el crisol. Adicionalmente se sigue con el programa (Anexo 1).



Figura 11. Catalizador Fe50-Ni0, para la obtención de nanotubos de carbono. Fuente: Propia.

Finalmente se obtiene los nanotubos de carbono, y se procede a envasarlos para su uso posterior (Figura 12).

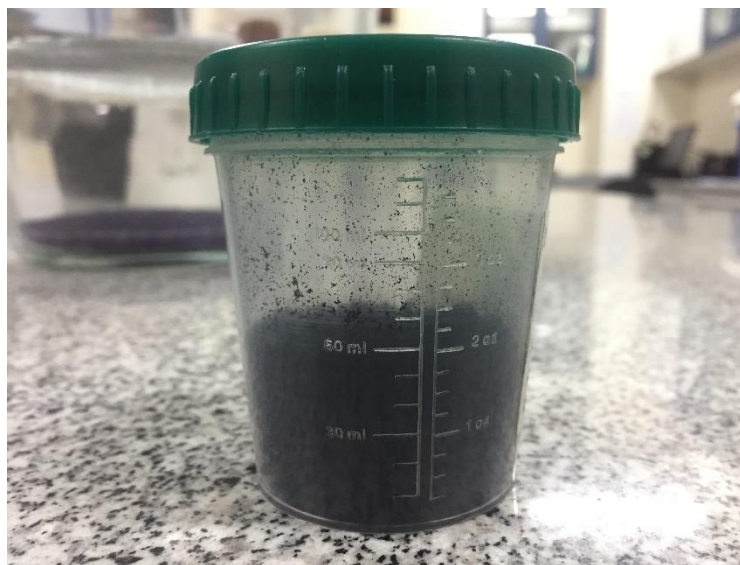


Figura 12. Nanotubos de carbono envasados. Fuente: Propia.

2. Debido a que los nanotubos sintetizados son un material particulado tipo polvo seco, es difícil medir su volumen real, para resolver dicho problema se procedió a buscar en la literatura disponible su valor de densidad, y se encontró que según (Gao, Çagin, & Goddard III, 1998) su valor de densidad varía entre 1.33 a 1.4 gr/m^3 , mientras que (Xing, Yu, & Wang, 2015) determina que la densidad es de 2.1 gr/m^3 . Dado este caso, se hace uso de un picnómetro de 10 ml para determinar la densidad experimental de los NTC sintetizados en el laboratorio.



Figura 13. Picnómetro de 10 ml. Fuente: Propia.

El principio aplicado es tener el peso del picnómetro copado de un fluido, que en este caso es agua ultrapura, más el peso de sólido a determinar su densidad; y, por otro lado, tener el peso del picnómetro con dicho sólido en su interior y volumen restante tenerlo con el mismo fluido, la diferencia entre la masa 1 y la masa 2, conociendo la densidad del fluido líquido empleado, nos da la diferencia en volumen y conociendo el peso del material es posible determinar la densidad del sólido. (Figura 14).

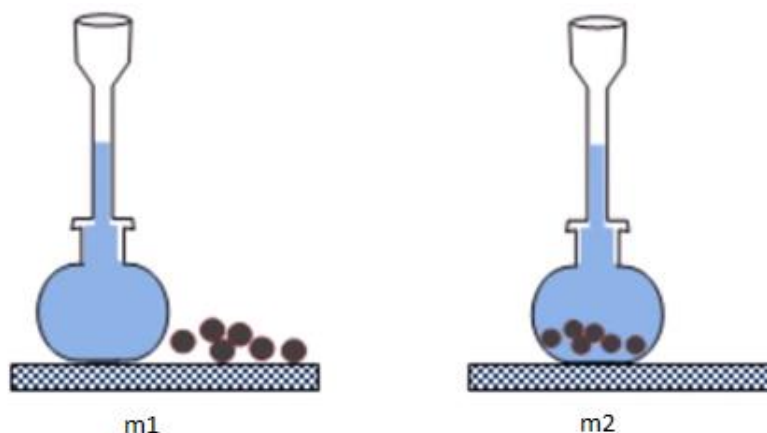


Figura 14. Esquema del uso del picnómetro para determinar la densidad del sólido.

Fuente: (Covaleda, 2015)

Para realizar este experimento, es necesario, en primer lugar, conocer el peso del picnómetro vacío, este valor se obtuvo pesando tres veces y sacando una media, 9.4395 gr.

Luego se procedió a copar el picnómetro con el fluido y también se tomó el valor de dicho proceso (Figura 15).

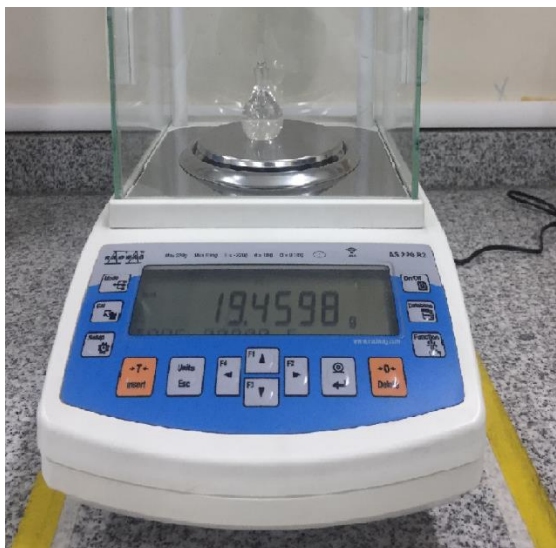


Figura 15. Peso del picnómetro copado de agua ultrapura. Fuente: Propia.

Posteriormente se copó el picnómetro con los nanotubos de carbono (Figura 16), para registrar el peso del nanomaterial (Figura 17).



Figura 16. Picnómetro con nanotubos de carbono. Fuente: Propia



Figura 17. Peso del picnómetro con nanotubos de carbono. Fuente: Propia

El volumen restante del picnómetro se completa con agua ultrapura y procede a registrarse el valor de su peso (Figura 18).

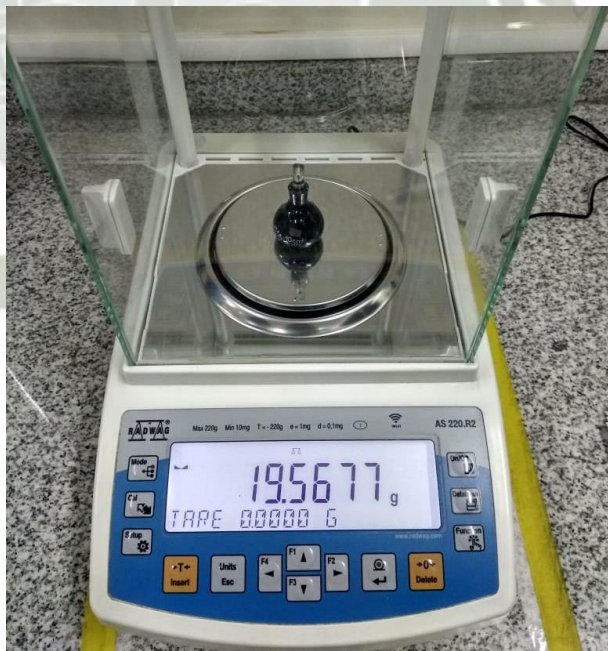


Figura 18. Peso del picnómetro con nanotubos de carbono y agua ultrapura. Fuente: Propia.

Tomando como referencia el esquema de la Figura 14:

$$m_1 = 0.2565 + 19.4575 = 19.7140 \text{ gr}$$

$$m_2 = 19.5680 \text{ gr}$$

$$m_1 - m_2 = 0.146 \text{ gr}$$

Asumiendo la densidad del agua ultrapura como: $\rho_{\text{agua}} = 1 \text{ gr/ml}$

$$V_{np} = 0.146 \text{ ml}$$

$$\rho_{np} = \frac{0.2541 \text{ gr}}{0.146 \text{ ml}} \approx 1.74 \frac{\text{gr}}{\text{ml}}$$

Este valor obtenido, coincide con el rango determinado en la literatura, por lo cual se usará como patrón para determinar el volumen necesario a través del peso del nanomaterial.

3. Al tener la densidad del nanotubo de carbono, se preparará el nanofluido fijando en primer lugar la concentración en volumen requerida, para este caso, se prepararán tres muestras de 430 ml en concentraciones de 0.05%, 0.1% y 0.2%.

Tabla 2. Cantidad necesaria de nanotubos de carbono en volumen y peso, para la preparación de nanofluidos con tratamiento físico. Fuente: Propia.

Concentración en volumen	Volumen de nanopartículas [ml]	Masa de nanopartículas [gr]
0.05%	0.215	0.3741
0.1%	0.43	0.7482
0.2%	0.86	1.4964

Conociéndose la masa necesaria para sintetizar cada muestra se procede a pesar la cantidad necesaria en la balanza de cuatro dígitos con un $\pm 0.001 \text{ gr}$

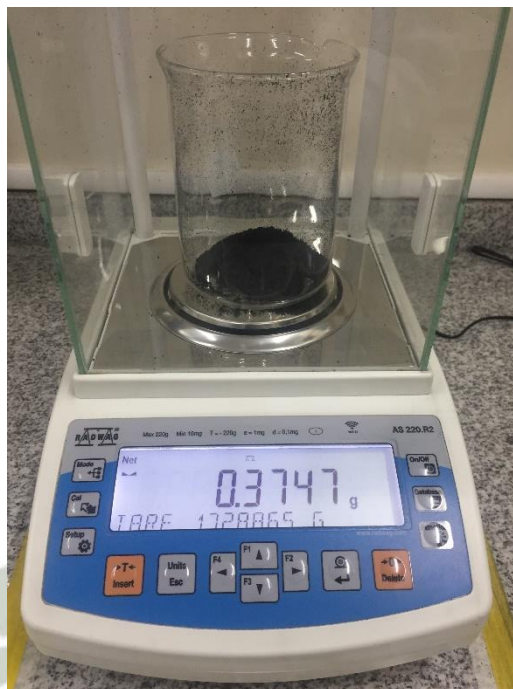


Figura 19. Nanotubos de carbono para preparar nanofluido con tratamiento físico al 0.05% de concentración en volumen. Fuente: Propia.

4. Se añade agua ultra pura para completar el volumen necesario, se utiliza una pipeta graduada con vejiga para completar el volumen necesario en el beaker.

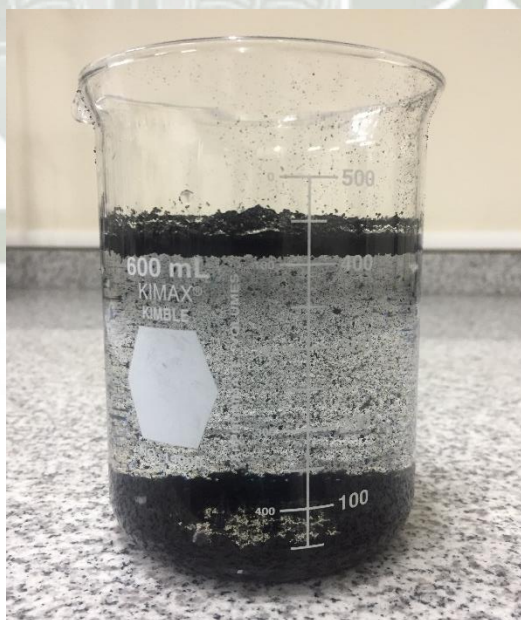


Figura 20. Mezcla de nanotubos de carbono y agua ultrapura para 430 ml al 0.05% de concentración en volumen. Fuente: Propia.

5. Una vez que se tiene la mezcla de nanotubos y el agua ultrapura, se lleva dicha mezcla al equipo de ultrasonido, para homogeneizar la solución, los parámetros se aprecian en la Figura 21. El tiempo de 40 minutos es considerado el mejor tiempo de sonicación según (Garg, y otros, 2009); los parámetros de pulso de encendido y apagado son por recomendación del fabricante del equipo.

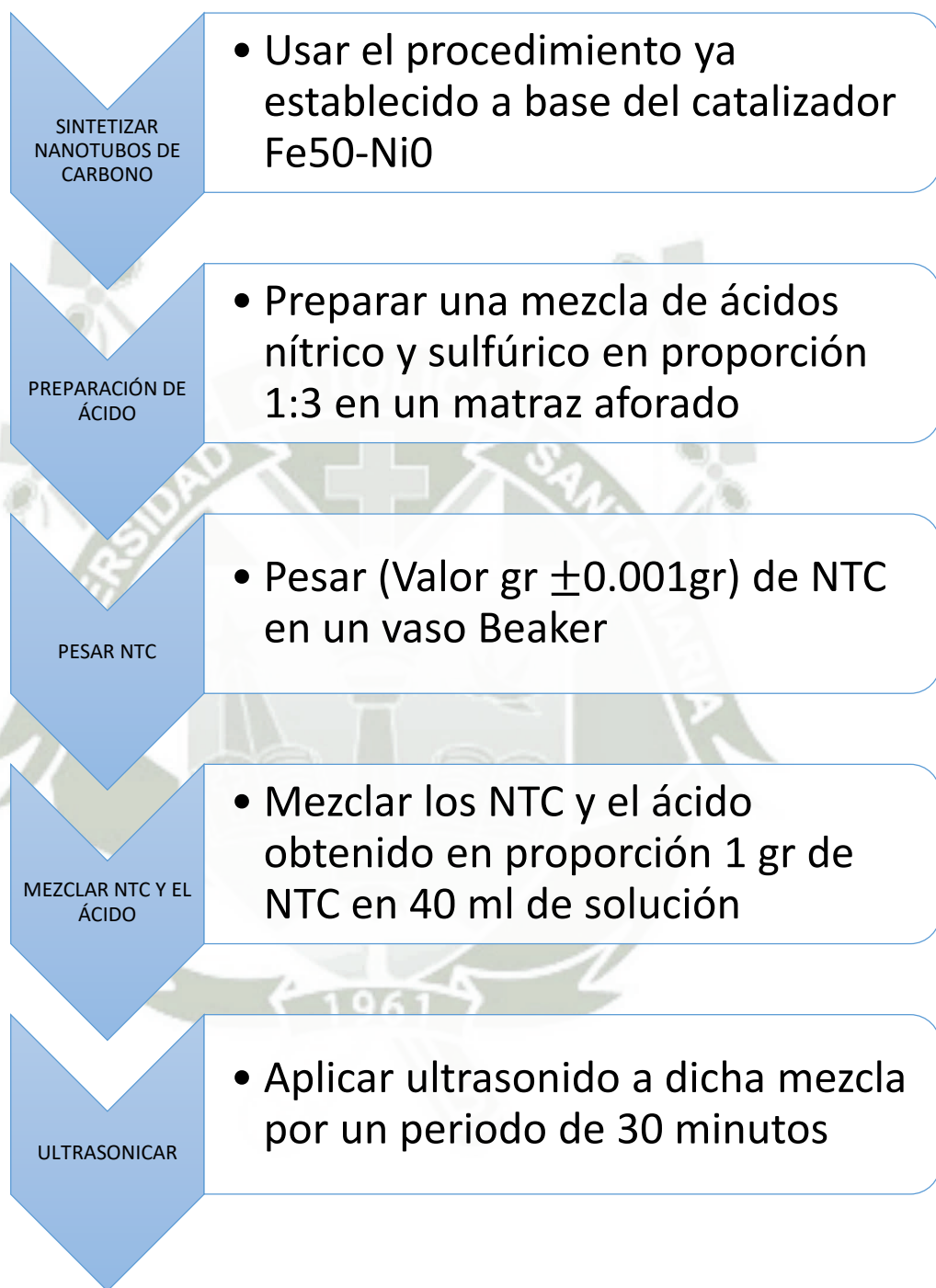


Figura 21. Parámetros del equipo de ultrasonido para la síntesis de nanofluidos.

6. Una vez terminado el proceso de sonicación, se trasvasa el nanofluido obtenido a los recipientes correspondientes a las pruebas posteriores.

3.3.2 Procedimiento de obtención de nanofluido con tratamiento químico y físico

3.3.2.1 Metodología de obtención



FILTRAR Y LAVAR
LA MEZCLA

- Filtrar la mezcla con una membrana de $0.45\ \mu\text{m}$ y lavar con agua deionizada hasta obtener PH 7

VERTER LA
MEZCLA

- Verter la mezcla filtrada en un crisol de porcelana

SECAR LA
MEZCLA

- Secar la mezcla a 100°C durante 12 horas

TRITURAR

- Triturar la masa ya seca, hasta obtener nuevamente el particulado

PESAR NTC

- Pesar (Valor $\text{gr} \pm 0.001\text{gr}$) de NTC en un vaso beaker

AÑADIR AGUA
ULTRAPURA

- Añadir agua ultrapura cuya cantidad dependerá de la concentración en volumen que se desea lograr

ULTRASONICAR

- Usar el equipo de ultrasonido a 60% de potencia durante un periodo de 40 minutos en pulso de encendido de 2 segundos y pulso apagado de 3 segundos

TRASVASAR

- La solución obtenida trasvasar a los recipientes correspondientes para las pruebas que se desean realizar

3.3.2.2 Desarrollo de la metodología de obtención del nanofluido con tratamiento químico y físico

Para las pruebas posteriores se realizaron tres variantes respecto a la concentración en volumen, 0.05%, 0.1% y 0.2%; cada uno en un total de 440 ml. Se procedió a sintetizar siguiendo la metodología anteriormente indicada

1. El proceso inicia en la obtención de los nanotubos de carbono, este paso es el mismo que ya se describió en la metodología anterior para la síntesis de nanofluidos con tratamiento físico.
2. Según (Esumi, Ishigama, Nakajima, Sawada, & Honda, 1996), el tratamiento químico que se le da a los nanotubos de carbono se hace en proporción 1:3 de ácido nítrico y ácido sulfúrico en concentraciones puras, donde 1 gramo de nanotubos de carbono se tratan en 40 ml de solución ácida, este procedimiento ha sido validado a lo largo de los años por (Osorio, Silveira, Bueno, & Bergmann, 2008) (Farbod, Tadavani, & Kiasat, Surface oxidation and effect of electric field on dispersion and colloids stability of multiwalled carbon nanotubes., 2011) (Farbod, Ahangarpur, & Gholamreza, Stability and thermal conductivity of water-based carbon nanotube nanofluids., 2014). Teniendo la información necesaria para la preparación de los ácidos (Figura22 y 23).



Figura 22. Ácido Nítrico. Fuente: Propia.



Figura 23. Ácido sulfúrico. Fuente: Propia.

Debido a la naturaleza de los ácidos, se debe trabajar con elementos de seguridad como: Mandil, Guantes de nitrilo, Respirador con filtro para gases, Lentes de seguridad. Y trabajar con la pipeta graduada y la vejiga para trasvasar la cantidad necesaria de ácidos, para nuestro experimento, se tratarán 3 gramos de NTC, dada la relación para el tratamiento químico, se preparó 120 ml de ácido (Figura 24).

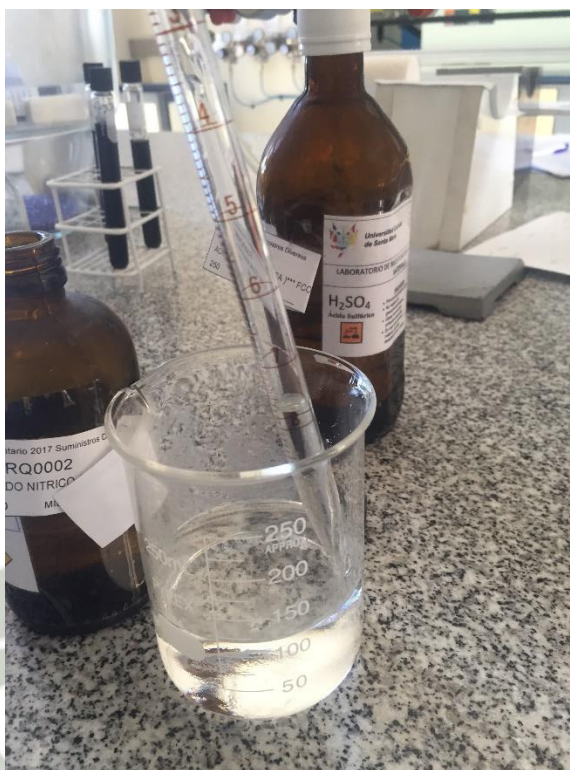


Figura 24. 120 ml de ácido preparado para el tratamiento químico. Fuente: Propia.

3. Se debe pesar los 3 gramos necesarios para el tratamiento químico teniendo como margen $\pm 0.001 \text{ gr}$, para esto se usa un vaso beaker para pesar el particulado.

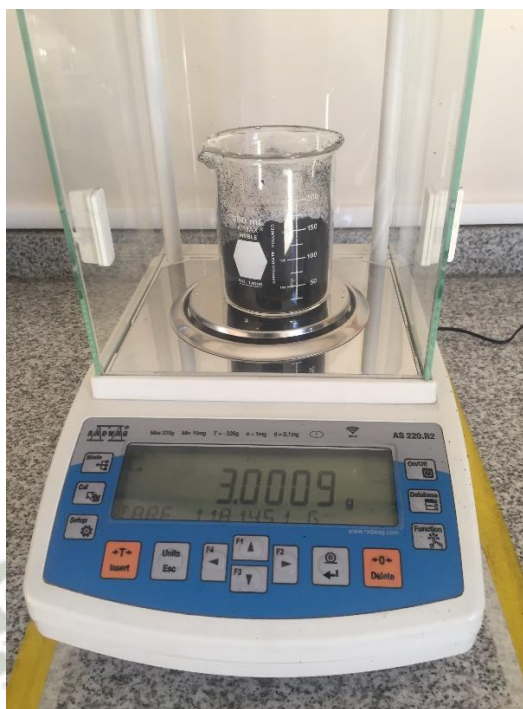


Figura 25. NTC para el tratamiento químico. Fuente: Propia.

4. Teniéndose el ácido preparado al igual que los NTC (Figura 26), se procede a verter el ácido en el beaker de los NTC (Figura 27)



Figura 26. 3 gramos de NTC y 120 ml de ácido preparado para el tratamiento químico. Fuente: Propia.

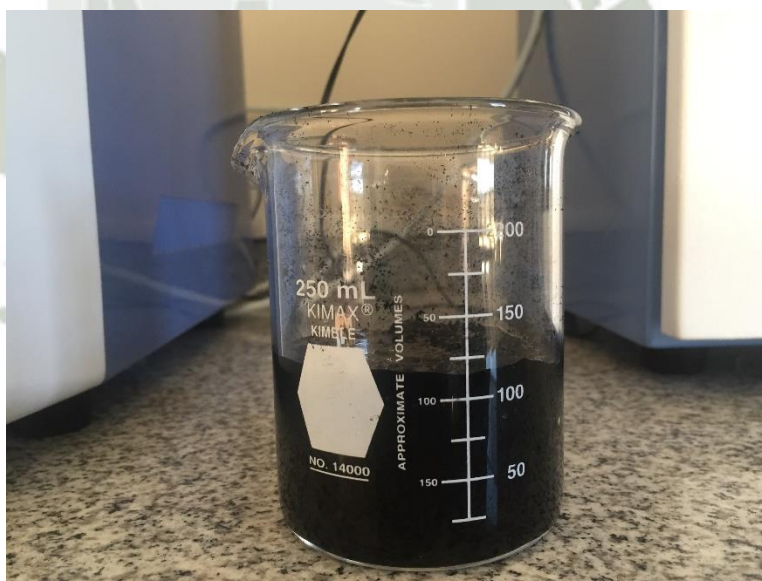


Figura 27. Mezcla de NTC y ácido preparado. Fuente: Propia.

5. Teniendo la mezcla se lleva al equipo de ultrasonido (Figura 28).

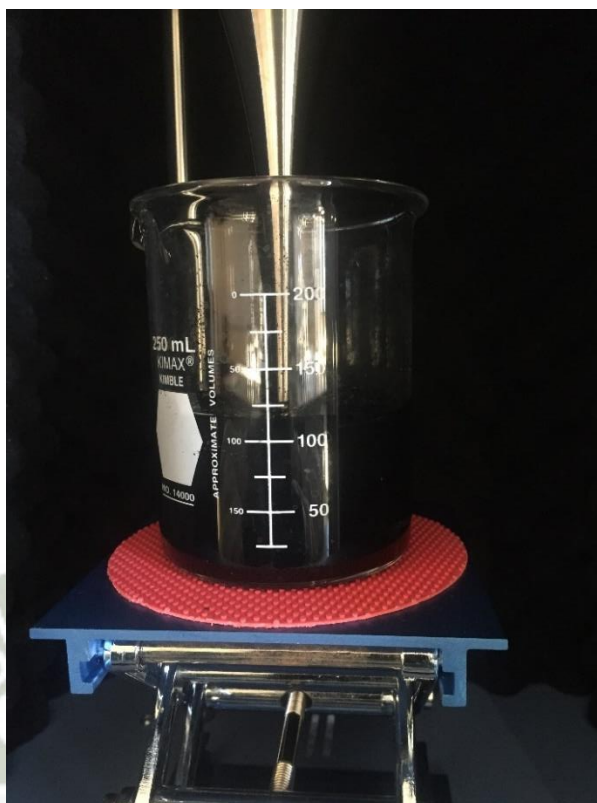


Figura 28. Mezcla para tratamiento químico en el equipo de ultrasonido para homogeneizar. Fuente: Propia.

Siguiendo las recomendaciones de (Esumi, Ishigama, Nakajima, Sawada, & Honda, 1996), el tiempo de ultrasonicación de la mezcla fue de 30 minutos, los parámetros restantes se determinaron mediante las recomendaciones del fabricante del equipo (Figura 29).

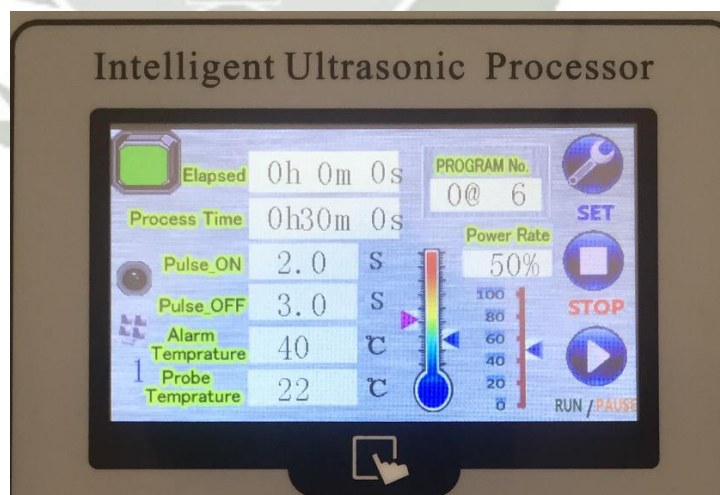


Figura 29. Parámetros para el proceso de ultrasonicación de la mezcla para el tratamiento químico. Fuente: Propia.

6. Cuando se termina el proceso de ultrasonificación, es necesario lavar la mezcla (Figura 30) con agua deionizada, ya que contiene ácido puro concentrado, estudios realizados por (Esumi, Ishigama, Nakajima, Sawada, & Honda, 1996), determinan que sus mejores propiedades térmicas y de dispersión de los nanofluidos se obtendrán cuando la mezcla alcance el PH 7 después de dicho proceso de lavado.

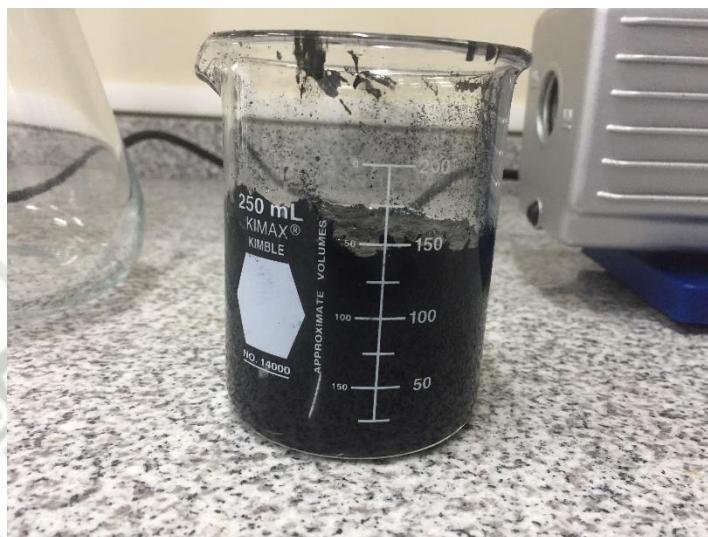


Figura 30. Mezcla producto del tratamiento químico y ultrasonificación. Fuente: Propia.

Para eso es necesario montar un sistema de filtrado, usando un embudo bushner, bomba de vacío, membrana de $0.45\mu\text{m}$ (Figura 31)



Figura 31. Membrana de $0.45\mu\text{m}$ de diámetro de poro. Fuente: Propia.

Se coloca la membrana en el embudo, como se observa en la figura 32.

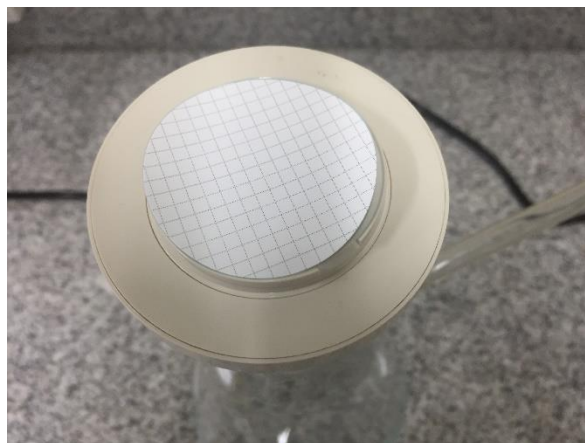


Figura 32. Membrana en el embudo bushner. Fuente: Propia.

El sistema de filtrado se ensambla de manera tal como se observa en la Figura 33, El matraz kitazato se conecta a través de una manguera de presión con la bomba de vacío, y el embudo se fija al matraz por medio del corcho.



Figura 33. Esquema del sistema de filtrado. Fuente: Propia.

Debido a las características del particulado, se va perdiendo material en cada lavada, por lo que se recomienda el uso de una espátula y piseta

conteniendo agua ultrapura para ayudar a recuperar la mayor cantidad de sólido posible (Figura 34).



Figura 34. Proceso de lavado de los nanotubos de carbono. Fuente: Propia.

Con el papel indicador, se va obteniendo el valor del PH, y se repite el proceso hasta obtener el Ph 7 requerido (Figura 35), aproximadamente se utilizó 9 litros de agua deionizada para lavar la muestra hasta alcanzar el PH requerido.



Figura 35. Papel indicador, valores de PH 2 y PH 7. Fuente: Propia.

7. Una vez obtenido el PH 7, se vierte la mezcla en un crisol de porcelana.



Figura 36. Mezcla lavada en crisol de porcelana. Fuente: Propia.

8. La mezcla ya en el crisol de porcelana, es llevada al secador eléctrico Binder, donde seca la mezcla a 100°C durante 12 horas (Figura 37)



Figura 37. Proceso de secado en el horno eléctrico BINDER. Fuente: Propia.



Figura 38. Nanotubos de carbono, después del secado a 100°C. Fuente: Propia.

9. Triturar la mezcla obtenida con el mortero, para volver a tener el material en calidad de polvo seco. (Figura 39)



Figura 39. Mortero para el proceso de trituración de los nanotubos de carbono.

Fuente: Propia.

10. La densidad para los nanotubos de carbono será el valor experimental obtenido de 1.74 gr/ml, se preparará el nanofluido fijando en primer lugar

la concentración en volumen requerida, para este caso, se prepararán tres muestras de 440 ml en concentraciones de 0.05%, 0.1% y 0.2%.

Tabla 3. Cantidad necesaria de nanotubos de carbono en volumen y peso, para la preparación de nanofluidos con tratamiento químico y físico. Fuente: Propia.

Concentración en volumen	Volumen de nanopartículas [ml]	Masa de nanopartículas [gr]
0.05%	0.22	0.3828
0.1%	0.44	0.7656
0.2%	0.88	1.5312

Conociéndose la masa necesaria para sintetizar cada muestra se procede a pesar la cantidad necesaria en la balanza de cuatro dígitos con un ± 0.001 gr.

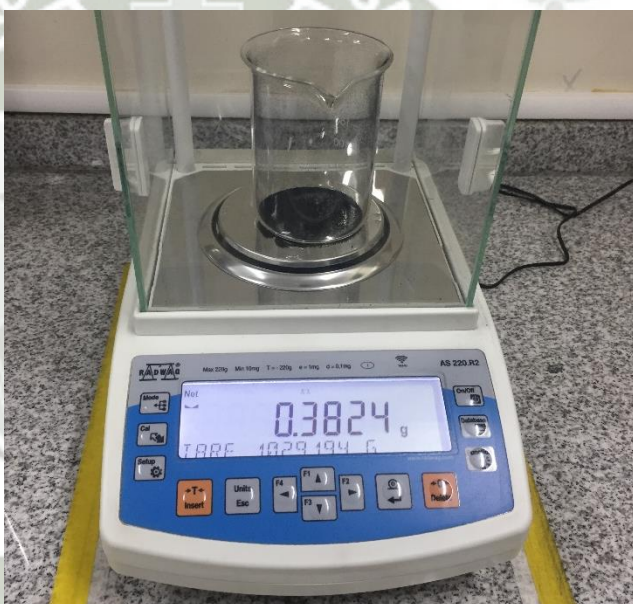


Figura 40. Nanotubos de carbono para preparar nanofluido con tratamiento químico y físico al 0.05% de concentración en volumen. Fuente: Propia.

11. Se añade agua ultrapura para completar el volumen necesario, se utiliza una pipeta graduada con vejiga para completar el volumen necesario en el beaker.

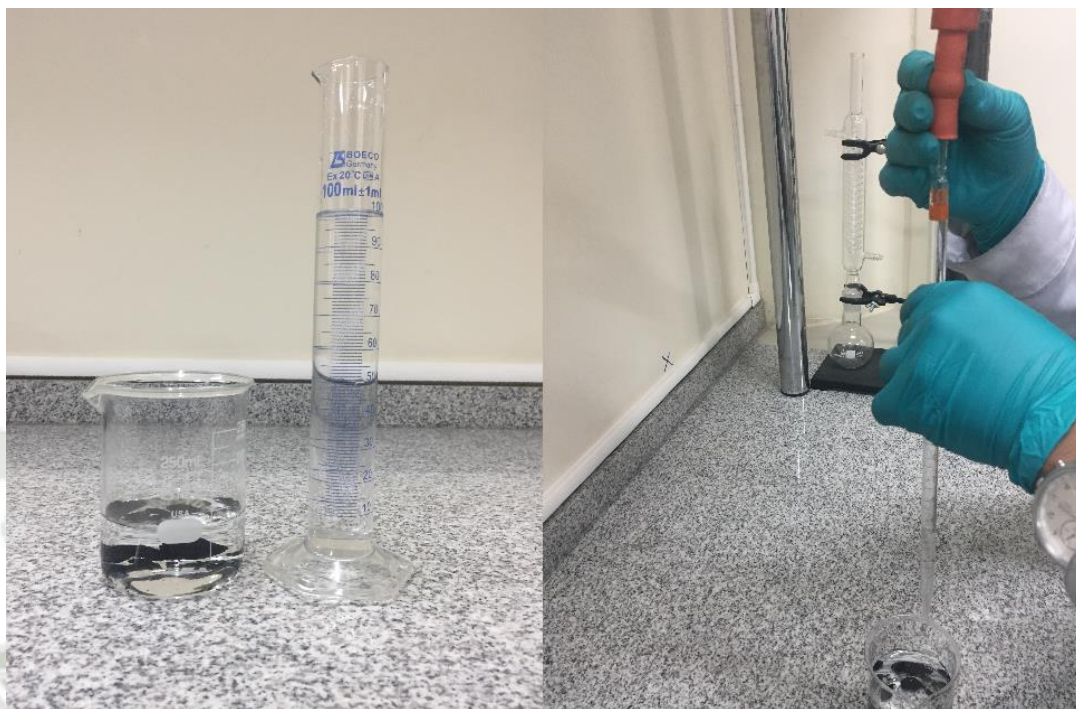


Figura 41. Adición de agua ultra pura hasta el volumen deseado para la obtención del nanofluido. Fuente: Propia.

12. Una vez que se tiene la mezcla de nanotubos y el agua ultra pura, se lleva dicha mezcla al equipo de ultrasonido, para homogeneizar la solución, los parámetros se aprecian en la Figura 43. El tiempo de 40 minutos es considerado el mejor tiempo de sonicación según (Garg, y otros, 2009); los parámetros de pulso de encendido y apagado son por recomendación del fabricante del equipo.

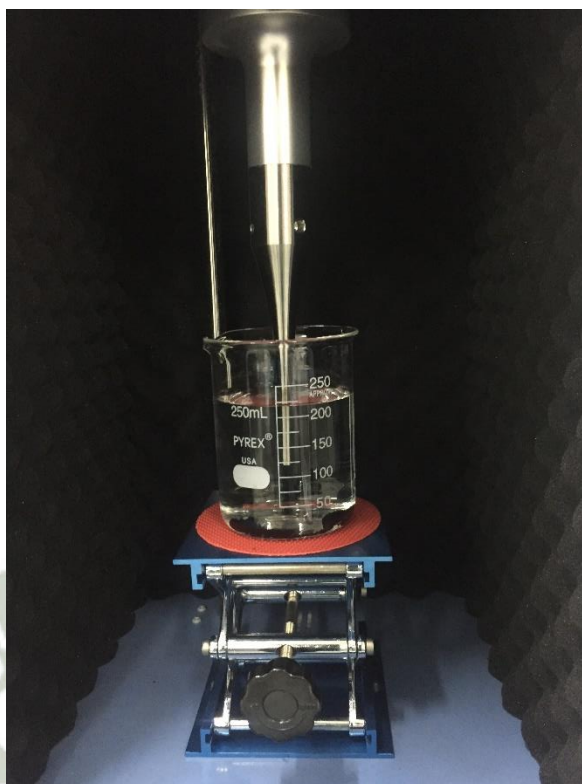


Figura 42. Nanotubos de carbono en agua ultra pura, en el equipo de ultrasonido. Fuente: Propia.

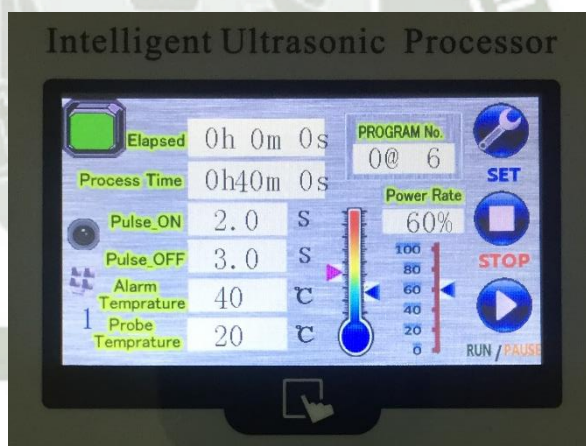


Figura 43. Parámetros del equipo de ultrasonido para la síntesis de nanofluidos.

13. Una vez terminado el proceso de sonicación, se trasvasa el nanofluido obtenido a los recipientes correspondientes a las pruebas posteriores.



Figura 44. Traspase del nanofluido obtenido a un recipiente para pruebas térmicas.

Fuente: Propia.

3.4 CARACTERIZACIÓN DE LOS NANOFLUIDOS OBTENIDOS

3.4.1 Potencial Zeta

Esta técnica se empleó para determinar la estabilidad de las nanopartículas en el fluido obtenido. La prueba fue realizada en las instalaciones de la Universidad Católica de Santa María en el laboratorio de biología molecular, con un Zetasizer Nano ZS90, modelo ZEN3690. La metodología empleada fue la estándar usada en el laboratorio ya mencionado.

3.4.2 Nanosizer

Esta técnica se utilizó para determinar el tamaño de los aglomerados en el nanofluido, y también permitió determinar la homogeneidad de la población dispersa en el mismo. La prueba fue realizada en las instalaciones de la Universidad Católica de Santa María en el laboratorio de biología molecular, con un Zetasizer Nano ZS90, modelo ZEN3690. La metodología empleada fue la estándar usada en el laboratorio ya mencionado.

3.4.3 Espectrofotometría

Esta técnica se utilizó para evaluar la estabilidad de las suspensiones preparadas, comparando sus valores de absorción para un mismo rango de longitud de onda. La prueba fue realizada en las instalaciones de la Universidad Católica San Pablo en el instituto de investigación, con un espectrofotómetro UNICO, modelo SQ-2800.

3.5 SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA CONVECCIÓN FORZADA EN UNA TUBERÍA RECTA

En el Capítulo II se desarrolló la base teórica para la convección forzada a través de una tubería recta, con el uso de los modelos matemáticos ya establecidos, se simulará dicho proceso con nanofluidos a base de nanotubos de carbono en agua deionizada como fluido base. Aquellos valores que no se tengan a disposición, se asumirán en base a otros estudios encontrados en la literatura. Para la simulación se ha empleado el Software Engineering Equation Solver (EES).

Tabla 4. Datos de entrada para la simulación numérica.

Dato de entrada	Valor
Diámetro de tubería	1 pulg
Velocidad promedio del nanofluido	0.5 m/s
Conductividad térmica de la nanopartícula	2000 W/m.K
Densidad de la nanopartícula	1740 kg/m ³
Calor específico de la nanopartícula	0.70 KJ/kg.K
Factor de forma NTC	4.9
Temperatura ambiente	20°C
Presión ambiente	101.325 KPa

Según la información recaba se plantea el programa en el EES como se presenta a continuación:

Datos de entrada

$$T_1 = 20 \text{ [C] Temperatura}$$

$$P_1 = 101.325 \text{ [kPa] Presion}$$

$$\phi_{np} = 0.01 \text{ Concentracion de Nanoparticulas}$$

$$k_{np} = 2000 \text{ [W/m-K] Conductividad termica de nanoparticlas}$$

$$\rho_{np} = 1740 \text{ [kg/m}^3\text{] Densidad de la nanopartícula}$$

$$\phi_m = 0.65 \text{ Constante}$$

$$\rho_m = \rho(\text{water}, T = T_1, P = P_1)$$

$$c_{p,np} = 0.7 \text{ [kJ/kg-K]}$$

$$c_{p,m} = Cp(\text{water}, T = T_1, P = P_1)$$

$$u_{nf} = 0.5 \text{ [m/s]}$$

$$d = 0.0254 \text{ [m]}$$

$$\phi_{npw} = \phi_{np} \cdot \frac{\rho_{np}}{\rho_{nf}}$$

Solucion:

$$Nus_1 = \frac{h \cdot d}{k_{nf}}$$

$$Nus_1 = 0.1763 \cdot Re_{nf}^{0.6837} \cdot Pr_{nf}^{0.4442} \cdot (1 + \phi_{npw})^{0.6877} \cdot (1 + 2.27)^{0.0761} \cdot (1 + 0.14)^{0.8125}$$

YAZID 2017

$$Nus_1 = 0.023 \cdot Re_{nf}^{0.8} \cdot Pr_{nf}^{0.4} \text{ Cengel 2011}$$

$$k_{nf} = \left[\frac{k_{np} + (4.9 - 1) \cdot k_m + ((4.9 - 1) \cdot (k_{np} - k_m)) \cdot \phi_{np}}{k_{np} + (4.9 - 1) \cdot k_m - (k_{np} - k_m) \cdot \phi_{np}} \right] \cdot k_m$$

$$k_m = k(\text{water}, T = T_1, P = P_1)$$

$$Pr_{nf} = \frac{C_{p,nf} \cdot \mu_{nf}}{k_{nf} \cdot \left[0.001 \cdot \frac{\text{kW/m-K}}{\text{W/m-K}} \right]}$$

$$Re_{nf} = \frac{\rho_{nf} \cdot u_{nf} \cdot d}{\mu_{nf}}$$

$$c_{p,nf} = \frac{(1 - \phi_{np}) \cdot \rho_m \cdot c_{p,m} + \phi_{np} \cdot \rho_{np} \cdot c_{p,np}}{\rho_{nf}}$$

$$\mu_{nf} = \left[1 - \frac{\phi_{np}}{\phi_m} \right]^{-2} \cdot \mu_m \text{ Maron Pierce Modificado 2015}$$

$$\mu_{nf} = (1 + 2.5 \cdot \phi_{np}) \cdot \mu_m$$

Einsten

$$\rho_{nf} = \rho_{np} \cdot \phi_{np} + \rho_m \cdot (1 - \phi_{np})$$

$$\mu_m = \text{Visc}(\text{water}, T = T_1, P = P_1)$$

Figura 45. Planteo del sistema de solución numérica en el EES. Fuente: Imagen obtenida del Software EES.

Capítulo IV: PRUEBAS Y RESULTADOS

4.1 OBTENCIÓN DE NANOFLUIDOS CON TRATAMIENTO FÍSICO A DIFERENTES CONCENTRACIONES EN VOLUMEN

Siguiendo con la metodología del Capítulo III, se preparó nanofluidos a tres diferentes concentraciones, 0.05%, 0.1% y 0.2%.



Figura 46. Nanofluidos con tratamiento físico a diferentes concentraciones. Fuente: Propia.

En los nanofluidos a los cuales no se les realiza el tratamiento químico, se puede observar, antes del proceso de ultrasonificación, que los nanotubos de carbono en su mayoría se encuentran sedimentados en el fluido base, también se pueden apreciar flotantes (Figura 47).

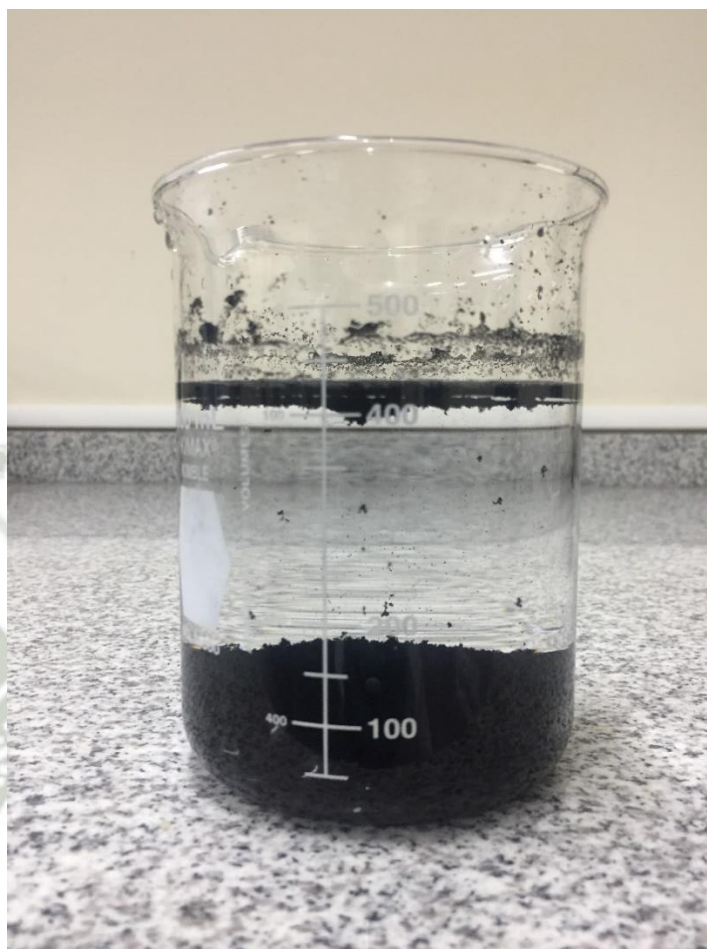


Figura 47. Nanotubos de carbono sin tratamiento químico en agua ultra pura antes del proceso de ultrasonificación. Fuente: Propia

Al intentar agitarlos para homogenizar la solución, se observa que algunos de los sedimentados empiezan a flotar, pero sin lograr la dispersión requerida (Figura 48).

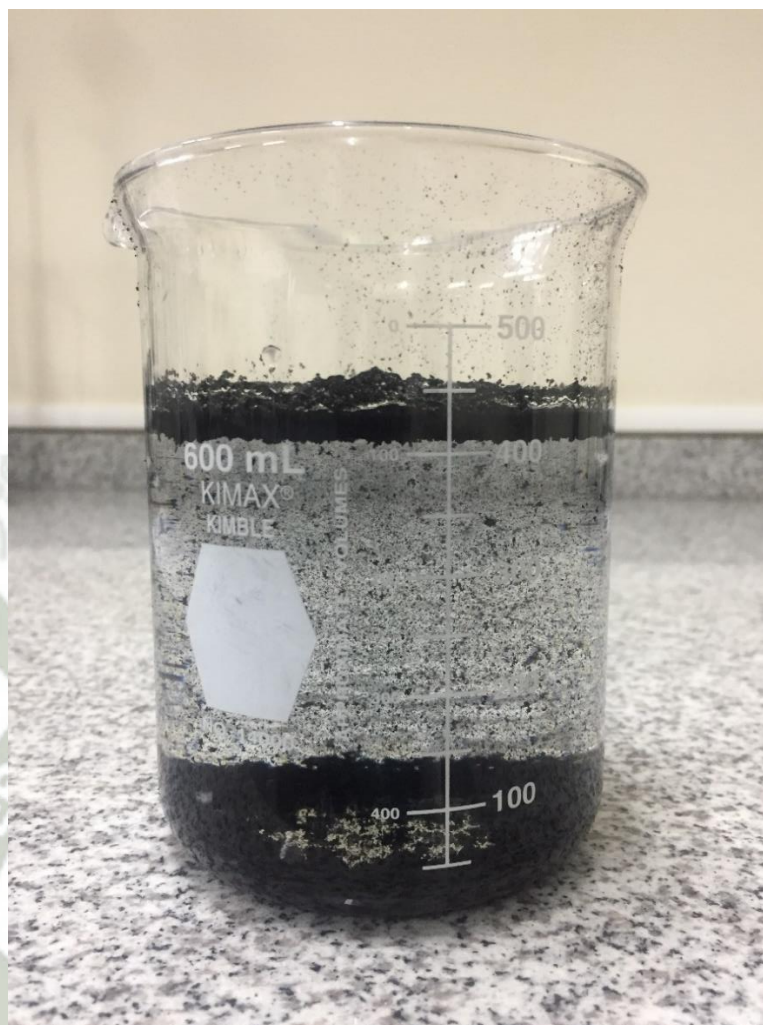


Figura 48. Nanotubos de carbono sin tratamiento químico en agua ultra pura después de agitación física. Fuente: Propia

Posteriormente, el nanofluido ya obtenido, después de la ultrasonificación, se diluye 1:1 en agua ultra pura, como resultado se puede observar en la Figura 49 que se presentan dos fases muy claras, sedimentándose las nanopartículas en su mayoría, y en la parte superior una fase de agua ultra pura con presencia de flotantes.

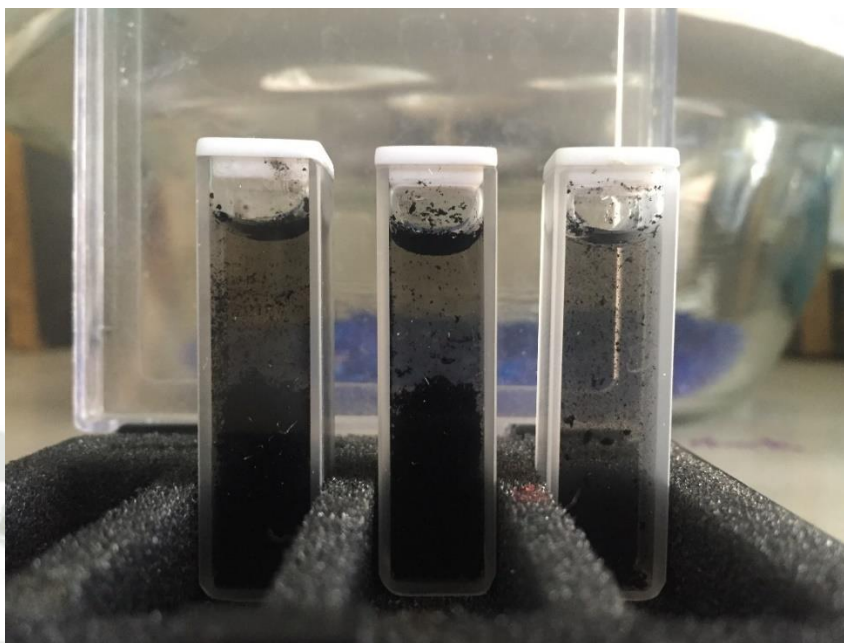


Figura 49. Muestras de nanofluido con tratamiento físico diluidas 1:1 en agua ultra pura. Fuente: Propia.

4.2 OBTENCIÓN DE NANOFLUIDOS CON TRATAMIENTOS QUÍMICO Y FÍSICO A DIFERENTES CONCENTRACIONES EN VOLUMEN

Después del proceso químico aplicado a los nanotubos de carbono, se procedió a pesar los nanotubos de carbono ya secos en un nuevo crisol. Figura 50.



Figura 50. Peso de los nanotubos de carbono después de haber aplicado el tratamiento químico.

Fuente: Propia.

Siguiendo con la metodología del Capítulo III, se preparó nanofluidos a tres diferentes concentraciones, 0.05%, 0.1% y 0.2%.



Figura 51. Nanofluidos con tratamiento físico a diferentes concentraciones. Fuente: Propia.

Al verter agua ultra pura en los nanotubos de carbono tratados químicamente, se observa claramente a los nanotubos de carbono en su mayoría sedimentado al fondo del vaso, mientras que los flotantes presentan mayor dispersión que en el caso anterior (nanotubos sin tratamiento químico), sin llegar aún a alcanzarse la dispersión deseada. También se llega a observar un mayor grado de homogenización en las partículas visibles. Figura 52.

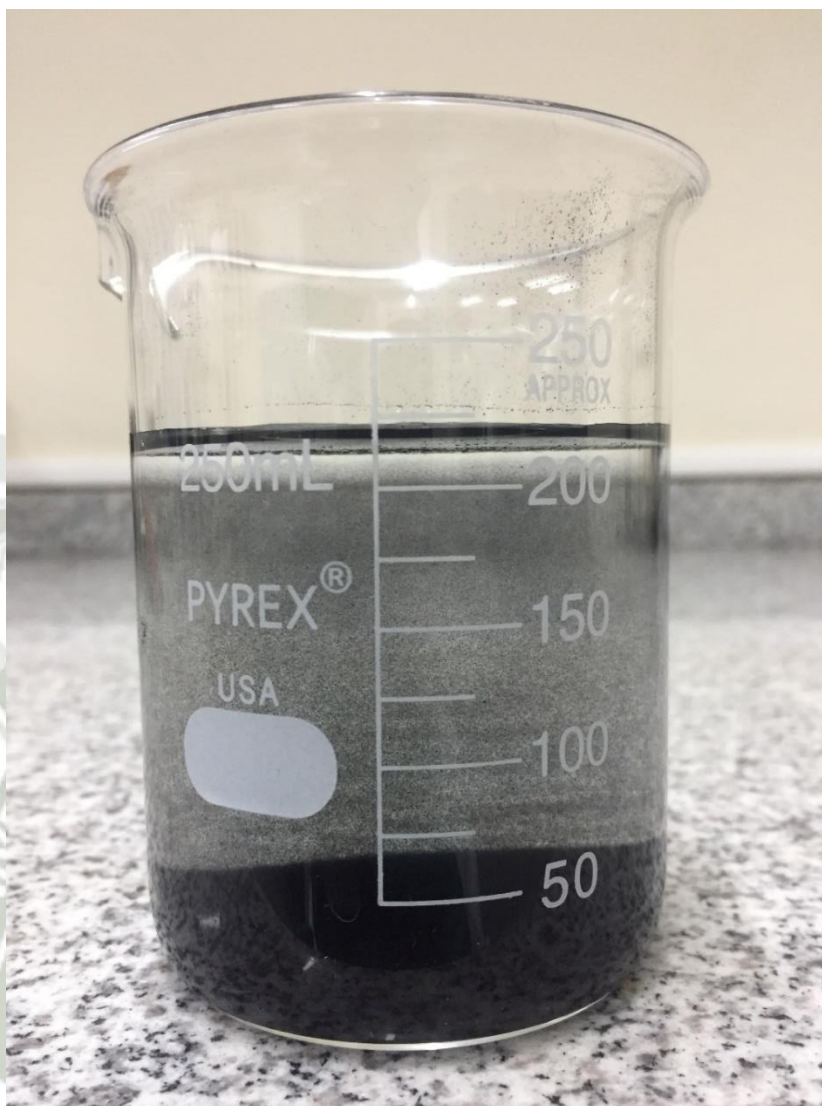


Figura 52. Nanotubos de carbono con tratamiento químico en agua ultra pura. Fuente: Propia.

Al ser diluidos en proporción 1:1 con agua ultra pura, se observa que aún mantiene la homogeneidad de la solución (Figura 53), a diferencia del anterior caso, en el que las 2 fases son visiblemente notorias.

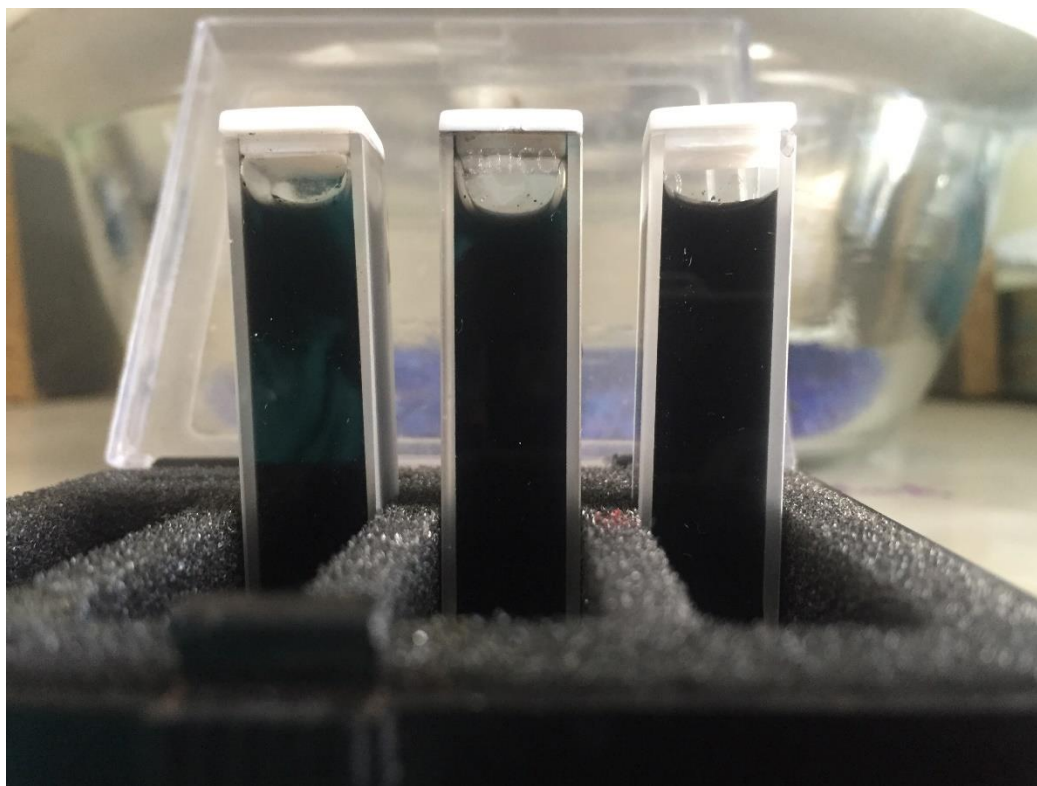


Figura 53. Muestras de nanofluido con tratamientos químicos y físicos diluidas 1:1 en agua ultra pura. Fuente: Propia.



4.3 CARACTERIZACIÓN DE NANOFLUIDOS POR MEDICIÓN DEL POTENCIAL ZETA, NANOSIZER Y ESPECTROFOTOMETRÍA

4.3.1 Resultados de la medición del potencial zeta

Se realizó la prueba a un total de 6 muestras, 3 muestras de Nanotubos de carbono sin tratamiento químico dispersos en agua ultrapura mediante ultrasonificación en concentraciones de 0.05%, 0.1% y 0.2%; y las tres muestras restantes los Nanotubos de carbono con tratamiento químico dispersos en agua ultra pura mediante ultrasonificación en concentraciones de 0.05%, 0.1% y 0.2%.

Para la realización de esta prueba como la de Nanosizer, el fluido obtenido tuvo que ser filtrado para dejar los aglomerados de mayor tamaño fuera de la muestra, ya que el equipo no puede procesar muestras que contengan partículas mayores a 100 μm



Figura 54. Proceso de filtrado para preparación de muestras para la caracterización en el Zetasizer. Fuente: Propia.

El fluido filtrado fue reservado en las capsulas, como se puede apreciar en la Figura 55, el fluido no contiene partículas visibles, lo cual es ideal para su caracterización

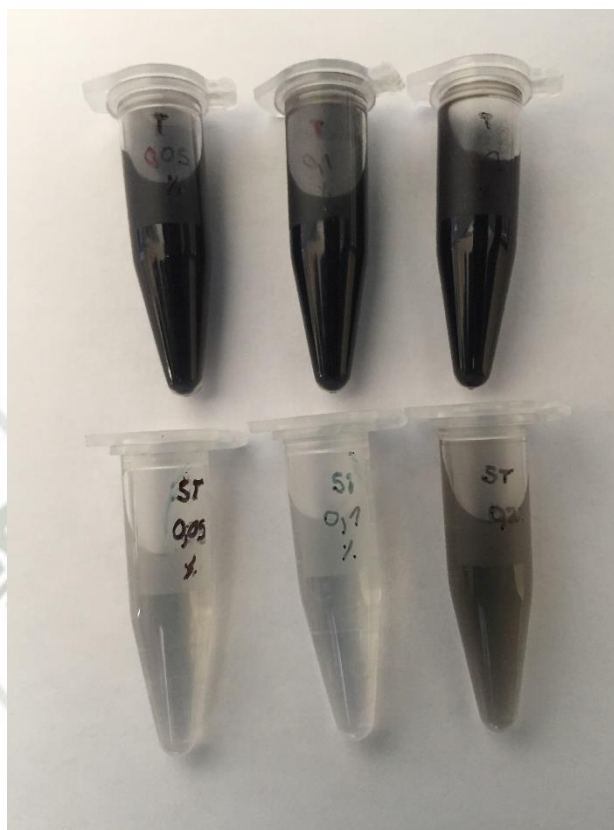


Figura 55. Muestras preparadas para caracterización en el Zetasizer. Fuente: Propia.

Se realizaron tres mediciones por cada prueba, y la gráfica que se muestra de cada medición contiene la media de las tres mediciones realizadas, en la teoría se revisó que el potencial zeta para los nanotubos de carbono debe ser idealmente $30 \leq \zeta \leq -30$ para ser considerado como estable al límite, idealmente valores como 40 ó -40 serían valores que muestren mayores índices de estabilidad.

Temperature (°C): 25.0
Count Rate (kcps): 127.8
Cell Description: Clear disposable zeta cell

Zeta Runs: 12
Measurement Position (mm): 2.00
Attenuator: 8

	Mean (mV)	Area (%)	St Dev (mV)
Zeta Potential (mV): -36.6	Peak 1: -36.6	100.0	5.81
Zeta Deviation (mV): 5.81	Peak 2: 0.00	0.0	0.00
Conductivity (mS/cm): 0.179	Peak 3: 0.00	0.0	0.00
Result quality : Good			

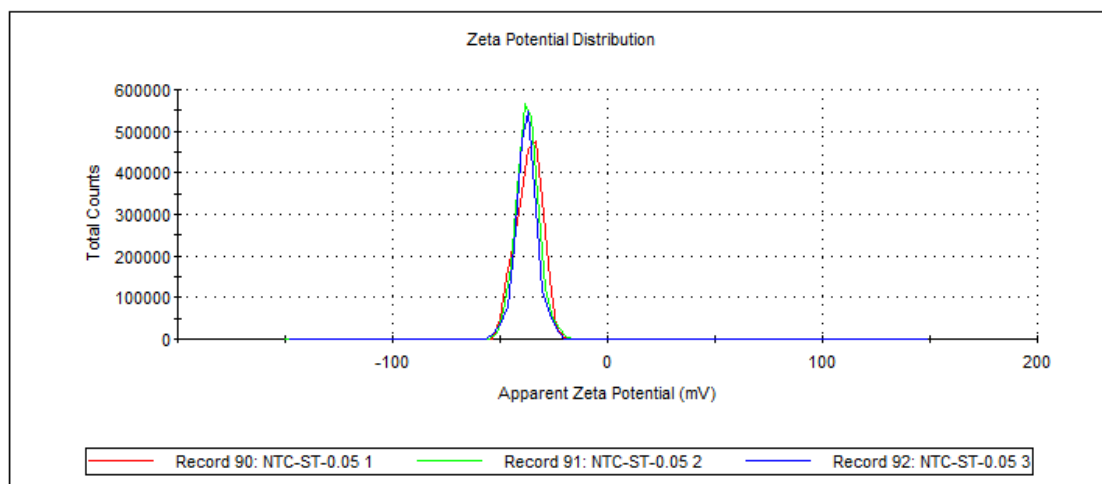


Figura 56. Potencial Zeta de Nanotubos de carbono sin tratamiento químico en concentración en volumen de 0.05%. Fuente: Obtenida del Zetasizer Nano ZS90.

Presentando un valor medio de -36.6, se entiende que las partículas son estables en el medio.

Temperature (°C): 25.0

Count Rate (kcps): 83.9

Cell Description: Clear disposable zeta cell

Zeta Runs: 17

Measurement Position (mm): 2.00

Attenuator: 9

	Mean (mV)	Area (%)	St Dev (mV)
Zeta Potential (mV): -52.0	Peak 1: -52.0	100.0	11.2
Zeta Deviation (mV): 11.2	Peak 2: 0.00	0.0	0.00
Conductivity (mS/cm): 0.0895	Peak 3: 0.00	0.0	0.00

Result quality : **Good**

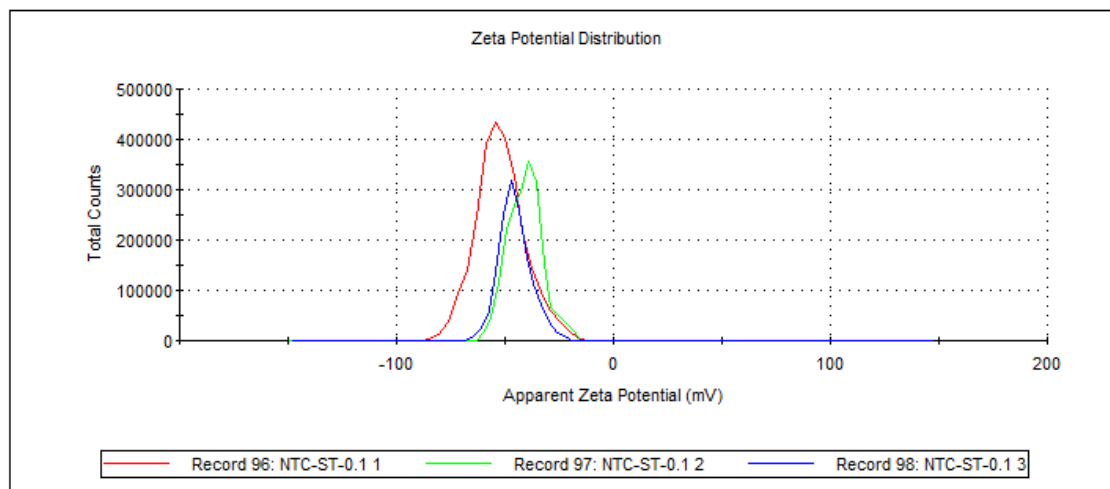


Figura 57. Potencial Zeta de Nanotubos de carbono sin tratamiento químico en concentración en volumen de 0.1%. Fuente: Obtenida del Zetasizer Nano ZS90.

Teniéndose un valor medio de -52, se entiende esta solución como altamente estable.

Temperature (°C): 25.0
Count Rate (kcps): 96.6
Cell Description: Clear disposable zeta cell

Zeta Runs: 12
Measurement Position (mm): 2.00
Attenuator: 7

	Mean (mV)	Area (%)	St Dev (mV)
Zeta Potential (mV): -25.2	Peak 1: -25.2	100.0	4.13
Zeta Deviation (mV): 4.13	Peak 2: 0.00	0.0	0.00
Conductivity (mS/cm): 0.547	Peak 3: 0.00	0.0	0.00
Result quality : Good			

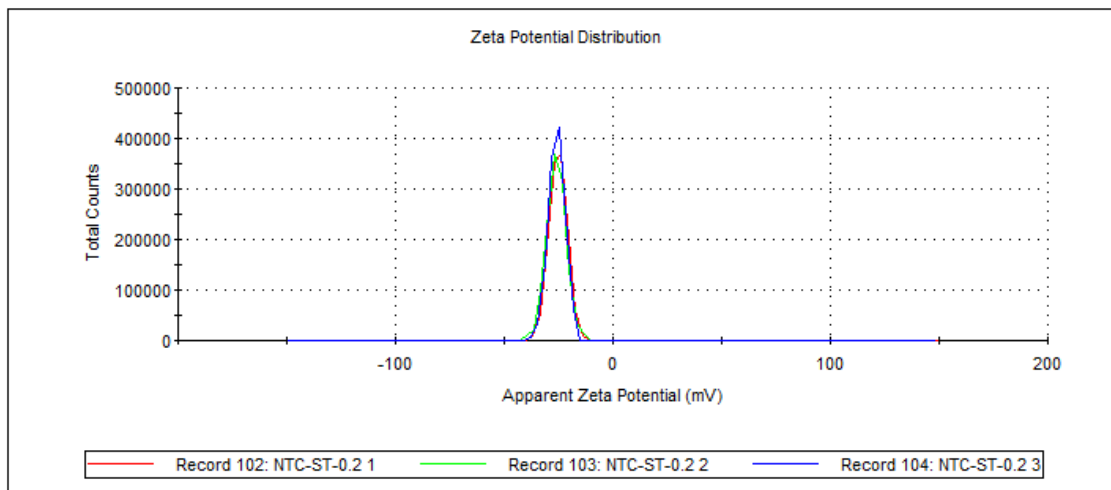


Figura 58. Potencial Zeta de Nanotubos de carbono sin tratamiento químico en concentración en volumen de 0.2%. Fuente: Obtenida del Zetasizer Nano ZS90.

Con un valor medio de -25.2, es una solución inestable, que tenderá rápidamente a la sedimentación de las nanopartículas formando aglomerados y perdiendo su dispersión.

Temperature (°C): 25.0
Count Rate (kcps): 645.2
Cell Description: Clear disposable zeta cell

Zeta Runs: 12
Measurement Position (mm): 2.00
Attenuator: 11

	Mean (mV)	Area (%)	St Dev (mV)
Zeta Potential (mV): -30.8	Peak 1: -30.8	100.0	4.32
Zeta Deviation (mV): 4.32	Peak 2: 0.00	0.0	0.00
Conductivity (mS/cm): 0.0180	Peak 3: 0.00	0.0	0.00

Result quality : **Good**

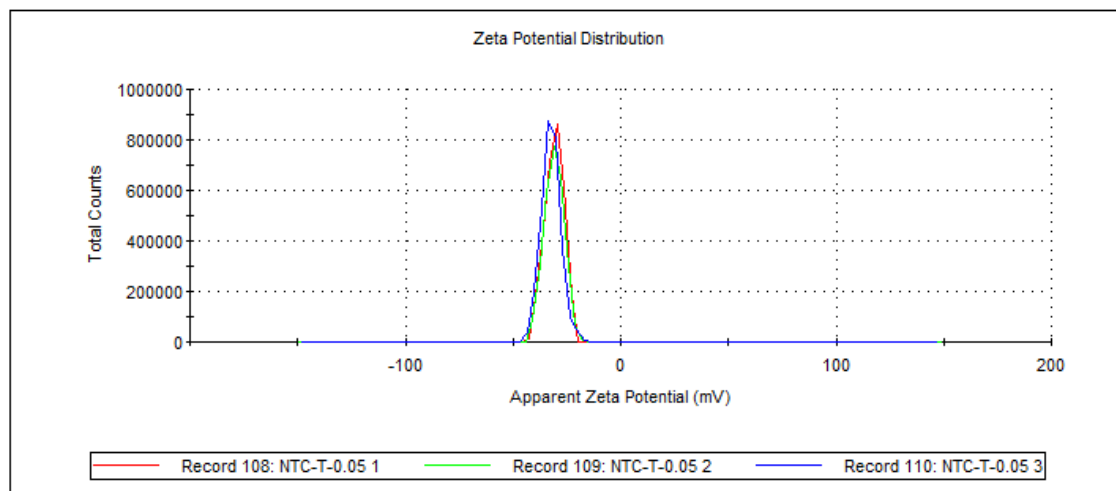


Figura 59. Potencial Zeta de Nanotubos de carbono con tratamiento químico en concentración en volumen de 0.05%. Fuente: Obtenida del Zetasizer Nano ZS90.

Temperature (°C): 25.0
Count Rate (kcps): 233.4
Cell Description: Clear disposable zeta cell

Zeta Runs: 12
Measurement Position (mm): 2.00
Attenuator: 8

	Mean (mV)	Area (%)	St Dev (mV)
Zeta Potential (mV): -34.9	Peak 1: -34.9	100.0	4.90
Zeta Deviation (mV): 4.90	Peak 2: 0.00	0.0	0.00
Conductivity (mS/cm): 0.0300	Peak 3: 0.00	0.0	0.00

Result quality : **Good**

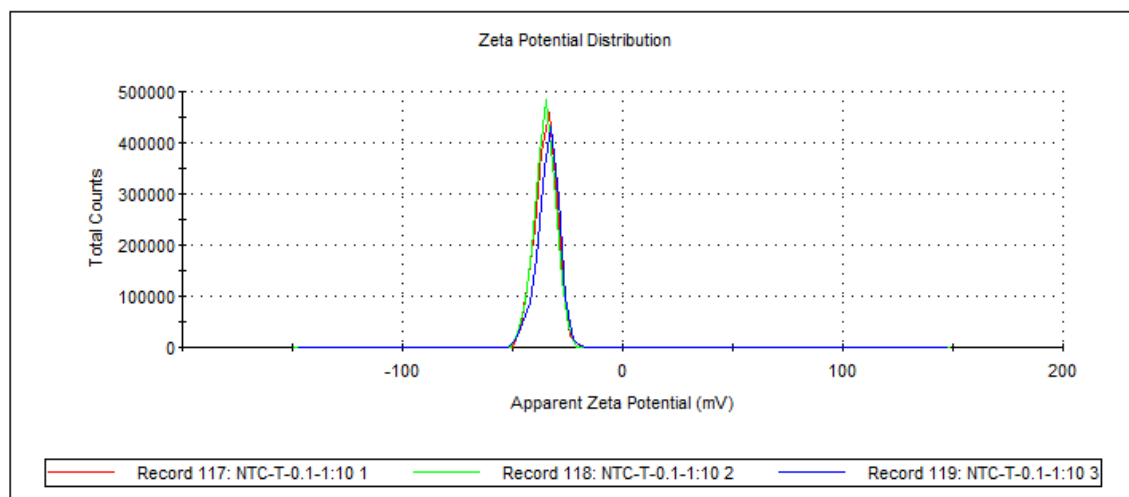


Figura 60. Potencial Zeta de Nanotubos de carbono con tratamiento químico en concentración en volumen de 0.1%. Fuente: Obtenida del Zetasizer Nano ZS90.

Temperature (°C): 25.0
Count Rate (kcps): 155.8
Cell Description: Clear disposable zeta cell

Zeta Runs: 12
Measurement Position (mm): 2.00
Attenuator: 8

	Mean (mV)	Area (%)	St Dev (mV)
Zeta Potential (mV): -30.4	Peak 1: -30.4	100.0	5.31
Zeta Deviation (mV): 5.31	Peak 2: 0.00	0.0	0.00
Conductivity (mS/cm): 0.0521	Peak 3: 0.00	0.0	0.00

Result quality : **Good**

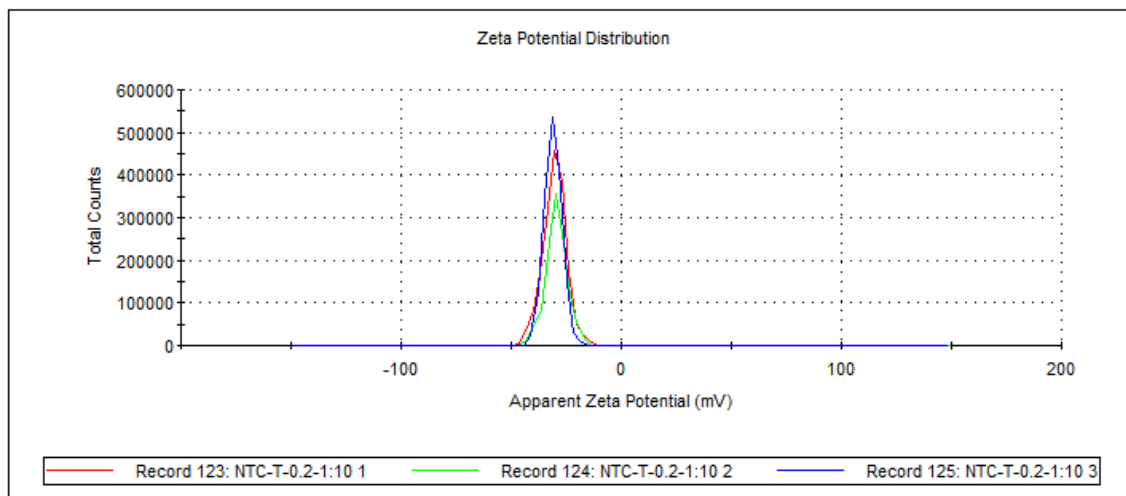


Figura 61. Potencial Zeta de Nanotubos de carbono con tratamiento químico en concentración en volumen de 0.2%. Fuente: Obtenida del Zetasizer Nano ZS90.

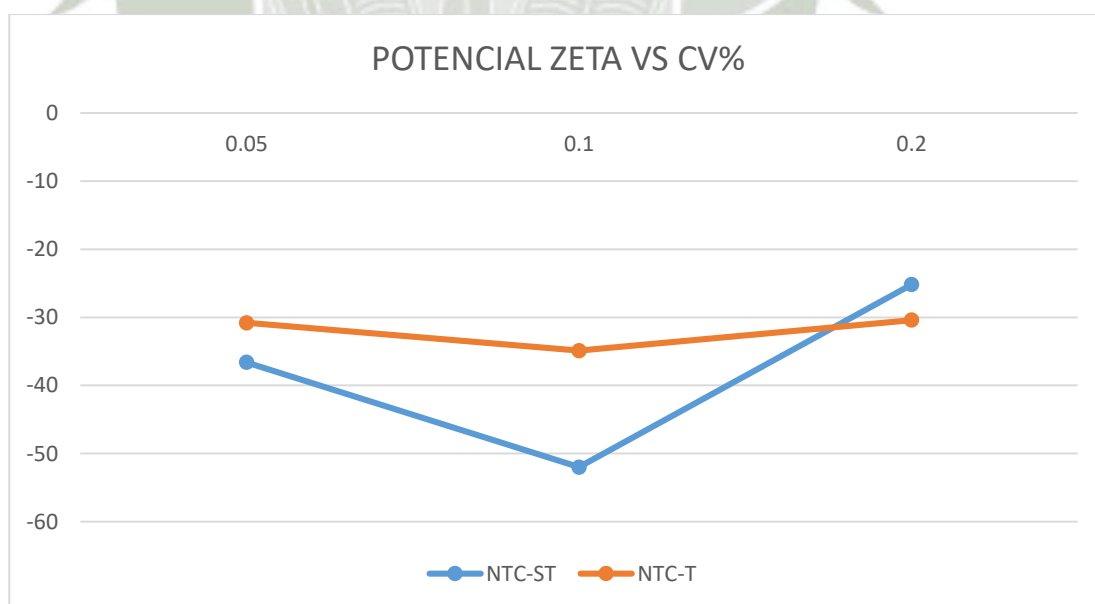


Figura 62. Potencial Zeta vs Concentración en volumen de nanotubos de carbono en el nanofluido. Fuente: Propia.

4.3.2 Resultados del nanosizer

Siguiendo la misma metodología de la caracterización por Potencial Zeta, se toma tres medidas por cada muestra y se determina el tamaño del aglomerado; el índice de polidispersión indica que tan homogénea es la solución, por recomendación del fabricante del equipo, indica que este debe ser menor a 0.3 para ser considerada como homogénea.

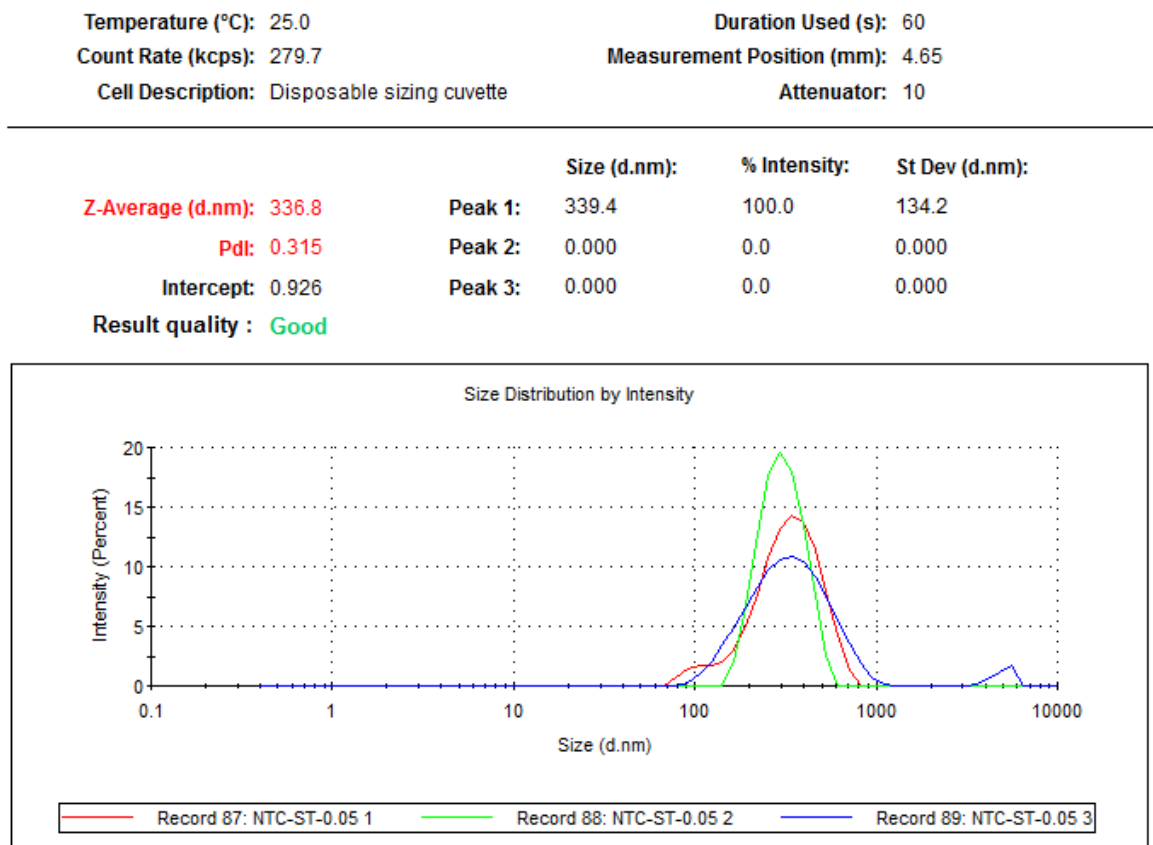


Figura 63. Tamaño de los aglomerados de Nanotubos de carbono sin tratamiento químico en concentración en volumen de 0.05%. Fuente: Obtenida del Zetasizer Nano ZS90.

Temperature (°C): 25.0
Count Rate (kcps): 257.9
Cell Description: Disposable sizing cuvette

Duration Used (s): 70
Measurement Position (mm): 4.65
Attenuator: 10

	Size (d.nm):	% Intensity:	St Dev (d.nm):
Z-Average (d.nm): 236.8	Peak 1: 238.9	100.0	64.36
Pdl: 0.213	Peak 2: 0.000	0.0	0.000
Intercept: 0.929	Peak 3: 0.000	0.0	0.000
Result quality : Good			

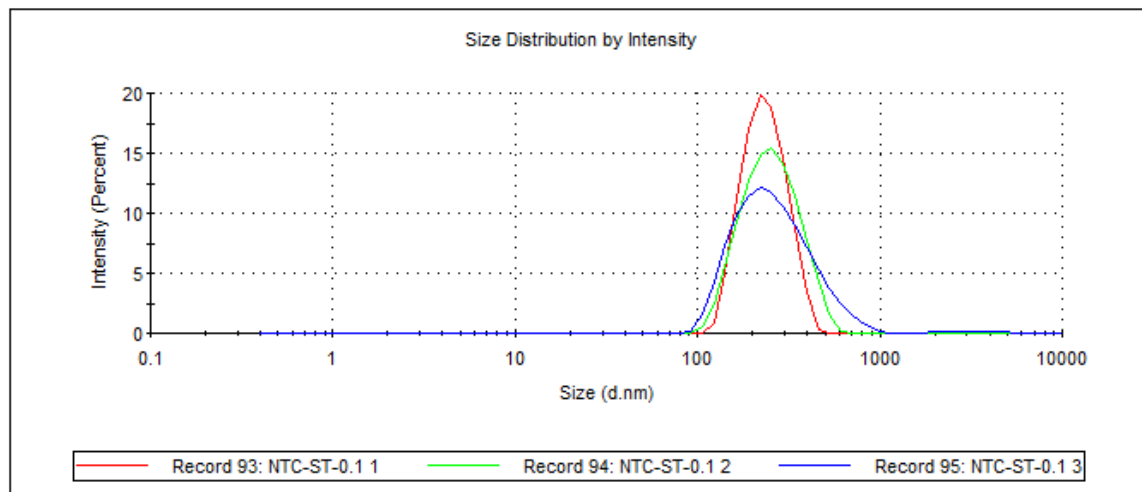


Figura 64. Tamaño de los aglomerados de Nanotubos de carbono sin tratamiento químico en concentración en volumen de 0.1%. Fuente: Obtenida del Zetasizer Nano ZS90.

Temperature (°C): 25.0
Count Rate (kcps): 387.1
Cell Description: Disposable sizing cuvette

Duration Used (s): 60
Measurement Position (mm): 4.65
Attenuator: 10

	Size (d.nm):	% Intensity:	St Dev (d.nm):
Z-Average (d.nm): 228.2	Peak 1: 273.9	100.0	100.4
Pdl: 0.165	Peak 2: 0.000	0.0	0.000
Intercept: 0.903	Peak 3: 0.000	0.0	0.000
Result quality : Good			

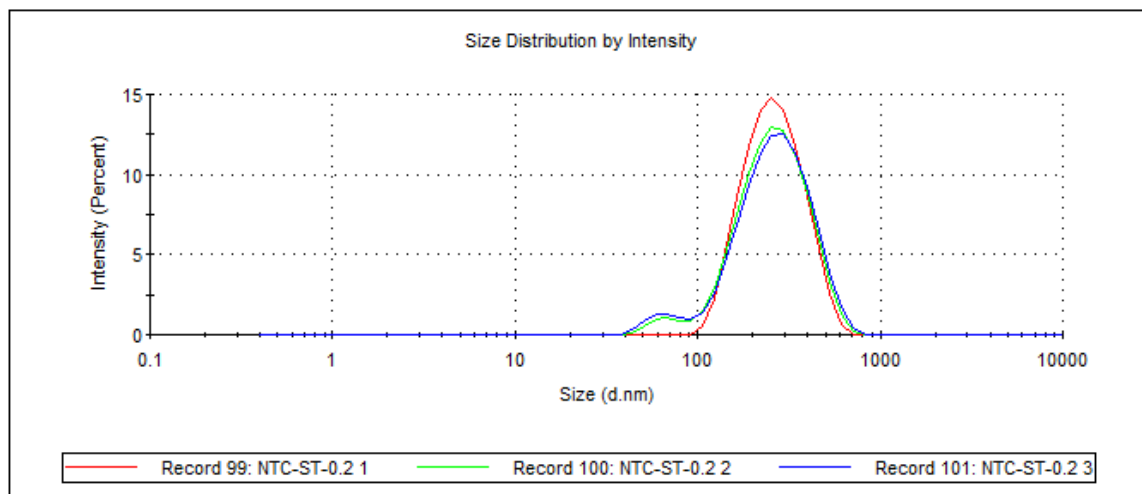


Figura 65. Tamaño de los aglomerados de Nanotubos de carbono sin tratamiento químico en concentración en volumen de 0.2%. Fuente: Obtenida del Zetasizer Nano ZS90.

Temperature (°C): 25.0
Count Rate (kcps): 300.4
Cell Description: Disposable sizing cuvette

Duration Used (s): 60
Measurement Position (mm): 4.65
Attenuator: 10

	Size (d.nm):	% Intensity:	St Dev (d.nm):
Z-Average (d.nm): 308.5	Peak 1: 363.2	100.0	142.3
Pdl: 0.229	Peak 2: 0.000	0.0	0.000
Intercept: 0.901	Peak 3: 0.000	0.0	0.000
Result quality : Good			

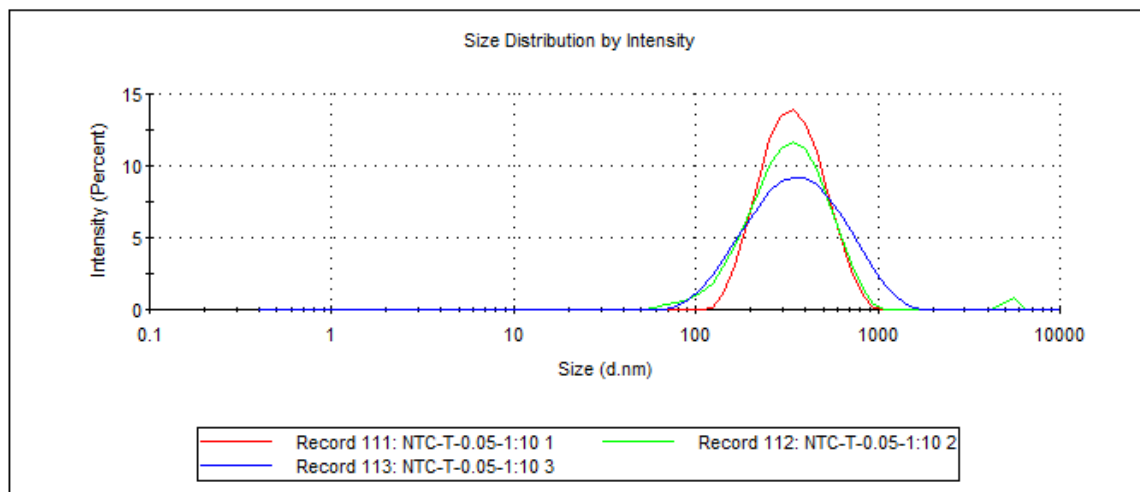


Figura 66. Tamaño de los aglomerados de Nanotubos de carbono con tratamiento químico en concentración en volumen de 0.05%. Fuente: Obtenida del Zetasizer Nano ZS90.

Temperature (°C): 25.0
Count Rate (kcps): 366.5
Cell Description: Disposable sizing cuvette

Duration Used (s): 60
Measurement Position (mm): 4.65
Attenuator: 11

	Size (d.nm):	% Intensity:	St Dev (d.nm):
Z-Average (d.nm): 189.5	Peak 1: 238.2	97.1	99.39
Pdl: 0.189	Peak 2: 47.92	2.9	10.04
Intercept: 0.886	Peak 3: 0.000	0.0	0.000
Result quality : Good			

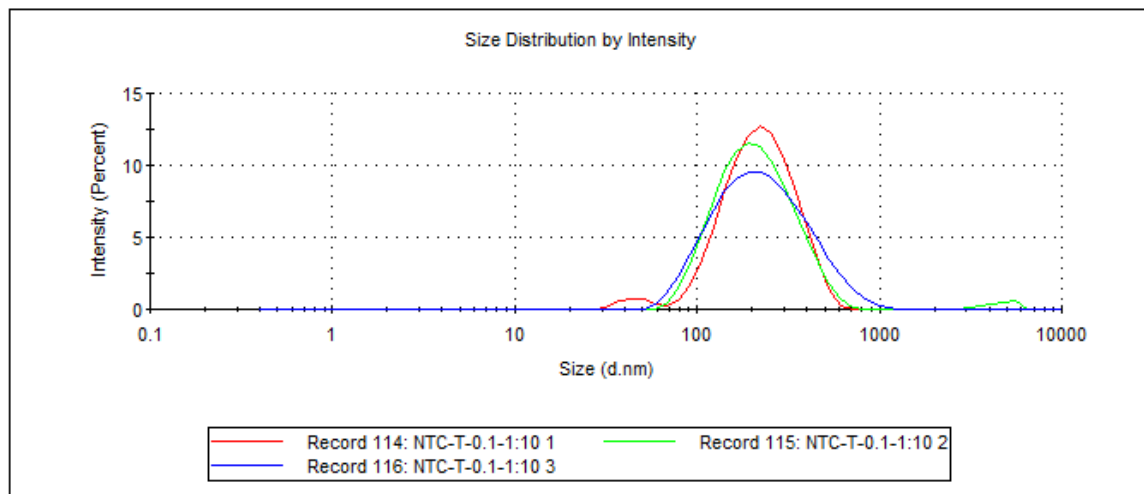


Figura 67. Tamaño de los aglomerados de Nanotubos de carbono con tratamiento químico en concentración en volumen de 0.1%. Fuente: Obtenida del Zetasizer Nano ZS90.

Temperature (°C): 25.0
Count Rate (kcps): 205.2
Cell Description: Disposable sizing cuvette

Duration Used (s): 70
Measurement Position (mm): 4.65
Attenuator: 11

	Size (d.nm):	% Intensity:	St Dev (d.nm):
Z-Average (d.nm): 185.2	Peak 1: 224.3	100.0	98.89
Pdl: 0.203	Peak 2: 0.000	0.0	0.000
Intercept: 0.894	Peak 3: 0.000	0.0	0.000
Result quality : Good			

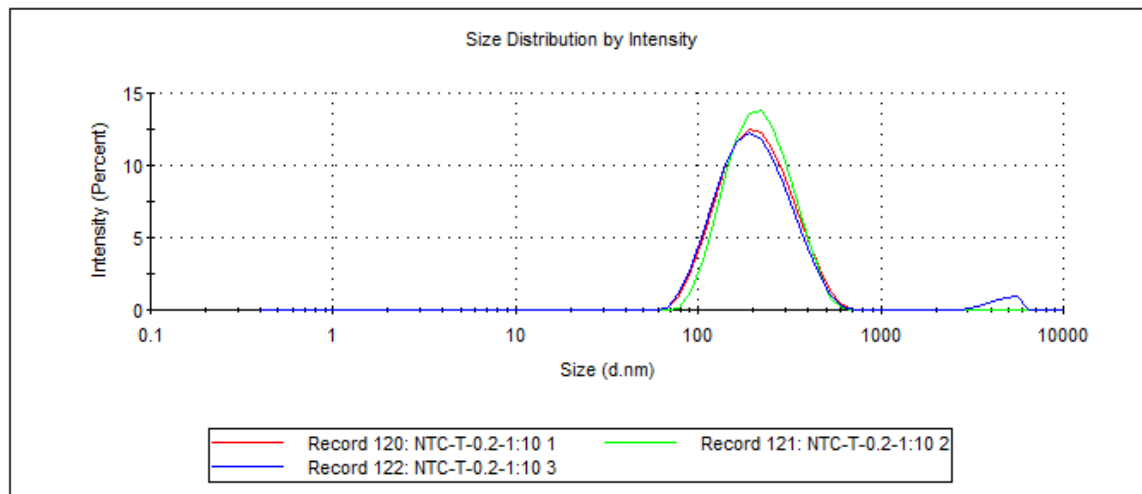


Figura 68. Tamaño de los aglomerados de Nanotubos de carbono con tratamiento químico en concentración en volumen de 0.2%. Fuente: Obtenida del Zetasizer Nano ZS90.

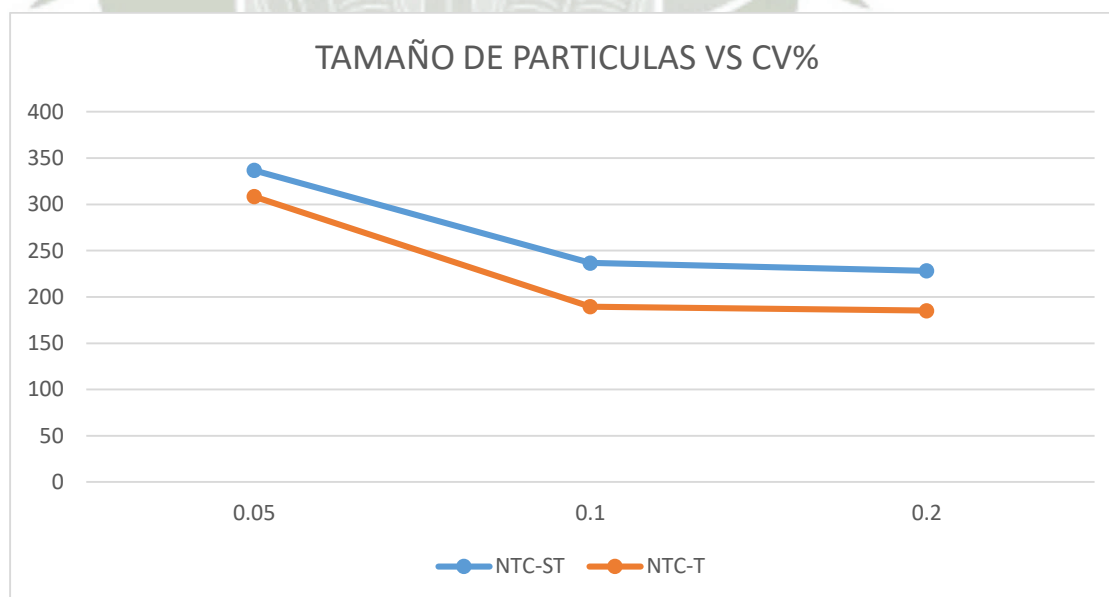


Figura 69. Tamaño de los aglomerados vs Concentración en volumen de las nanopartículas. Fuente: Propia.

4.3.3 Resultados de espectrofotometría

Las pruebas de espectrofotometría realizadas fueron 6, divididas en 3 sin tratamiento químico en concentraciones de 0.05%, 0.1% y 0.2%; las otras 3 con tratamiento químico en las mismas concentraciones en volumen.

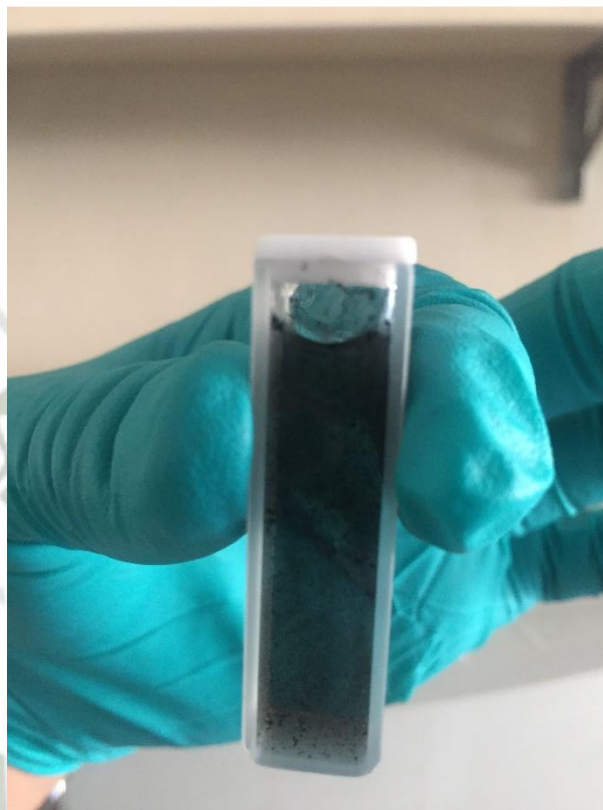


Figura 70. Probeta NTC sin tratamiento químico en 0.05% de concentración en volumen diluida 1:1 en agua ultra pura. Fuente: Propia.

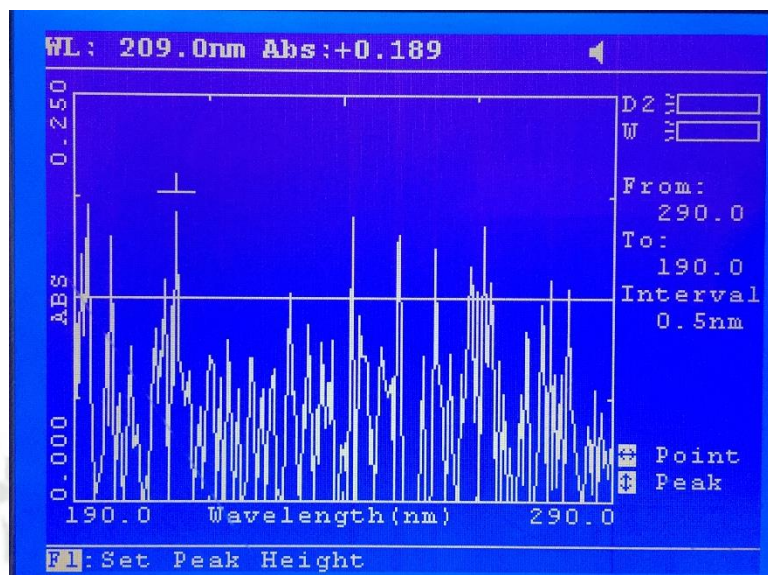


Figura 71. Absorbancia vs longitud de onda, NTC sin tratamiento químico en 0.05% de concentración en volumen diluida 1:1 en agua ultra pura. Fuente: Obtenida de espectrofotómetro UNICO SQ-2800.

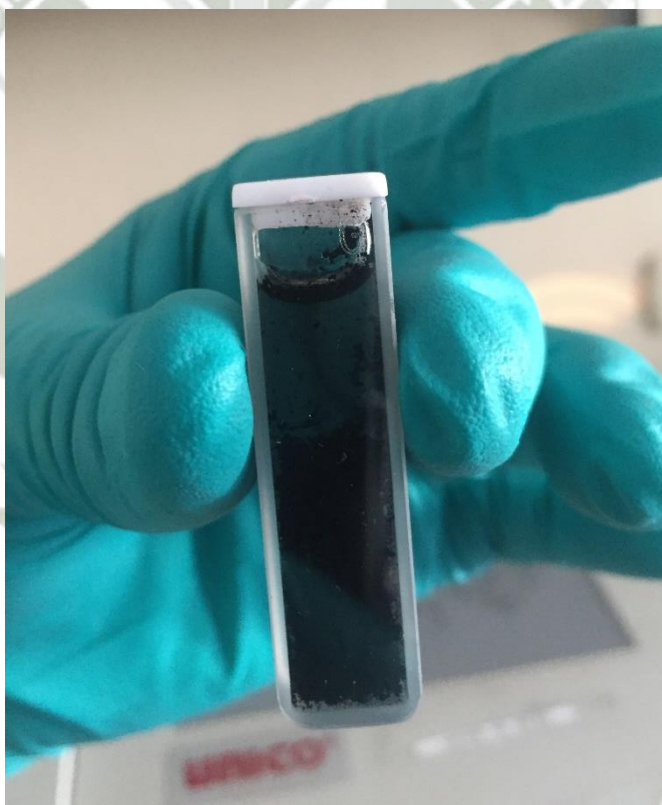


Figura 72. Probeta NTC sin tratamiento químico en 0.1% de concentración en volumen diluida 1:1 en agua ultra pura. Fuente: Propia.

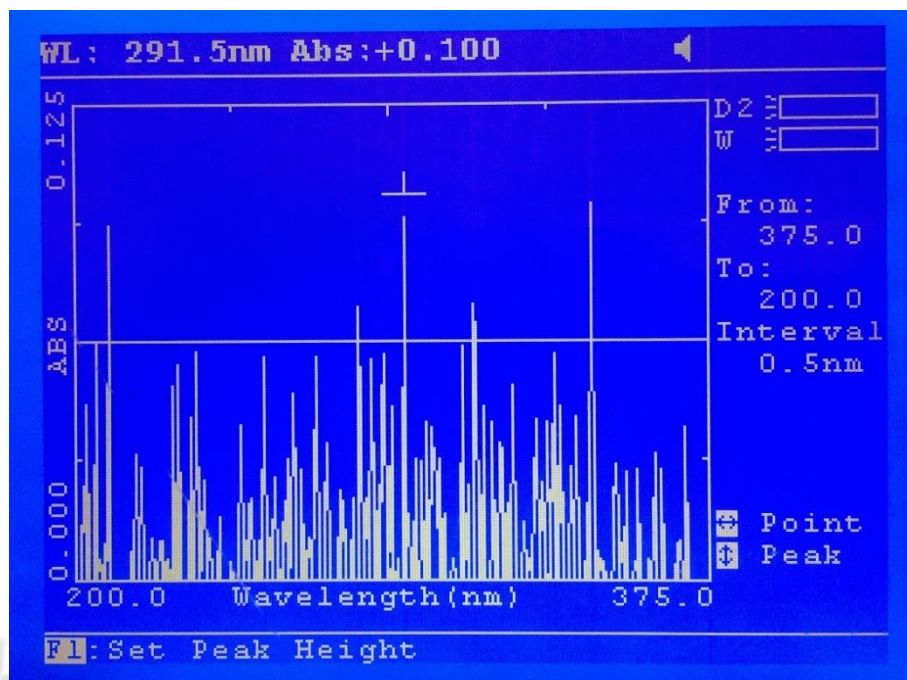


Figura 73. Absorbancia vs longitud de onda, NTC sin tratamiento químico en 0.1% de concentración en volumen diluida 1:1 en agua ultra pura. Fuente: Obtenida de espectrofotómetro UNICO SQ-2800.

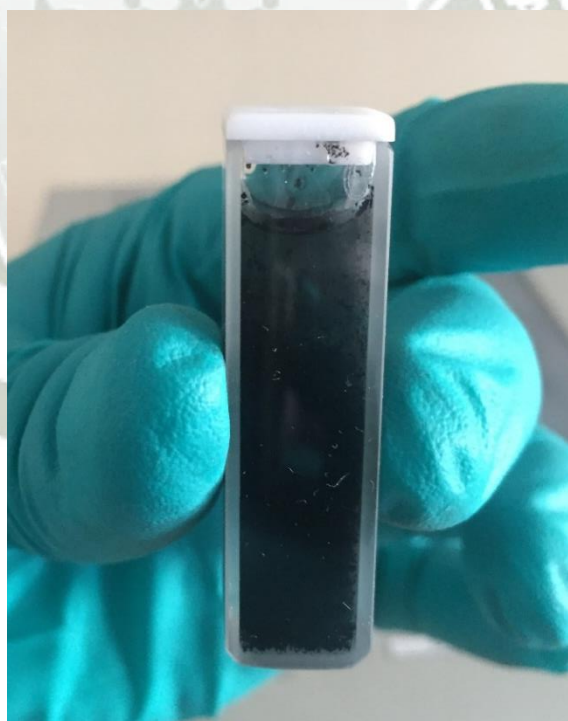


Figura 74. Probeta NTC sin tratamiento químico en 0.2% de concentración en volumen diluida 1:1 en agua ultra pura. Fuente: Propia.

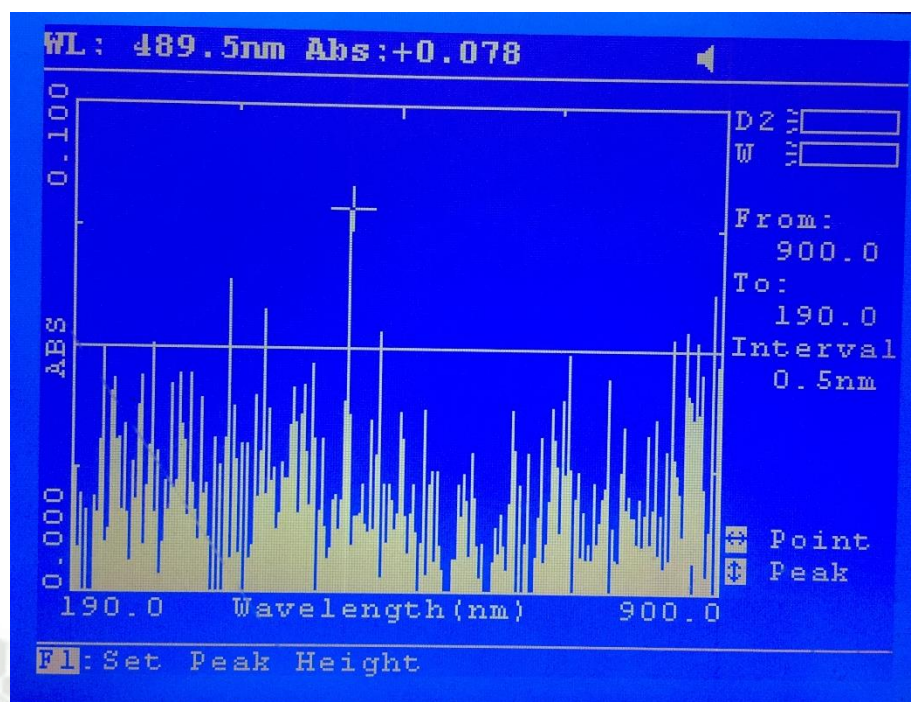


Figura 75. Absorbancia vs longitud de onda, NTC sin tratamiento químico en 0.2% de concentración en volumen diluida 1:1 en agua ultra pura. Fuente: Obtenida de espectrofotómetro UNICO SQ-2800.

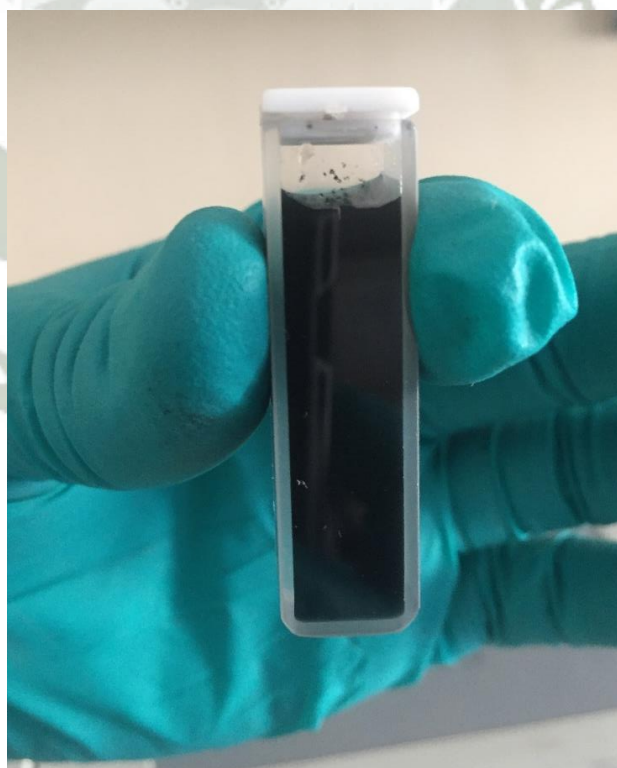


Figura 76. Probeta NTC con tratamiento químico en 0.05% de concentración en volumen diluida 1:1 en agua ultra pura. Fuente: Propia

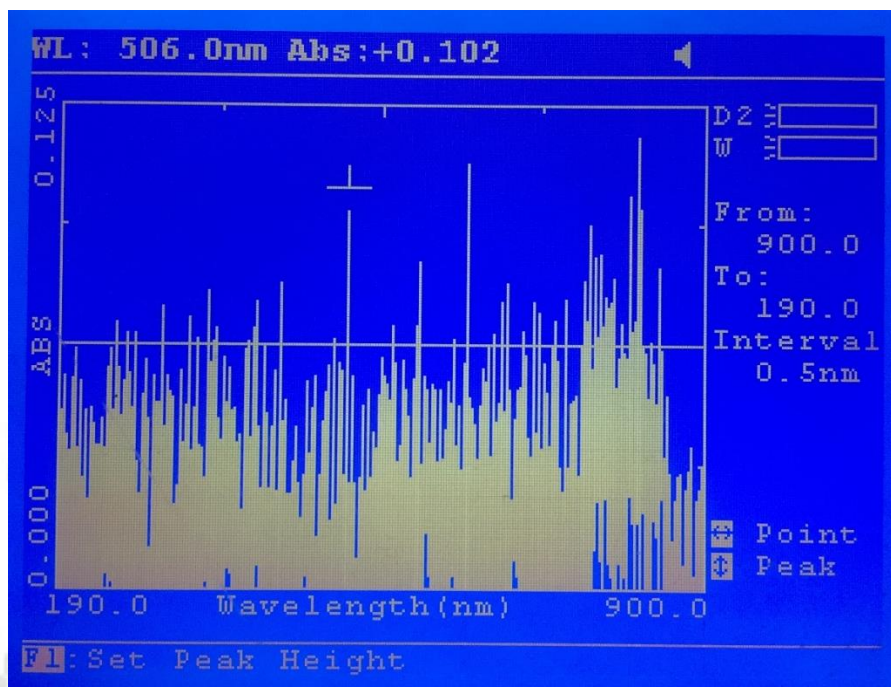


Figura 77. Absorbancia vs longitud de onda, NTC con tratamiento químico en 0.05% de concentración en volumen diluida 1:1 en agua ultra pura. Fuente: Obtenida de espectrofotómetro UNICO SQ-2800.

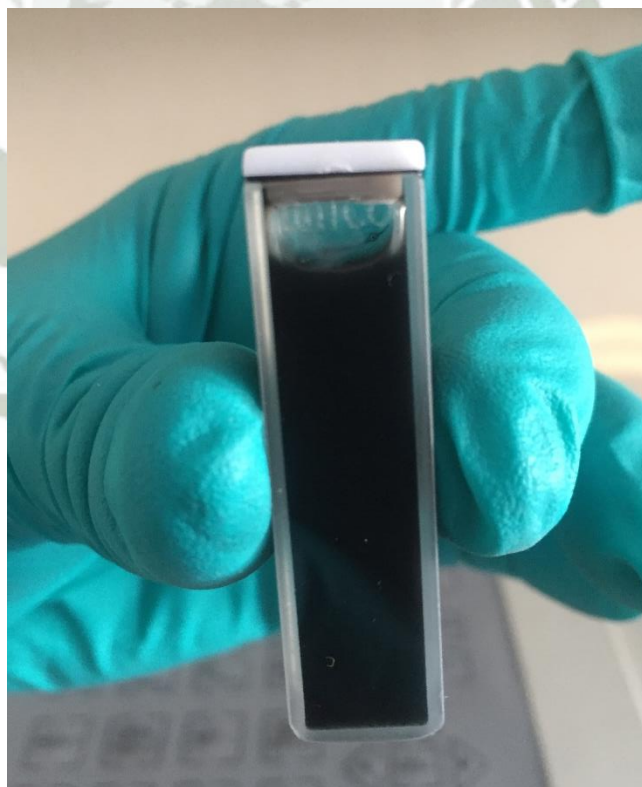


Figura 78. Probeta NTC con tratamiento químico en 0.1% de concentración en volumen diluida 1:1 en agua ultra pura. Fuente: Propia.

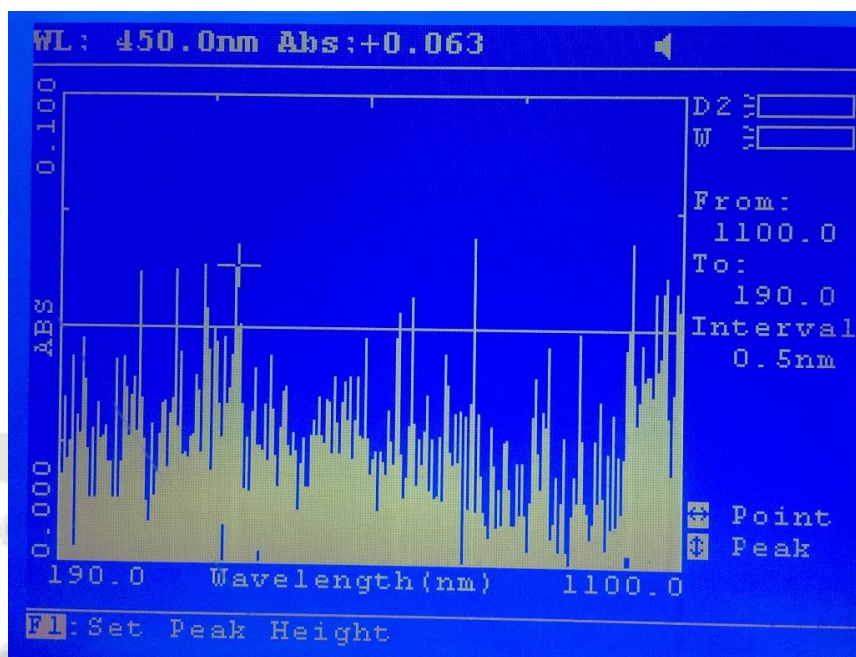


Figura 79. Absorbancia vs longitud de onda, NTC con tratamiento químico en 0.1% de concentración en volumen diluida 1:1 en agua ultra pura. Fuente: Obtenida de espectrofotómetro UNICO SQ-2800.

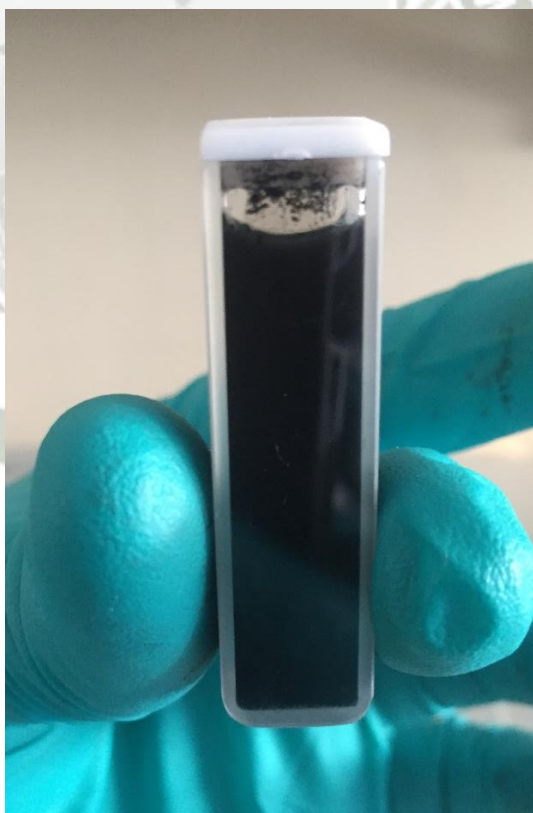


Figura 80. Probeta NTC con tratamiento químico en 0.2% de concentración en volumen diluida 1:1 en agua ultra pura. Fuente: Propia.

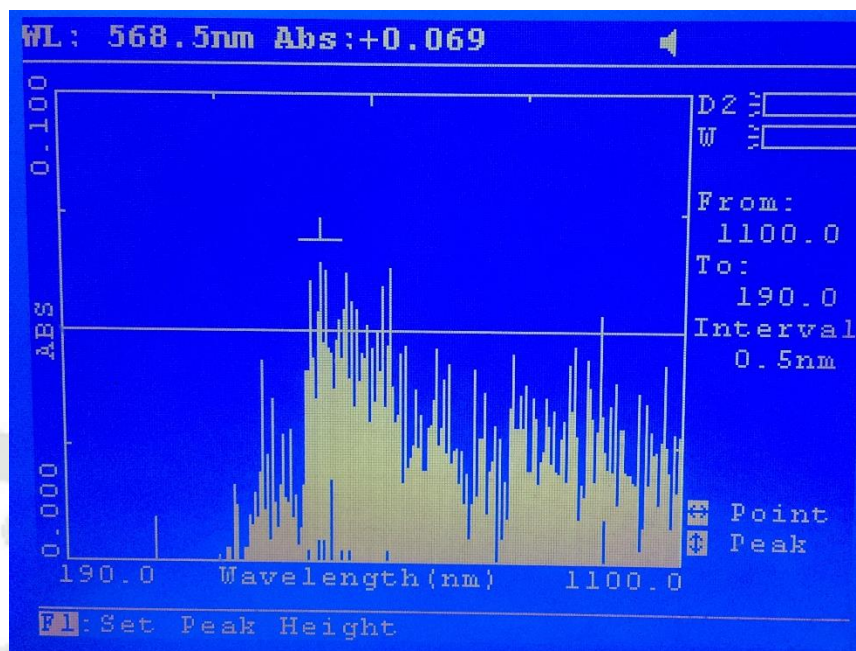


Figura 81. Absorbancia vs longitud de onda, NTC con tratamiento químico en 0.2% de concentración en volumen diluida 1:1 en agua ultra pura. Fuente: Obtenida de espectrofotómetro UNICO SQ-2800.

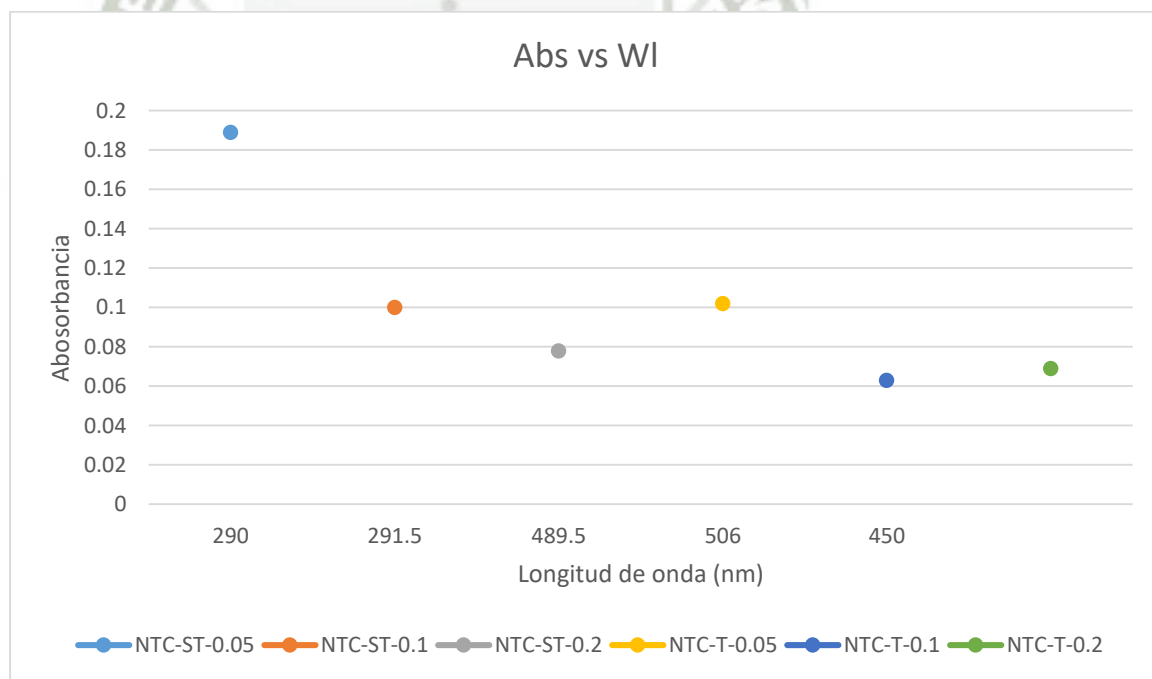


Figura 82. Gráfico Absorbancia vs Longitud de onda, caracterización de espectrofotometría. Fuente: Propia.

4.4 SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA CONVECCIÓN FORZADA EN UNA TUBERÍA RECTA

Dada las fórmulas y las suposiciones necesarias, procedemos a simular:

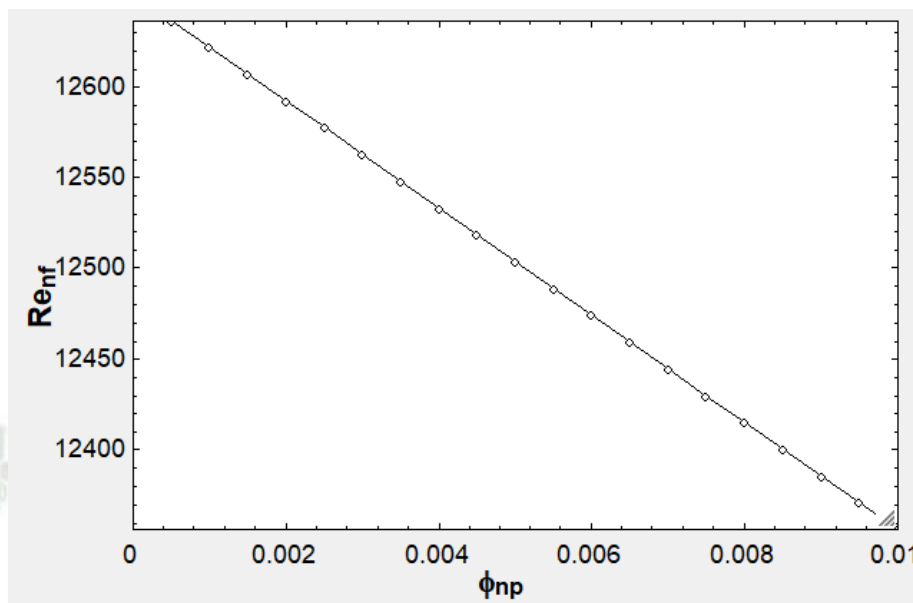


Figura 83. Reynolds vs concentración en volumen de nanopartículas. Fuente: Software EES.

Para los valores asumidos, se muestra que el número de Reynolds es mayor a 10 000, por lo que para nuestro proceso el flujo se considerará turbulento, a partir de ello, se procederá a utilizar las fórmulas ya estudiadas en el Capítulo II.

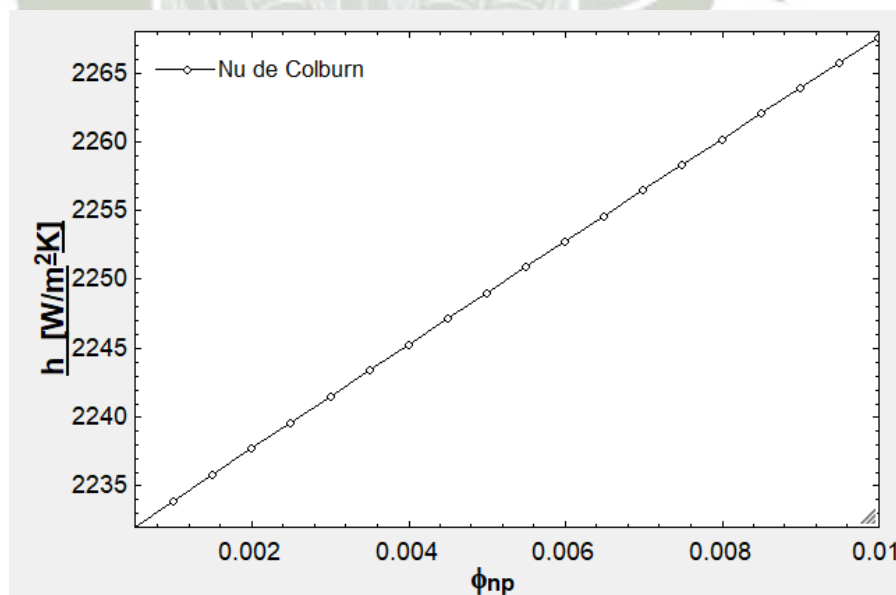


Figura 84. H convectivo vs concentración en volumen de nanopartículas, usando el Número de Nusselt de Colburn. Fuente: Software EES.

Tabla 5. Valores de h convectivo en relación a la concentración en volumen de nanopartículas utilizando el Número de Nusselt de Colburn. Fuente: Obtenido del EES.

1..20	ϕ_{np}	h [W/m ² -K]
Run 1	0.0005	2232
Run 2	0.001	2234
Run 3	0.0015	2236
Run 4	0.002	2238
Run 5	0.0025	2240
Run 6	0.003	2242
Run 7	0.0035	2243
Run 8	0.004	2245
Run 9	0.0045	2247
Run 10	0.005	2249
Run 11	0.0055	2251
Run 12	0.006	2253
Run 13	0.0065	2255
Run 14	0.007	2257
Run 15	0.0075	2258
Run 16	0.008	2260
Run 17	0.0085	2262
Run 18	0.009	2264
Run 19	0.0095	2266
Run 20	0.01	2268

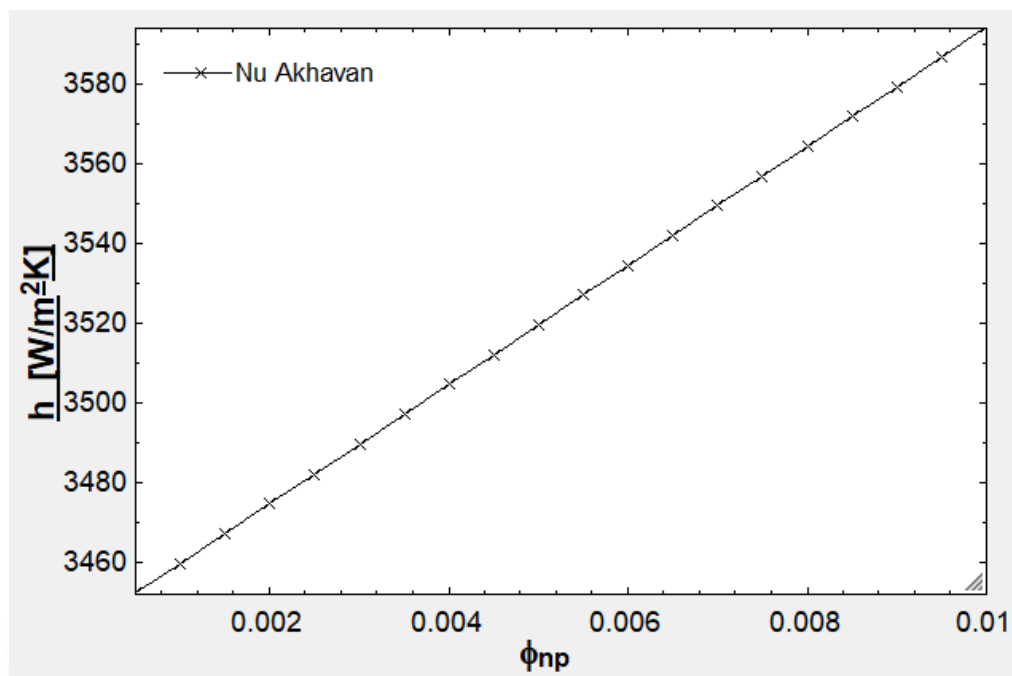


Figura 85. h convectivo vs concentración en volumen de nanopartículas, usando el Número de Nusselt de Akhavan. Fuente: Software EES.

Tabla 6. Valores de h convectivo en relación a la concentración en volumen de nanopartículas utilizando el Número de Nusselt de Akhavan. Fuente: Obtenido del EES.

1 1..20	ϕ_{np}	2 h [W/m ² -K]
Run 1	0.0005	3452
Run 2	0.001	3460
Run 3	0.0015	3467
Run 4	0.002	3475
Run 5	0.0025	3482
Run 6	0.003	3490
Run 7	0.0035	3497
Run 8	0.004	3505
Run 9	0.0045	3512
Run 10	0.005	3520
Run 11	0.0055	3527
Run 12	0.006	3535
Run 13	0.0065	3542
Run 14	0.007	3550
Run 15	0.0075	3557
Run 16	0.008	3564
Run 17	0.0085	3572
Run 18	0.009	3579
Run 19	0.0095	3587
Run 20	0.01	3594

Para establecer una base de comparación respecto al agua como fluido base, se analizó el mismo sistema, esta vez utilizando solo agua bajo las mismas condiciones anteriores.

Datos de entrada

$$T_1 = 20 \text{ [C] Temperatura}$$

$$P_1 = 101.325 \text{ [kPa] Presion}$$

$$\rho_m = \rho (\text{water}, T = T_1, P = P_1)$$

$$c_{p,m} = Cp (\text{water}, T = T_1, P = P_1)$$

$$u_m = 0.5 \text{ [m/s]}$$

$$d = 0.0254 \text{ [m]}$$

Solucion:

$$Nus_1 = \frac{h \cdot d}{k_m}$$

$$Nus_1 = 0.023 \cdot Re_m^{0.8} \cdot Pr_m^{0.4} \quad \text{Cengel 2011}$$

$$k_m = k (\text{water}, T = T_1, P = P_1)$$

$$Pr_m = \frac{c_{p,m} \cdot \mu_m}{k_m \cdot \left| 0.001 \cdot \frac{\text{kW/m-K}}{\text{W/m-K}} \right|}$$

$$Re_m = \frac{\rho_m \cdot u_m \cdot d}{\mu_m}$$

$$\mu_m = \text{Visc} (\text{water}, T = T_1, P = P_1)$$

Figura 86. Simulación para hallar el H convectivo utilizando agua como fluido. Fuente: Obtenida en el EES.

Unit Settings: SI C kPa kJ mass deg

$c_{p,m} = 4.183 \text{ [kJ/kg-K]}$	$d = 0.0254 \text{ [m]}$	$h = 2230 \text{ [W/m}^2\text{-K]}$	$k_m = 0.5861 \text{ [W/m-K]}$
$\mu_m = 0.001002 \text{ [kg/m-s]}$	$Nus_1 = 96.65$	$Pr_m = 7.152$	$P_1 = 101.3 \text{ [kPa]}$
$Re_m = 12651$	$\rho_m = 998.2 \text{ [kg/m}^3\text{]}$	$T_1 = 20 \text{ [C]}$	$u_m = 0.5 \text{ [m/s]}$

Figura 87. Resultados obtenidos para el H convectivo utilizando agua como fluido. Fuente: Obtenida del EES.

Se obtiene el valor de $h = 2230 \frac{W}{m^2K}$

CONCLUSIONES

- En el Laboratorio de Investigación de Ciencia de los Materiales de la Universidad Católica de Santa María, se cuenta con los equipos e insumos necesarios para poder sintetizar nanofluidos a partir de nanotubos de carbono en agua deionizada como fluido base.
- Los nanofluidos pueden obtenerse a partir del proceso de ultrasonicación (tratamiento físico), pero mejores índices de dispersión son obtenidos cuando anterior a dicho proceso, se realiza el tratamiento químico.
- Los nanotubos de carbono por naturaleza, son hidrofílicos, ya que, al haberse diluido en agua, pierden totalmente la dispersión inicial alcanzada con el tratamiento físico.
- El tratamiento químico aplicado a los nanotubos de carbono, tiene como finalidad hacer a los nanotubos de carbono hidrofílicos en el agua, una vez que se ha aplicado el tratamiento físico, incluso después de diluirlos, no pierden la dispersión alcanzada en ellos.
- El tratamiento químico, también, purifica a los nanotubos de carbono, eso se demuestra en la pérdida de peso en 7.52%.
- A través de la caracterización de potencial zeta, se observa que, en los nanotubos de carbono sin tratar, la población no es tan homogénea como en aquellos que si han sido tratados anteriormente químicamente.
- El tratamiento químico retarda la formación de aglomerados, y aquellos aglomerados que se forman producto de la naturaleza propia de los nanotubos de carbono, son hasta 100nm menores que en los que solo tienen tratamiento físico.
- El potencial zeta en los nanotubos de carbono tratados químicamente tienen a hacerse estables y permanecer en el límite de la estabilidad con un valor medio de -30 mV.
- En la caracterización de los aglomerados, en nanotubos de carbono con tratamiento químico al 0.1% de concentración en volumen se observa un pico de 47.92 nm, lo que da a entender que hay presencia de nanotubos de carbono sin haber formado aglomerados aún, ya que dicho valor es menor a 100 nm.

- En el ensayo de espectrofotometría se determina que los nanofluidos sin tratamiento químico presentan su pico de absorbancia a longitudes de onda menor a 500nm, mientras los que tienen tratamiento químico, presentan su pico de absorbancia a longitudes mayores a 500 nm.
- Entre las muestras sin tratamiento químico, la muestra de 0.05% de concentración en volumen obtiene el mayor valor de absorbancia, por lo tanto, es el que menor cantidad de precipitados presenta.
- De igual manera, para las muestras que tienen tratamiento químico, las de 0.05% de concentración en volumen presentan mayor valor de absorbancia, por lo tanto, contiene menor cantidad de precipitados en comparación con las otras muestras.
- A mayor cantidad de concentración en volumen de nanotubos de carbono, se obtiene mayores tasas de precipitación.
- No se puede hacer una comparación real entre las pruebas sin tratamiento químico y las que sí tienen tratamiento químico, ya que al diluirlas cambian sus características en dispersión, de tal manera que solo se pueden comparar las que tienen los mismos tratamientos.
- Por medio de la simulación numérica, el valor del coeficiente de convectividad bajo el modelo convencional de Colburn presenta una mejora en dicho coeficiente de hasta 1.70% para una concentración en volumen de 1.0%.
- Usando el modelo matemático de Akhavan, para determinar el Número de Nusselt en nanofluidos a base de nanotubos de carbono funcionalizados (tratamiento químico) en agua, el coeficiente de convectividad térmica alcanza hasta un 61.17% de mejora para una concentración en volumen de 1.0%.
- Ambos modelos matemáticos presentan mejoras en el valor de conectividad térmica, lo que hace viable su aplicación en sistemas de transferencia de calor.

RECOMENDACIONES

- Debido a la naturaleza del proceso de obtención de nanotubos de carbono, no se puede sintetizar grandes cantidades de nanomaterial, lo que dificulta trabajar nanofluidos con mayores índices de concentración en volumen, se recomienda diseñar e implementar un reactor de lecho fluidizado que permite obtener mayores cantidades de nanomateriales, para continuar con la investigación.
- Habiéndose obtenido el nanofluido, se recomienda implementar un módulo en el cual se puedan estudiar las características térmicas del nanofluido, en el cual este sea el fluido secundario, de tal manera se pueda comprobar los valores obtenidos por los modelos matemáticos.
- Al filtrar las muestras para la caracterización en el Nanosizer, se vió la posibilidad de trabajar nanofluidos que no contengan partículas aglomeradas visibles; ya que se encuentran en un estado coloidal, y los nanotubos de carbono filtrados, ya dispersados pueden volver a utilizarse.
- Se deja muestras para ensayos térmicos futuros en el caso de implementar módulos de caracterización térmica.
- Los nanotubos de carbono que quedaron en el filtro, producto de la preparación de muestras para el Zetasizer, pueden ser llevadas a un Microscopio de Barrido Electrónico para estudiar su aspecto y dispersión después de los tratamientos realizados.
- Se recomienda dispersar los nanotubos de carbono en otros fluidos que puedan ser utilizados como fluidos secundarios en sistemas de transferencia de calor.
- Finalmente se recomienda, seguir apoyando a la investigación tan importante para el desarrollo de la ingeniería.

BIBLIOGRAFÍA

1. Ajayan, P. M. (1999). Nanotubes from Carbon. *Chemical Reviews*, 1787-1800.
2. Akhavan-Behabadi, M., Shahidi, M., & Aligoodarz, M. (2015). An experimental study on heat transfer and pressure drop of MWCNT-water nano-fluid inside horizontal coiled wire inserted tube. *Int Commun Heat Mass Transf* 63, 62-72.
3. Amiri, A., Sadri, R., Shanbedi, M., Ahmadi, G., Chew, B. T., Kazi, S. N., & Dahari, M. (2015). Energy Convers. *Manag.* 92, 322-330.
4. Assael, Chen, Metaxa, & Wakeham. (2004). Thermal conductivity of suspensions of carbon nanotubes in water. *International Journal of Thermophysics*, 971-985.
5. Assael, M., & al., E. (2005). Thermal conductivity enhancement in aqueous suspensions of carbon multi-walled an double-walled nanotubes in the presence of two different dispersants. *Int. J. Thermophys.* 26, 647 - 664.
6. Bond, W. (1927). Bubbles and drops and Stokes' law. *Lond. Edinb. Dublin Philos. Mag. J. Sci.* 4, 889-898.
7. Brinker, C. J., & Scherer, G. W. (1990). *Sol-Gel Science: The Physics and Chemistry of Sol-Gel*. San Diego, CA: Academic Press.
8. Cengel, Y., & A., G. (2011). *Transferencia de calor y masa*. México, D.F.: MCGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES.
9. Chevalier, J., Tillement, O., & Ayela, F. (2009). Structure and rheology of SiO₂ nanoparticle suspensions under very high shear rates. *Phys. Rev. E* 80, 051403.
10. Choi, S., Zhang, Z., & Koblinski, P. (2004). Nanofluids. *Encyclopedia of Nanoscience and Nanotechnology*, 737-757.
11. Choi, S., Zhang, Z., Yu, W., Lockwood, F., & Grulke, E. (2001). Anomalous thermal conductivity enhancement in nanotube suspensions. *Appl. Phys. Lett.* 79, 2252-2254.
12. Covalada, P. (14 de Mayo de 2015). *Youtube*. Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=QobP25aT-t0>
13. Das, S. K., Putra, N., & Roetzel, W. (2003). Pool boiling characteristics of nano-fluids. *Int. J. Heat Mass Transfer* 46 (5), 851-862.

14. Demirbas, M. (2006). *Energy Source. Part B: Economics, Planning, and Policy*.
15. Eastman, J., Choi, S., Li, S., Yu, W., & Thompson, L. (2001). Anomalous increase in effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles. *Applied Physics Letters*, 718-720.
16. Einstein, A. (1956). *Investigations on the Theory of the Brownian Movement*. New York: Dover Publications, Inc.
17. Esumi, K., Ishigama, M., Nakajima, A., Sawada, K., & Honda, H. (1996). Chemical treatment of carbon nanotubes. *Carbon* 34, 279-281.
18. Farbod, M., Ahangarpur, A., & Gholamreza, S. (2014). Stability and thermal conductivity of water-based carbon nanotube nanofluids. *Particuology*, 2-5.
19. Farbod, M., Tadavani, S., & Kiasat, A. (2011). Surface oxidation and effect of electric field on dispersion and colloids stability of multiwalled carbon nanotubes. *Colloids and surfaces A: Physicochemical Engineering Aspects.*, 685-690.
20. Gao, G., Çagin, T., & Goddard III, W. (1998). Energetics, structure, mechanical and vibrational properties of single-walled carbon nanotubes. *Nanotechnology Vol. 9*, 184-191.
21. Gao, W., Kong, L., & Hodgson, P. (2012). Atomic interaction of functionalized carbon nanotube-based nanofluids with a heating surface and its effects on heat transfer. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 5007-5015.
22. Garg, P., Alvarado, J., Marsh, C., Carlson, T., Kessler, D., & Annamalai, K. (2009). An experimental study on the effect of ultrasonication on viscosity and heat transfer performance of multi-wall carbon nanotube-based aqueous nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 52, 5090-5101.
23. Ghoozati, A., Morad Rashidi, A., & Shariaty-Niasar, M. (2014). Effects of surface modification on the dispersion and thermal conductivity of CNT/water nanofluids. *International Communications in Heat and Mass Transfer* 54, 1-7.

24. Halelfadl, S., Estellé, P., Aladag, B., Doner, N., & Maré, T. (2013). Viscosity of carbon nanotubes water-based nanofluids: Influence of concentration and temperature. *International Journal of Thermal Sciences* 71, 111-117.
25. Hamilton, R., & Crosser, O. (1962). Thermal conductivity of heterogeneous twocomponent. *IEC Fundam*, 187-191.
26. Hamilton, R., & Crosser, O. (1962). Thermal conductivity of heterogeneous two-component systems. *Ind Eng Chem Fundam* 1, 91-187.
27. He, H., & Gao, C. (2010). General Approach to Individually Dispersed, Highly Soluble, and Conductive Graphene Nanosheets Functionalized by Nitrene Chemistry. *Chemistry of Materials* 22, 5054-5064.
28. Hilding, J., Grulke, E., & Zhang, Z. L. (2003). Dispersion of carbon nanotubes. *J. Dispersion Sci. Technol.* 24, 1-41.
29. Hone, J., Whitney, M., Pistoki, C., & Zettl, A. (1999). Thermal conductivity of single-walled carbon nanotubes. *PHYSICAL REVIEW B* 59, R2514-R2516.
30. Israelachvili, J. N. (1992). *Intermolecular and Surface Forces*. San Diego : Academic Press.
31. J., W. (1990). The Elements, Their Origin, Abundance and Distribution. *Journal of Molecular Structure*, 207.
32. Jang, S., & S., C. (2006). *Appl. Therm. Eng.* 26, 2457.
33. Kakade, & Pillai. (2008). An efficient route towards the covalent functionalization of single walled carbon nanotubes. *Applied Surface Science*, 4936-4943.
34. Kumaresan, V., & Velraj, R. (2012). Experimental investigation of the thermo-physical properties of water–ethylene glycol mixture based CNT nanofluids. *Thermochim. Acta* 545, 180-186.
35. Li, Y., Zhou, S., Tung, S., Schneidar, E., & Xi, S. (2009). A review on development of nanofluid preparation and characterization. *Powder Technology*, 89-101.
36. Lijima, S. (1991). Helical microtubules of graphitic carbon. *Nature. International journal of science*, 56-58.
37. Lo, C. H., Tsung, T. T., & Chen, L. C. (2005). Shape-controlled synthesis of Cu-based nanofluid using submerged arc nanoparticle synthesis system (SANSS). *Journal of Crystal Growth*, vol. 277, 636–642.

38. Mauter, M. S., & Elimelech, M. (2008). Environmental Applications of Carbon-Based Nanomaterials. *Environmental Science and Technology*, 5843-5859.
39. Mueller, S., Llewellyn, E. W., & Mader, H. M. (2010). The rheology of suspensions of solid particles. *Proc. Royal Soc. A* 466, 1201-1228.
40. Osorio, A., Silveira, I., Bueno, V., & Bergmann, V. (2008). H₂SO₄/HNO₃/HCl-functionalization and its effect on dispersion of carbon nanotubes in aqueous media. *Applied Surface Science*, 255, 2485–2489.
41. Otanicar, T., Phelan, P., Prasher, R., Rosengarten, G., & Taylor, R. (2010). *Renew.Sust. Energ.*
42. Pierre, A. C. (2013). *Introduction to Sol-Gel Processing*. New York: Springer Science & Business.
43. Pop, E., Mann, D., Wang, Q., Goodson, K., & Dai, H. (2006). Thermal conductance of an individual single-wall carbon nanotube above room temperature. *Nano Lett.* 6, 96-100.
44. Rodríguez, S. (2016). Estudio de dispersión de nanopartículas de grafeno en agua. *Trabajo final de máster. Universitat Jaume I*, 22-23.
45. Saito, R., & Dresselhaus, G. (1998). Physical Properties of Carbon. *World Scientific*, 35.
46. Sarsam, W. S., Amiri, A., Kazi, S. N., & Badarudin, A. (2016). Energy Convers. *Manag.* 116, 101-111.
47. Schierz, A., & Zanker, H. (2009). Aqueous suspensions of carbon nanotubes: Surfaceoxidation, colloidal stability and uranium sorption. *Environmental Pollution*, 1088-1094.
48. Shahrul, I. M., Mahbubul, I. M., Khaleduzzaman, S. S., Saidur, R., & Sabri, M. (2014). A comparative review on the specific heat of nanofluids for energy perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 38, 88-98.
49. Shan, C., Yang, H., Han, D., Zhang, Q., Ivaska, A., & Niu, L. (2009). Water-Soluble Graphene Covalently Functionalized by Biocompatible Poly-l-lysine. *Langmuir* 25, 12030-12033.
50. Sharma, V., Park, K., Srinivasarao, M., & Mater. (2009). Mater. Sci. Eng. R. *Rep.* 65, 1-38.

51. Somasundaran, P., Markovic, B., Krishnakumar, S., & Yu, X. (1997). *Handbook of Surface and*. Boca Raton: CRC Press.
52. Tans, S., Devoret, M., Dai, H., Thess, A., Smalley, R., Geerligs, L., & Dekker, C. (1997). Individual single-wall carbon nanotubes as quantum wires. *Nature* 386, 474-477.
53. Veca, L. M., Lu, F., Mezziani, M. J., Cao, L. Z., Qu, L., Shrestha, M., & Sun, Y. P. (2009). Polymer functionalization and solubilization of carbon nanosheets. *Chemical Communications* 18, 2565-2567.
54. Vidu, R., Rahman, M., Mahmoudi, M., Enachescu, M., Poteca, T., & Opris, I. (2014). Nanostructures: a platform for brain repair and augmentation. *Frontiers in Systems Neuroscience*, 91.
55. Wen, D., & Ding, Y. (2004). Effective thermal conductivity of aqueous suspensions of carbon nanotubes (carbon nanotube nanofluids). *J Thermophys Heat Transf* 18, 481-5.
56. Wong, K. (2010). Applications of Nanofluids: Current and Future. *Advances in Mechanical Engineering* , 3-12.
57. Xing, M., Yu, J., & Wang, R. (2015). Experimental study on the thermal conductivity enhancement of water based nanofluids using different types of carbon nanotubes. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 88, 609-616.
58. Yazid, M., Sidik, N., & Yahya, W. (2017). Heat and mass transfer characteristics of carbon nanotube nanofluids: A. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 80, 914-941.
59. Yi, W., Lu, L., Lin-Dian, Z., Pan, Z., & Xie, S. (1999). Linear Specific Heat of Carbon Nanotubes. *Phys. Rev. B*, 59(14), R9015.
60. Yu, F., Chen, Y., Liang, X., Xu, J., Lee, C., Liang, Q., . . . Deng, T. (2017). Dispersion stability of thermal nanofluids . *Progress in Natural Science: Materials International* 27, 531-542.
61. Yu, M., Files, B., Arepalli, S., & Ruoff, R. (2000). Tensile Loading of Ropes of Single Wall Carbon Nanotubes and their Mechanical Properties. *PHYSICAL REVIEW LETTERS*, 5552–5555.
62. Yu, W., & Xie, H. (2012). A Review on Nanofluids: Preparation, StabilityMechanisms,. *Hindawi Publishing Corporation*, 1-17.

63. Zhu, H., Lin, Y., & Yin, Y. (2004). A novel one-step chemical method for preparation of copper nanofluids. *Journal of Colloid and Interface Science*, 100-103.



ANEXOS

Anexo 1: Formato de obtención de nanotubos de carbono.



	Formato de Control	FORM-LICMA-003
	Registro de control para programación de Temperatura flujos y presión del reactor CVD	Versión 2 Página 1 de 1

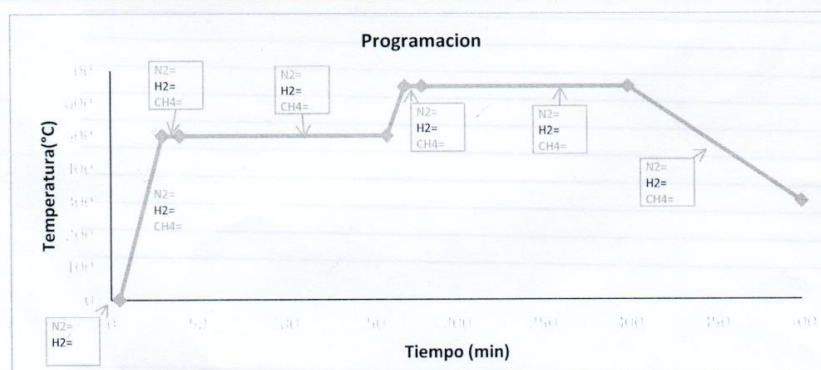
Fecha	21/05/18	Código: NF-Fe50 N:0	Responsables: CMM
-------	----------	---------------------	-------------------

A.- PROGRAMACIÓN DEL HORNO

ZONA 1				ZONA 2				ZONA 3			
T(°C)		Tiempo		T(°C)		Tiempo		T(°C)		Tiempo	
t1	5	C1	0	t1	5	C1	0	t1	5	C1	0
t2	30	C2	0	t2	30	C2	0	t2	30	C2	0
t3	130	C3	500	t3	130	C3	500	t3	130	C3	500
t4	25	C4	500	t4	25	C4	500	t4	25	C4	500
t5	250	C5	600	t5	250	C5	700	t5	240	C5	600
t6	140	C6	650	t6	140	C6	700	t6	140	C6	600
t7	-121	C7	250	t7	-121	C7	300	t7	-121	C7	250
t8		C8		t8		C8		t8		C8	
t9		C9		t9		C9		t9		C9	

B.- PROGRAMACION DE FLUJOS

Duración			T	P	CH4	N2	H2	Δt
celular	Horno	min	°C	bar	ml/min	ml/min	ml/min	min
		5	0	0	0	250	0	5
		35	550	0	0	150	0	30
		45	550	0	0	150	0	10
		165	550	0	0	150	100	120
		190	700	0	0	150	0	25
		200	700	0	0	150	0	10
		440	700	0	90	675	0	240
		500	300	0	0	150	0	140



OBSERVACIONES:

COPIA CONTROLADA-PROYECTO CARBONO

	Formato de Control	FORM-LICMA-005
	Registro de pesos de catalizador	Versión 2 Página 1 de 1

Fecha	Código	Responsables
-------	--------	--------------

A.- Pesos iniciales (Antes del Ensayo)

N° Crisol	MASA DE LOS CRISOLES				MASA CRISOL CON CAT				mcat	m NiO	m CuO	m Al2O3
	1	2	3	Prom	1	2	3	Prom				
	50,1171	50,1171	50,1173	50,1171	50,3230	50,3230	50,3230					

B.- Pesos Finales (Después del Ensayo)

N° Crisol	MASA FINAL CRISOL CON CAT				PESO TEÓRICO REDUCCIÓN			VARIACIÓN DE MASA			
	1	2	3	Prom	mNi	mCu	mteo cat	Prom	FIBRAef	g/gcat	

P_{Fco}: 19.5682/19.5684/19.5684

P_{Fco+m}: 20.4339/20.4349/20.4353

OBSERVACIONES:

81

COPIA CONTROLADA-PROYECTO CARBONO

FORM-LICMA-004

Versión 2
Página 1 de 1

[illegible]

COPIA CONTROLADA-PROYECTO CARBONO