

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE CIENCIAS QUIMICAS



**MEJORAMIENTO DEL DESEMPEÑO TÉRMICO DE INTERCAMBIADORES
DE CALOR UTILIZANDO NANOFUIDOS DE ORO Y PLATA COMO
FLUIDOS DE SERVICIO**

Por

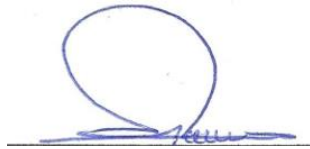
GIOVANNI DÁVILA ZARAGOZA

**Como requisito parcial para obtener el Grado de
MAESTRIA EN CIENCIAS con Orientación en
Procesos Sustentables**

Octubre 2022

**MEJORAMIENTO DEL DESEMPEÑO TÉRMICO DE INTERCAMBIADORES
DE CALOR UTILIZANDO NANOFUIDOS DE ORO Y PLATA COMO
FLUIDOS DE SERVICIO**

Aprobación de la Tesis:



Dr. Eduardo Soto Regalado
Director de Tesis

Dr. José Rubén Morones Ramírez
Codirector de Tesis

Dr. José Ángel Loredo Medrano
Comité Revisor

Dra. Margarita Loredo Cancino
Comité Revisor

Dra. Nancy Elizabeth Dávila Guzmán
Comité Revisor

Dra. María Elena Cantú Cárdenas
Subdirectora de Estudios de Posgrado

RESUMEN

Giovanni Dávila Zaragoza

Fecha de Obtención de Grado:

Universidad Autónoma de Nuevo León

Facultad de Ciencias Químicas

Título del Estudio: MEJORAMIENTO DEL DESEMPEÑO TÉRMICO DE INTERCAMBIADORES DE CALOR UTILIZANDO NANOFLUIDOS DE ORO Y PLATA COMO FLUIDOS DE SERVICIO

Número de páginas: 110

Candidato para el grado de Maestría en Ciencias con Orientación en Procesos Sustentables

Área de Estudio: Procesos Sustentables

Propósito y Método del Estudio: Metales como el oro y la plata cuentan con propiedades termofísicas mejores a la de fluidos de servicio de sistemas de intercambio de calor comunes, como el agua. Sólo la conductividad térmica de estos metales es 3 órdenes de magnitud mayor a la del agua, por lo cual suspender nanopartículas menores a 100 nm de estos metales en agua y utilizarlos como fluido de servicio en sistemas de intercambio de calor mejorará el desempeño térmico de éstos. En este trabajo se determinan las propiedades termofísicas de nanofluidos de oro y plata con concentraciones en volumen de 0% a 5% mediante correlaciones experimentales reportadas y se comparan con algunos datos experimentales al sintetizar nanofluidos de plata con concentraciones de 0.04% a 0.1% en volumen y utilizando estos resultados, mediante simulaciones en Microsoft Excel © se determinó el incremento de efectividad en intercambiadores de calor de doble tubo y de tubos y coraza. Además, se realizan análisis energéticos, exergéticos, económicos y ambientales para mostrar los beneficios de la utilización de estos nanofluidos de oro y plata comparados con el fluido base, el agua.

Contribuciones y Conclusiones: Con un intercambiador de calor de doble tubo se obtuvieron incrementos de efectividad de intercambio de calor de 12% y 8% para los nanofluidos de oro y plata como fluidos de servicio, respectivamente; esto se reflejó en beneficios económicos de 72 y 46 USD y ambientales de 0.72 y 0.51 ton de CO₂ anuales para estos dos nanofluidos. En un intercambiador de calor de tubos y coraza el incremento de efectividad de intercambio de calor fue de 6% y 4% traducidos en beneficios económicos de 54,606 y 35,352 USD y ambientales de 589 y 1381 ton de CO₂ anuales, para los nanofluidos de oro y plata, respectivamente. En todos los sistemas estudiados la eficiencia exergética se vio mejorada al utilizar nanofluidos de oro y plata como fluidos de servicio.

Firma del asesor:



DEDICATORIAS

Dedico este proyecto a mis padres, Juan y Karla, quienes siempre me han apoyado y me han dado todo para cumplir mis objetivos y sueños en el ámbito personal y profesional, imposible lograr concluir esta etapa de mi vida sin su ayuda.

A mi querida novia Frida por nunca dejarme rendirme y siempre estar conmigo en cada nueva meta propuesta.

A mis abuelos, por su aliento para concluir esta etapa de mi vida.

De todo corazón, gracias.

AGRADECIMIENTOS

Agradecer al Dr. Eduardo Soto Regalado, Dr. José Rubén Morones Ramírez y al Dr. José Ángel Loredó Medrano por el apoyo, la asesoría y la atención de llevar por buen camino este proyecto y por su gran disposición para compartir un poco de su experiencia en el proceso.

A mi comité tutorial por las acertadas observaciones a lo largo de la realización del proyecto.

Al Dr. Carlos Enrique Escárcega González por permitirme trabajar en su espacio de laboratorio en CIBYN.

Al Dr. José Julián Cano Gómez por permitirme trabajar en su laboratorio en la Facultad de Ciencias Químicas.

A mis compañeros en CIBYN César, Francisco, Brenda, entre otros que me apoyaron en la realización del proyecto.

A mis amigos que ofrecieron su apoyo en la culminación del trabajo.

Agradecer a la Facultad de Ciencias Químicas, a la Universidad Autónoma de Nuevo León y a CONACYT por contar con espacios adecuados para la realización de mi proyecto y a sus programas de becas que me permitieron completar mis estudios.

TABLA DE CONTENIDO

Capítulo	Página
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	4
2.1 Origen de los Nanofluidos en Aplicaciones de Transferencia de Calor	4
2.2 Modificación de las Propiedades Termofísicas en Nanofluidos	5
2.2.1 Conductividad Térmica del Nanofluido	6
2.2.2 Calor Específico del Nanofluido	8
2.2.3 Densidad del Nanofluido	9
2.2.4 Viscosidad del Nanofluido	10
2.3 Mejoramiento del Desempeño Térmico de Nanofluidos en Sistemas de Transferencia de Calor	11
2.3.1 Intercambiador de Calor de Doble Tubo	12
2.3.2 Intercambiador de Calor de Tubos y Coraza	14
2.3.3 Nanofluidos en Aplicaciones de Sistemas de Intercambio de Calor Varias	16
2.3.4 Nanofluidos de Oro y Plata en Sistemas de Intercambio de Calor	17
2.4 Justificación del Proyecto	19
2.5 Descripción del Proyecto	20
2.6 Marco Teórico	20
2.6.1 Propiedades Termofísicas	20
2.6.2 Análisis de Intercambiadores de Calor	21
3. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS	25
3.1 Hipótesis	25
3.2 Objetivo General	25
3.3 Objetivos Específicos	25
4. MATERIALES Y MÉTODOS	27
4.1 Materiales y Equipos	27
4.1.1 Reactivos	27

4.1.2	Soluciones Preparadas	27
4.1.3	Equipos de Laboratorio	28
4.2	Metodología Experimental.....	29
4.2.1	Síntesis de Nanopartículas de Plata.....	29
4.2.2	Purificación de nanopartículas de plata.....	30
4.2.3	Formulación de nanofluidos de plata	30
4.2.4	Determinación experimental de propiedades termofísicas.....	31
4.3	Metodología de Simulación	32
4.3.1	Determinación Teórica de Propiedades Termofísicas.....	32
4.3.2	Análisis de Intercambiadores de Calor (Simulación en Excel).....	34
4.3.3	Intercambiador de Calor de Doble Tubo.....	34
4.3.3.1	Cálculo del Coeficiente de Transferencia de Calor por Convección en Tubo Interno (h_i)	35
4.3.3.2	Cálculo del Coeficiente de Transferencia de Calor por Convección en Espacio Anular (h_o).....	37
4.3.3.3	Cálculo del Coeficiente Global de Transferencia de Calor (U).....	38
4.3.3.4	Efectividad del Intercambiador de Calor de Doble Tubo	38
4.3.3.5	Cálculo de Potencia de Bombeo del Nanofluido	39
4.3.4	Intercambiador de Calor de Tubos y Coraza.....	40
4.3.4.1	Cálculo del Coeficiente de Transferencia de Calor por Convección en los Tubos (h_t)	41
4.3.4.2	Cálculo del Coeficiente de Transferencia de Calor por Convección en la Coraza (h_o)	42
4.3.4.3	Cálculo del Coeficiente Global de Transferencia de Calor (U).....	44
4.3.4.4	Efectividad del Intercambiador de Calor de Doble Tubo	44
4.3.4.5	Cálculo de Potencia de Bombeo del Nanofluido	45
4.3.5	Análisis Económico de los Sistemas de Intercambio de Calor	45
4.3.6	Análisis Ambiental de Sistemas de Intercambio de Calor	47
4.3.7	Análisis exergético de los Sistemas de Intercambio de Calor.....	47
5.	RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	49
5.1	Caracterizaciones de nanofluidos de plata	49
5.1.1	Microscopía Electrónica de Barrido.....	49

5.1.2 Espectroscopia UV-Visible	51
5.1 Propiedades Termofísicas	52
5.2 Intercambiador de Calor de Doble Tubo	57
5.3 Intercambiador de Calor de Tubos y Coraza	65
5.4 Análisis Económico	79
5.4.1 Intercambiador de Calor de Doble Tubo	79
5.4.2 Intercambiador de Calor de Tubos y Coraza.....	83
5.5 Análisis Ambiental.....	88
5.5.1 Intercambiador de Calor de Doble Tubo.....	88
5.5.2 Intercambiador de Calor de Tubos y Coraza.....	90
5.6 Análisis Exergético	92
5.6.1 Intercambiador de Calor de Doble Tubo.....	93
5.6.2 Intercambiador de Calor de Tubos y Coraza.....	96
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	102
6.1 Propiedades Termofísicas	102
6.2 Intercambiador de Calor de Doble Tubo	103
6.3 Intercambiador de Calor de Tubos y Coraza	104
REFERENCIAS.....	106

LISTA DE TABLAS

Tabla		Página
I.	Propiedades Termofísicas de Materiales Utilizados en Aplicaciones de Nanofluidos.....	21
II.	Equipos de Laboratorio y sus Aplicaciones.....	28
III.	Dimensionamiento del Intercambiador de Calor de Doble Tubo.....	35
IV.	Dimensiones Del Intercambiador de Calor de Tubos y Coraza.....	40

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
1. Proceso de purificación de nanopartículas de plata.....	30
2. Densímetro de tubo vibrante Anton Para DMA 5000.....	31
3. Viscosímetro capilar Cannon Fenske 100.....	32
4. Esquema del intercambiador de calor de doble tubo.....	35
5. Esquema de intercambiador de calor de tubos y coraza y layout cuadrado del acomodo de los tubos dentro del intercambiador de calor.....	40
6. Imágenes de microscopía electrónica de barrido de aglomeraciones de nanopartículas de plata a escala de 100 nm.....	49
7. Distribución de tamaños de nanopartículas de plata.....	50
8. Espectro de absorbancia UV-Vis para nanofluidos de plata a concentraciones en volumen de 0.04% y 0.08%.....	51
9. Propiedades termofísicas de nanofluidos de oro (AuNFs).....	52
10. Propiedades termofísicas de nanofluidos de plata (AgNFs).....	54
11. Densidad experimental y reportada de nanofluidos de plata (AgNFs).....	55
12. Viscosidad experimental y reportada de nanofluidos de plata (AgNFs).....	55
13. Coeficiente global de transferencia de calor (U) en intercambiador de calor de doble tubo utilizando	

nanofluidos de oro como fluido de servicio.....	57
14. Coeficiente global de transferencia de calor (U) en intercambiador de calor de doble tubo utilizando nanofluidos de oro como fluido de servicio con diferentes correlaciones de número de Nusselt.....	58
15. Coeficiente global de transferencia de calor (U) en intercambiador de calor de doble tubo utilizando nanofluidos de plata como fluido de servicio con diferentes correlaciones de número de Nusselt.....	58
16. Coeficiente global de transferencia de calor (U) en intercambiador de calor de doble tubo utilizando nanofluidos de plata como fluido de servicio.....	60
17. Efectividad en intercambiador de calor de doble tubo utilizando nanofluidos de oro como fluido de servicio.....	61
18. Efectividad en intercambiador de calor de doble tubo utilizando nanofluidos de plata como fluido de servicio.....	61
19. Efectividad en intercambiador de calor de doble tubo utilizando nanofluidos como fluido de servicio.....	62
20. Potencia de bombeo necesaria en el tubo interno utilizando nanofluidos de oro como fluido de servicio.....	64
21. Potencia de bombeo necesaria en el tubo interno utilizando nanofluidos de plata como fluido de servicio.....	64
22. Coeficiente global de transferencia de calor (U) en intercambiador de calor de tubos y coraza (1 paso por la coraza y 1 paso por los tubos) utilizando nanofluidos de oro como fluido de servicio.....	65
23. Coeficiente global de transferencia de calor (U) en intercambiador de calor de tubos y coraza (1 paso por la coraza y 1 paso por los tubos) utilizando nanofluidos de plata como fluido de servicio.....	66
24. Coeficiente global de transferencia de calor (U) en intercambiador de calor de tubos y coraza (1 paso por la coraza y 1 paso por los tubos) utilizando nanofluidos de oro como fluido de servicio con diferentes correlaciones de número de Nusselt.....	67

25. Coeficiente global de transferencia de calor (U) en intercambiador de calor de tubos y coraza (1 paso por la coraza y 1 paso por los tubos) utilizando nanofluidos de plata como fluido de servicio con diferentes correlaciones de número de Nusselt.....	67
26. Coeficiente global de transferencia de calor (U) en intercambiador de calor de tubos y coraza (1 paso por la coraza y 2 pasos por los tubos) utilizando nanofluidos de oro como fluido de servicio.....	69
27. Coeficiente global de transferencia de calor (U) en intercambiador de calor de tubos y coraza (1 paso por la coraza y 2 pasos por los tubos) utilizando nanofluidos de plata como fluido de servicio.....	70
28. Coeficiente global de transferencia de calor (U) en intercambiador de calor de tubos y coraza utilizando nanofluidos de plata como fluido de servicio.....	70
29. Coeficiente global de transferencia de calor (U) en intercambiador de calor de tubos y coraza (1 paso por la coraza y 2 pasos por los tubos) utilizando nanofluidos de oro como fluido de servicio con diferentes correlaciones de número de Nusselt.....	71
30. Coeficiente global de transferencia de calor (U) en intercambiador de calor de tubos y coraza (1 paso por la coraza y 2 pasos por los tubos) utilizando nanofluidos de plata como fluido de servicio con diferentes correlaciones de número de Nusselt.....	71
31. Efectividad en intercambiador de calor de tubos y coraza (1 paso por los tubos y 1 paso por la coraza) utilizando nanofluidos de oro como fluido de servicio.....	74
32. Efectividad en intercambiador de calor de tubos y coraza (1 paso por los tubos y 1 paso por la coraza) utilizando nanofluidos de plata como fluido de servicio.....	74
33. Efectividad en intercambiador de calor de tubos y coraza (2 pasos por los tubos y 1 paso por la coraza) utilizando nanofluidos de oro como fluido de servicio.....	75
34. Efectividad en intercambiador de calor de tubos y coraza (2 pasos por los tubos y 1 paso por la coraza) utilizando	

nanofluidos de plata como fluido de servicio.....	76
35. Potencia de bombeo necesaria en los tubos utilizando nanofluidos de oro como fluido de servicio en un intercambiador de calor de tubos y coraza (1 paso por los tubos y 1 paso por la coraza).....	77
36. Potencia de bombeo necesaria en los tubos utilizando nanofluidos de plata como fluido de servicio en un intercambiador de calor de tubos y coraza (1 paso por los tubos y 1 paso por la coraza).....	77
37. Potencia de bombeo necesaria en los tubos utilizando nanofluidos de oro como fluido de servicio en un intercambiador de calor de tubos y coraza (2 pasos por los tubos y 1 paso por la coraza).....	78
38. Potencia de bombeo necesaria en los tubos utilizando nanofluidos de plata como fluido de servicio en un intercambiador de calor de tubos y coraza (2 pasos por los tubos y 1 paso por la coraza).....	78
39. Beneficio energético logrado al utilizar nanofluidos de oro como fluido de servicio en un intercambiador de calor de doble tubo.....	80
40. Beneficio energético logrado al utilizar nanofluidos de plata como fluido de servicio en un intercambiador de calor de doble tubo.....	80
41. Beneficio económico logrado al utilizar nanofluidos de oro como fluido de servicio en un intercambiador de calor de doble tubo.....	81
42. Beneficio económico logrado al utilizar nanofluidos de plata como fluido de servicio en un intercambiador de calor de doble tubo.....	82
43. Beneficio económico logrado al utilizar nanofluidos como fluido de servicio en un intercambiador de calor de doble tubo.....	82
44. Beneficio energético logrado al utilizar nanofluidos de oro como fluido de servicio en un intercambiador de calor de tubo y coraza (1 paso por los tubos y 1 paso por la coraza).....	83

45. Beneficio energético logrado al utilizar nanofluidos de plata como fluido de servicio en un intercambiador de calor de tubo y coraza (1 paso por los tubos y 1 paso por la coraza).....	83
46. Beneficio económico logrado al utilizar nanofluidos de oro como fluido de servicio en un intercambiador de calor de tubo y coraza (1 paso por los tubos y 1 paso por la coraza).....	84
47. Beneficio económico logrado al utilizar nanofluidos de plata como fluido de servicio en un intercambiador de calor de tubo y coraza (1 paso por los tubos y 1 paso por la coraza).....	85
48. Beneficio energético logrado al utilizar nanofluidos de oro como fluido de servicio en un intercambiador de calor de tubo y coraza (2 pasos por los tubos y 1 paso por la coraza).....	86
49. Beneficio energético logrado al utilizar nanofluidos de plata como fluido de servicio en un intercambiador de calor de tubo y coraza (2 pasos por los tubos y 1 paso por la coraza).....	86
50. Beneficio económico logrado al utilizar nanofluidos de oro como fluido de servicio en un intercambiador de calor de tubo y coraza (2 pasos por los tubos y 1 paso por la coraza).....	87
51. Beneficio económico logrado al utilizar nanofluidos de plata como fluido de servicio en un intercambiador de calor de tubo y coraza (2 pasos por los tubos y 1 paso por la coraza).....	87
52. Beneficio ambiental logrado al utilizar nanofluidos de oro como fluido de servicio en un intercambiador de calor de doble tubo.....	88
53. Beneficio ambiental logrado al utilizar nanofluidos de plata como fluido de servicio en un intercambiador de calor de doble tubo.....	89
54. Beneficio ambiental logrado al utilizar nanofluidos de oro como fluido de servicio en un intercambiador de calor de tubos y coraza (1 paso por los tubos y 1 paso por la coraza).....	90
55. Beneficio ambiental logrado al utilizar nanofluidos de plata como fluido de servicio en un intercambiador de calor de tubos y coraza (1 paso por los tubos y 1 paso por la coraza).....	90
56. Beneficio ambiental logrado al utilizar nanofluidos de oro como fluido de servicio en un intercambiador	

de calor de tubos y coraza (2 pasos por los tubos y 1 paso por la coraza).....	92
57. Beneficio ambiental logrado al utilizar nanofluidos de plata como fluido de servicio en un intercambiador de calor de tubos y coraza (2 pasos por los tubos y 1 paso por la coraza).....	92
58. Exergía destruida al utilizar nanofluidos de oro como fluido de servicio en un intercambiador de calor de doble tubo.....	93
59. Exergía destruida al utilizar nanofluidos de oro como fluido de servicio en un intercambiador de calor de doble tubo.....	93
60. Eficiencia exergética en un intercambiador de calor de doble tubo al utilizar nanofluidos de oro como fluido de servicio.....	95
61. Eficiencia exergética en un intercambiador de calor de doble tubo al utilizar nanofluidos de plata como fluido de servicio.....	95
62. Exergía destruida al utilizar nanofluidos de oro como fluido de servicio en un intercambiador de calor de tubos y coraza (1 paso por los tubos y 1 paso por la coraza).....	96
63. Exergía destruida al utilizar nanofluidos de oro como fluido de servicio en un intercambiador de calor de tubos y coraza (1 paso por los tubos y 1 paso por la coraza).....	96
64. Eficiencia exergética en un intercambiador de calor de tubos y coraza (1 paso por los tubos y 1 paso por la coraza) al utilizar nanofluidos de oro como fluido de servicio.....	98
65. Eficiencia exergética en un intercambiador de calor de tubos y coraza (1 paso por los tubos y 1 paso por la coraza) al utilizar nanofluidos de plata como fluido de servicio.....	98
66. Exergía destruida al utilizar nanofluidos de oro como fluido de servicio en un intercambiador de calor de tubos y coraza (2 pasos por los tubos y 1 paso por la coraza).....	99
67. Exergía destruida al utilizar nanofluidos de oro como fluido de servicio en un intercambiador	

de calor de tubos y coraza (2 pasos por los tubos y 1 paso por la coraza).....	99
68. Eficiencia exergética en un intercambiador de calor de tubos y coraza (2 pasos por los tubos y 1 paso por la coraza) al utilizar nanofluidos de oro como fluido de servicio.....	100
69. Eficiencia exergética en un intercambiador de calor de tubos y coraza (2 pasos por los tubos y 1 paso por la coraza) al utilizar nanofluidos de plata como fluido de servicio.....	100

NOMENCLATURA

φ	Fracción volumétrica
$^{\circ}\text{C}$	Grados Celsius
nm	Nanómetros
μm	Micrómetros
Au	Oro
Ag	Plata
U	Coefficiente global de transferencia de calor
κ	Conductividad térmica
K	Grados kelvin
Cp	Calor específico
ρ	Densidad
μ	Viscosidad
NTU	Numero de unidades de transferencia
kWh	Kilowattthora
mM	Milimolar
mL	Mililitro

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

El avance de los desarrollos tecnológicos en áreas como electrónica, comunicación, sistemas de calentamiento o enfriamiento en edificios, entre otras, traen consigo la necesidad de que este desarrollo sea acompañado con tecnología más eficiente de intercambio de calor, para reducir costos y espacios.(Ali et al., 2018)(Das et al., 2007) Asimismo en el mundo tenemos el reto de disminuir los efectos del uso de los gases de efecto invernadero en la problemática del cambio climático y limitar el incremento de temperatura a 2°C, por lo cual se buscan desarrollar soluciones que permitan eficientizar operaciones unitarias como la transferencia de calor.(Vallejo et al., 2022)

Intentos en éstas y otras aplicaciones se han basado en modificación de patrones de flujo, la geometría de los equipos de intercambio de calor e incluso en diseños innovadores como los microcanales(Das et al., 2007)(Nazarzade et al., 2019); sin embargo, todos estos nuevos diseños están restringidos por las pobres propiedades termofísicas del fluido de servicio(Cengel & Ghajar, 2011) que típicamente es el agua, la cual tiene una conductividad térmica de tres órdenes de magnitud menor al de metales como cobre, oro y plata.(Das et al., 2007)

En la búsqueda de fluidos que presenten propiedades termofísicas mejores a la de los fluidos de servicio convencionales, Choi, en 1995, desarrolló una nueva clase de fluidos a los que llamó “nanofluidos”, los cuales consisten en la suspensión de partículas de origen metálico, con tamaños promedio no mayores a 100 nm.(Choi & Eastman, 1995) Estas nanopartículas son disueltas en un fluido base como etilenglicol o agua y permiten mejorar las propiedades termofísicas relacionadas al fenómeno de transferencia de calor comparadas con el fluido base.(Ma et al., 2021)

Utilizar estos nanofluidos permite mejorar la efectividad en procesos de intercambio de calor basado en mejorar propiedades termofísicas, tales como la conductividad térmica, el calor específico, la densidad y la viscosidad comparadas con las propiedades del fluido base.(Awais et al., 2021; Xuan & Li, 2000)El valor de estas propiedades termofísicas está en función de la concentración de las nanopartículas en el fluido base y el material de éstas.(Said et al., 2022)

La mejora de la efectividad en la transferencia de calor permite una disminución en el uso de energías convencionales, como la electricidad, lo cual resulta en ahorros económicos al disminuir la cantidad de electricidad necesaria para cumplir con una demanda de la operación unitaria, además impacta directamente en el aspecto ambiental, el uso de menor energía eléctrica disminuye las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a su producción. Debido al tamaño de las nanopartículas, al momento de la aplicación, estos fluidos no generan atascos ni erosión en las tuberías.(Das et al., 2007)

Dentro de las áreas de oportunidad del uso de nanofluidos en aplicaciones de transferencia de calor está la alteración de las propiedades termofísicas de éstos debido a la sedimentación o aglomeración de las nanopartículas en el fluido base(Awais et al.,

2021), que además lleva a una potencial restricción para el uso de nanofluidos en aplicaciones de transferencia de calor, que es la caída de presión que éstos pueden provocar en el intercambiador de calor(Cox et al., 2013), lo cual redundaría en un incremento de potencia de bombeo, a pesar de esto, autores como Maré et al., han demostrado que es posible que el incremento de la conductividad térmica supere el efecto la elevada caída de presión.(Maré et al., 2011)

Por lo tanto, en el siguiente proyecto se busca evaluar el incremento del coeficiente global de transferencia de calor y la efectividad en intercambiadores de calor utilizando nanofluidos de oro y plata, debido a su alta conductividad térmica(Cengel & Ghajar, 2011), además se evalúa el impacto económico y ambiental que la mejora de estos sistemas de intercambio de calor trae consigo.

CAPÍTULO 2

ANTECEDENTES

2.1 Origen de los Nanofluidos en Aplicaciones de Transferencia de Calor

Debido a la limitación que acarrea contar con una baja conductividad térmica en los fluidos de servicio en sistemas de intercambio de calor se propone una clase innovadora de fluidos suspendiendo nanopartículas en este fluido base que permite contar con una conductividad térmica mayor, teniendo mejores desempeños en aplicaciones de transferencia de calor.(Choi & Eastman, 1995)

La conductividad térmica de la suspensión, ahora llamada nanofluido, se ve incrementada con la fracción volumétrica de nanopartículas y con la relación área superficial /volumen, debido a que el fenómeno de transferencia de calor sucede justamente en la superficie de estas nanopartículas añadidas al fluido base.(Choi & Eastman, 1995)

Para la formación de estos nanofluidos se han utilizado una amplia variedad de nanopartículas con características particulares(Okonkwo et al., 2021):

- Nanopartículas de carbono (grafito, diamante, nanotubos de carbono)(Okonkwo et al., 2021)

- Nanopartículas metálicas (oro, plata, cobre)(Okonkwo et al., 2021)
- Nanopartículas de óxidos metálicos unielementales y multielementales (CuO, Al₂O₃, TiO₂)(Ali et al., 2018; Okonkwo et al., 2021)
- Nanopartículas de nitruros metálicos (SiN, TiN, AlN).(Ali et al., 2018)

Desde los análisis de Choi en 1995(Choi & Eastman, 1995), el estudio del efecto de los nanofluidos con nanopartículas metálicas ha ido creciendo, buscando las condiciones adecuadas en las cuales los nanofluidos incrementen significativamente sus propiedades de transferencia de calor para que puedan ser usados en aplicaciones que logren disminuir el tamaño y los costos de las operaciones de transferencia de calor.

Además de incrementar la conductividad térmica del nanofluido, la adición de nanopartículas a un fluido base modifica otras propiedades termofísicas importantes para el estudio de un sistema de transferencia de calor, como la densidad, viscosidad y calor específico.

Cuantitativamente, los efectos en las propiedades termofísicas de los nanofluidos en aplicaciones de transferencia de calor están condicionados por la concentración de nanopartículas en el fluido base, el tamaño y forma de las nanopartículas, el material de las nanopartículas, el fluido base, la presencia de aditivos y el pH.(Timofeeva et al., 2011)(Ali et al., 2018)

2.2 Modificación de las Propiedades Termofísicas en Nanofluidos

El comportamiento termofísico del nanofluido influye directamente en el desempeño térmico de éste en sistemas de intercambio de calor, propiedades como

conductividad térmica, calor específico, densidad y viscosidad se ven modificadas por la adición de nanopartículas comparadas a las propiedades del fluido base.(Hajatzadeh Pordanjani et al., 2019)

2.2.1 Conductividad Térmica del Nanofluido

El incremento de la conductividad térmica del nanofluido al adicionar nanopartículas de materiales con conductividad térmica mayor al del fluido base es una de las claves al utilizar estos nanofluidos en sistemas de intercambio de calor. Existen diversos estudios teóricos y experimentales donde se demuestra el incremento de esta propiedad termofísica con los diferentes tipos de nanopartículas utilizadas en estas aplicaciones.(Ali et al., 2018)

Hwang y colaboradores hicieron uso del método experimental del hilo caliente en modo transitorio para determinar la conductividad térmica de fluidos demostraron el incremento de esta propiedad termofísica en varios pares de sistemas nanopartícula-fluido base. Utilizando agua como fluido base y con una concentración de nanopartículas de 1% en volumen de CuO, SiO₂ y nanotubos de carbono de multicapa se mostró incrementos en la conductividad térmica del 5%, 3% y 7% respectivamente, mientras que utilizando etilenglicol como fluido base probaron nanopartículas de CuO al 1% en volumen y nanotubos de carbono de multicapa al 0.5% en volumen mostrando incrementos de hasta 9% en la conductividad térmica comparado con el fluido base, etilenglicol en este caso.(Hwang et al., 2006)

Utilizando un sistema de nanofluido híbrido de ZnO-Ag (50%-50%) con agua como fluido base, Esfahani, et. al., demostró que la conductividad térmica del nanofluido

se vio incrementada hasta en un 28% a la mayor concentración de nanopartículas estudiada, 2% en volumen.(Esfahani et al., 2017)

Otro sistema de nanofluido híbrido estudiado es el realizado por Moldoveanu y colaboradores, donde se estudió primero el efecto por separado de un nanofluido por Al_2O_3 (diámetro de 43 nm), otro con nanopartículas de TiO_2 (diámetro de 30 nm) y después el nanofluido híbrido con estos dos grupos de nanopartículas; se estudiaron concentraciones en volumen de 1% a 3%. Para el nanofluido con Al_2O_3 el incremento de la conductividad térmica fue de entre 8.5% y 17.7% en el rango estudiado, para el nanofluido con TiO_2 fue de 10.7% a 14.1% y para el híbrido fue de 15.3% a 19.2% debido al efecto en conjunto de ambos grupos de nanopartículas, comparados con el fluido base, agua en este caso.(Moldoveanu et al., 2019)

Pasando a los nanofluidos con nanopartículas metálicas, Kang y su equipo de trabajo utilizando nanopartículas de plata de entre 8 y 15 nm de diámetro con concentraciones en volumen de entre 0.10% y 0.39% usando agua como fluido base, exhibieron un incremento en la conductividad térmica de entre 3% y 11% en el rango estudiado comparado con el fluido base.(Kang et al., 2006)

Paul y colaboradores trabajaron con nanofluidos de oro con nanopartículas esféricas con diámetros promedio de 21 nm en base agua, determinando experimentalmente el incremento de conductividad térmica que alcanzó un máximo, a una concentración de 0.00026% volumen, del 48% comparado con el fluido base.(Paul et al., 2010)

2.2.2 Calor Específico del Nanofluido

La tasa de intercambio de calor en un nanofluido es altamente influenciada por la modificación del calor específico de éste en relación con la adición de las nanopartículas. El calor específico es la cantidad de calor necesaria que habría que suministrar al nanofluido para incrementar su temperatura en 1 °C, un gramo de éste.(Ali et al., 2018)

En el sistema de nanofluido realizado por Moldoveanu y colaboradores, donde se estudió el efecto de un nanofluido por Al_2O_3 (diámetro de 45 nm), otro con nanopartículas de TiO_2 (diámetro de 30 nm) y otro con nanopartículas de SiO_2 (diámetro de 20 nm); se estudiaron concentraciones en volumen de 1% a 3%, también se determina la modificación del calor específico para estos nanofluidos al adicionar nanopartículas. Para el nanofluido con Al_2O_3 el decremento del calor específico fue de entre 2% y 8% en el rango estudiado, para el nanofluido con SiO_2 fue de 1% a 6% y para el de TiO_2 fue de 18% hasta 42%, comparados con el fluido base, agua en este caso.(Moldoveanu & Minea, 2019)

Selvam y colaboradores trabajaron con un nanofluido de plata, teniendo como fluido base una mezcla de agua-etilenglicol, 70% y 30% volumen respectivamente. Las concentraciones volumétricas de nanopartículas fueron 0.05%, 0.1% y 0.15%, con las cuales se determinó la modificación de la propiedad termofísica del calor específico al añadir las nanopartículas de plata al fluido base y a temperaturas entre 30°C y 70°C. El calor específico decrementa conforme aumenta la concentración de nanopartículas, pero incrementa con la temperatura. El mayor decremento de calor específico respecto al fluido base se observó al 0.15% en volumen a 40°C siendo 6.95% menor.(Selvam et al., 2016)

Utilizando también nanopartículas metálicas, en este caso de oro, con un diámetro promedio de 8.8 nm disueltas en agua como fluido base a una concentración de 3×10^{-4} en volumen, Heo y colaboradores reportaron una disminución del calor específico del 10% del nanofluido de oro comparado con el fluido base.(Kang Heo et al., 2014)

2.2.3 Densidad del Nanofluido

Dentro del desempeño térmico de los nanofluidos, su densidad es una propiedad termofísica vital, debido a que influye directamente en los fenómenos de flujo del nanofluido, específicamente en el número de Reynolds, número de Nusselt, factor de fricción e indirectamente en la caída de presión y potencia de bombeo asociada, además de tener influencia en el número de Nusselt.(Gupta et al., 2017)

Said y colaboradores estudiaron el efecto que tiene la adición de nanopartículas de Al_2O_3 y TiO_2 tienen en la densidad del nanofluido en base agua. Utilizaron concentraciones en volumen de entre 0.05% hasta 4% para ambos grupos de nanopartículas, obteniendo como resultado que incrementar la concentración de nanopartículas incrementa la densidad del nanofluido siendo 11% y 12.5% mayor comparado con el fluido base para los nanofluidos formados por nanopartículas de Al_2O_3 y TiO_2 , respectivamente.(Said et al., 2013)

En el trabajo de Selvam y colaboradores donde con un nanofluido de plata, teniendo como fluido base una mezcla de agua-etilenglicol, 70% y 30% volumen respectivamente con concentraciones volumétricas de nanopartículas fueron 0.05%, 0.1% y 0.15%, también se determinó el incremento de la densidad al añadir las nanopartículas de plata al fluido base y a temperaturas entre 30°C y 70°C. El mayor incremento de

densidad respecto al fluido base se observó a los 70°C en el nanofluido con concentración volumen de 0.15%, el incremento resultó de 2.16%.(Selvam et al., 2016)

Estudios determinando experimentalmente la densidad de un nanofluido de oro base agua son escasos en la literatura, sin embargo, Puliti y su equipo de trabajo utilizaron dinámica molecular para estimar los resultados de esta propiedad termofísica para nanofluidos de oro con concentraciones en volumen de 1%, 10% y 15% obteniendo un incremento de la densidad con respecto al fluido base de 28%, 196% y 304%, respectivamente.(Puliti et al., 2012)

2.2.4 Viscosidad del Nanofluido

Al igual que la densidad, conocer la viscosidad del nanofluido permite entender mejor el desempeño térmico y reológico del nanofluido en sistemas de intercambio de calor.(Okonkwo et al., 2021) La viscosidad al ser expresada como la tendencia que tendrá el nanofluido a resistirse al flujo trae en consecuencia que existan mayores caídas de presión en los sistemas y se requiera una mayor potencia de bombeo, contrarrestando algunos de los beneficios de la utilización de nanofluidos para mejorar el desempeño térmico de los fluidos de servicio en intercambiadores de calor.(Ali et al., 2018)

En el sistema de nanofluido realizado por Moldoveanu y colaboradores, se estudió el efecto de un nanofluido por Al_2O_3 (diámetro de 43 nm) y otro con nanopartículas de TiO_2 (diámetro de 30 nm); se estudiaron concentraciones en volumen de 1% a 5% y 1% a 3%, respectivamente, también se determina el incremento de la viscosidad para estos nanofluidos al adicionar nanopartículas. Para el nanofluido con Al_2O_3 el incremento máximo de la viscosidad fue de 903% y para el de TiO_2 fue de hasta 161% ambos para la

mayor concentración estudiada, comparados con el fluido base, agua en este caso.(Moldoveanu et al., 2018)

En el trabajo de Selvam y colaboradores donde con un nanofluido de plata, teniendo como fluido base una mezcla de agua-etilenglicol, 70% y 30% volumen respectivamente con concentraciones volumétricas de nanopartículas fueron 0.05%, 0.1% y 0.15%, también se determinó el incremento de la viscosidad al añadir las nanopartículas de plata al fluido base y a temperaturas entre 30°C y 70°C. El mayor incremento de densidad respecto al fluido base se observó a los 50°C en el nanofluido con concentración volumen de 0.15%, el incremento resultó de 22.7%.(Selvam et al., 2016)

Similar al caso de densidad, existen pocos estudios analizando la viscosidad de suspensiones como nanofluidos de oro, por lo cual Lu y colaboradores haciendo uso de simulaciones de dinámica molecular determinaron la viscosidad de nanofluidos de oro base agua con concentraciones volumen de 3.43% y 6.77%, donde obtuvieron como resultados el incremento de la viscosidad en un 15% y 28% respectivamente, en comparación con el fluido base.(Lu et al., 2014)

2.3 Mejoramiento del Desempeño Térmico de Nanofluidos en Sistemas de Transferencia de Calor

La mejora en las propiedades termofísicas del nanofluido, como la conductividad térmica, el calor específico, la densidad y la viscosidad permitirían establecer una mejora en los coeficientes de transferencia de calor de estos nanofluidos en operación en sistemas de intercambio de calor(Yu et al., 2008), por lo cual resulta de suma importancia probar el desempeño térmico de estos nanofluidos en condiciones de flujo como

intercambiadores de calor donde se puedan comprobar parámetros térmicos de mejora respecto al fluido base.

Los intercambiadores de calor son parte crucial en diversos procesos industriales, así como en aplicaciones electrónicas y de otro tipo de industrias, por lo cual incrementar la eficiencia de estos sistemas buscando disminuir su consumo energético es una tarea de suma importancia. Han existido intentos por buscar eficientizar las operaciones de transferencia de calor basadas en modificaciones del régimen de flujo, modificaciones geométricas buscando acrecentar el área disponible para el intercambio de calor, sin embargo, quedan restringidas por las propiedades termofísicas del fluido de servicio usado. Esta eficiencia puede ser incrementada haciendo uso de estos nanofluidos con propiedades termofísicas mejoradas en estos sistemas de intercambio de calor. (Ali et al., 2018; Hajatzadeh Pordanjani et al., 2019; Yu et al., 2008)

Existen diversos tipos de intercambiadores de calor y se muestran los antecedentes de dos de los más comunes utilizados en procesos químicos.

2.3.1 Intercambiador de Calor de Doble Tubo

Subramanian y colaboradores utilizaron un intercambiador de doble tubo a contracorriente para probar el mejoramiento del desempeño térmico de un nanofluido de TiO_2 en el sistema agua-nanofluido. El nanofluido de TiO_2 fue conformado por nanopartículas de tamaño promedio de 20 nm a concentraciones en volumen de 0.1%, 0.3% y 0.5%; el intercambiador de calor de doble tubo es de cobre y además se modificó el régimen de flujo entre laminar, en transición y turbulento de nanofluido para observar el efecto en el desempeño térmico de éste. La tasa de transferencia de calor se vio

incrementada 5.4%, 14% y hasta en un 25% para los nanofluidos con concentraciones en volumen de 0.1%, 0.3% y 0.5% respectivamente; además la mayor tasa de transferencia de calor se observó con el nanofluido a la mayor concentración en régimen turbulento. La caída de presión fue estudiada para cada uno de los regímenes trabajados, para el flujo laminar la caída de presión fue de 26%, 35% y 56% mayor comparado con el fluido base para las concentraciones en volumen de 0.1%, 0.3% y 0.5% respectivamente, con estas mismas concentraciones para el flujo en transición el incremento en la caída de presión fue de 34%, 40% y 60% mientras que en régimen turbulento fue de 37%, 42% y 62%.(Subramanian et al., 2020)

En un mismo sistema de intercambiador de calor de doble tubo, Moradi y colaboradores trabajaron con nanopartículas de nanotubos de carbono multicapa a diversas concentraciones máxicas, de 0.04%, 0.17% y 0.25%, estos nanofluidos cuentan como fluido base el agua. Estudiando el comportamiento del coeficiente global de transferencia de calor a diversos flujos volumétricos y a las diversas concentraciones de nanopartículas se obtuvo que este coeficiente incrementa conforme incrementa el flujo volumétrico del nanofluido y además se obtuvo un incremento máximo del 40% para la concentración máxica de 0.25% comparado con el fluido base.(Moradi et al., 2019)

El desempeño térmico de nanopartículas de SiO₂ cubiertas con plata con tamaño promedio de 50nm fue determinado por Mehta y su equipo de trabajo, formulando nanofluidos base agua con concentraciones en volumen de 0.025% a 0.075% en un intercambiador de calor horizontal de doble tubo a contraflujo. Debido al mejoramiento de las propiedades termofísicas el coeficiente global de transferencia de calor se vio incrementado entre un 7% y 50% en el rango estudiado comparado con el fluido base,

además se comprobó que aumentar la fracción volumétrica de nanopartículas en el nanofluido incrementa la caída de presión en el sistema.(Mehta et al., 2019)

Utilizando como fluido base etilenglicol y agua (50:50 en volumen) y nanopartículas de plata de tamaños entre 50 y 60 nm formando nanofluidos con concentraciones en volumen de 0.1%, 0.5% y 1%, Sarafraz y Hormozi estudiaron el desempeño térmico de estos nanofluidos. Demostraron que el coeficiente de transferencia de calor por convección es favorecido por el incremento de concentración de nanopartículas, para las concentraciones en volumen de 0.1%, 0.5% y 1% el incremento en el coeficiente fue 22%, 36% y 67%, respectivamente. Para la concentración mayor en volumen de 1% se incrementó el factor de fricción en un 11.3%, en referencia al fluido base, lo que indica un castigo en el aumento de caída de presión en el sistema.(Sarafraz & Hormozi, 2015)

2.3.2 Intercambiador de Calor de Tubos y Coraza

Los intercambiadores de calor de tubo y coraza permiten obtener mayores superficies de contacto para permitir la transferencia de calor debido a su estructura que consiste en una coraza y dentro de ella grupos de tubos internos.(Okonkwo et al., 2021)

Para analizar el desempeño térmico de nanofluidos base agua con nanotubos de carbono de concentraciones en volumen 0.0055%, 0.055%, 0.111% y 0.278%, éstos fueron usados para refrigerar el residuo líquido del craqueo catalítico de gasolina en un intercambiador de calor de tubos y coraza por Hosseini y colaboradores. Se obtuvieron como resultados incrementos en el número de Nusselt del 30%, 32%, 20% y 2.3%

respectivamente para las concentraciones en volumen trabajadas, claramente mostrando un máximo para la concentración en volumen de 0.055%. (Masoud Hosseini et al., 2019)

Permanasari y otros estudiaron las características convectivas de transferencia de calor de un nanofluido de TiO_2 con etilenglicol como fluido base, las nanopartículas de TiO_2 tenían un tamaño promedio de 21nm y se estudiaron concentraciones en volumen de 0.025%, 0.05%, 0.075% en un intercambiador de tubos y coraza. Se concluyó que el mayor flujo volumétrico estudiado y la concentración de volumen de 0.075% dio la tasa más alta de transferencia de calor que fue de 0.0277 J. (Permanasari et al., 2019)

Cox, et.al., utilizando nanopartículas de 20 nm de SiO_2 lograron que en su sistema de intercambiador de calor de tubos y coraza el incremento del coeficiente global de transferencia de calor alcance hasta el 9% comparado con el fluido base con una fracción en volumen de nanopartículas del 4%. (Cox et al., 2013)

Incluso optando por buscar nanofluidos híbridos en estos sistemas de intercambio de calor, con nanopartículas de $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Ag}$ y $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Cu}$ que a 1% de concentración en volumen, Singh y Sarkar reportan incrementos de 3.2% y 3.1% del coeficiente global de transferencia de calor. (Singh & Sarkar, 2018)

Ullah y colaboradores en un sistema de intercambiador de calor de tubo y coraza demostraron el mejoramiento del desempeño térmico de nanofluidos base agua de Al_2O_3 (25nm) y TiO_2 (10nm). En ambos casos las concentraciones volumen fueron de 0.3%, 0.5, 0.75%. El coeficiente de transferencia de calor por convección para el nanofluido de TiO_2 se vio incrementado en 27.27%, 37.5%, y 34.09% respectivamente para cada una de las concentraciones en volumen estudiadas comparadas con el agua, mientras que para el

nanofluido de Al_2O_3 el incremento en el coeficiente fue de 28.1%, 35.82% y 41.79%.(Ullah et al., 2019)

En este mismo sistema Godson utilizó nanofluidos de plata base agua para determinar sus características de transferencia de calor. En este estudio se utilizaron nanopartículas de tamaño promedio de 54 nm y concentraciones en volumen de 0.01%,0.03% y 0.04%. El incremento en el coeficiente de transferencia de calor por convección fue de 9.2%,10.87% y 12.4% para las concentraciones trabajadas, además la caída de presión se vio aumentada en un 12.84%, 11.15% y 16.22% respectivamente para las concentraciones trabajadas comparados con el fluido base.(Godson et al., 2013)

2.3.3 Nanofluidos en Aplicaciones de Sistemas de Intercambio de Calor Varias

Debido a su bajo costo y a su alto calor específico, gran parte de los desarrollos con nanofluidos tienen como fluido base el agua, la variante es el material de las nanopartículas que dará esas propiedades únicas al nanofluido.

Maré, et.al., utilizando nanopartículas de Al_2O_3 con tamaño promedio de 37 nm y nanotubos de carbono de 9-10 nm de diámetro con 2 μm de longitud lograron un incremento del coeficiente de transferencia de calor por convección del 42% y 50% respectivamente en un intercambiador de calor de platos.(Maré et al., 2011)

Igualmente utilizando nanopartículas de Al_2O_3 , Kayabasi y colaboradores en un intercambiador de calor de platos formularon un nanofluido base agua con concentración en masa de 1% y 0.5%. El incremento del coeficiente global de transferencia de calor comparado con el fluido base fue de 18.2% y 11.1% para las concentraciones trabajadas, respectivamente; además se determinó un incremento en el factor de fricción de 15.3% y

25.2%, respectivamente indicación del incremento en caída de presión que la utilización de nanofluidos acarrea.(Kayabaşı et al., 2019)

En un intercambiador de calor enrollado helicoidalmente, Palanisamy y Kumar desarrollaron nanofluidos base agua de nanotubos de carbono multicapa a concentraciones en volumen de 0.1%, 0.3% y 0.5% y los utilizaron para estudiar el mejoramiento del desempeño térmico en este sistema de intercambio de calor. El incremento del número de Nusselt comparado con el fluido base fue de 28%, 52% y 68%, sin embargo, también exhibió un aumento en la caída de presión de 16%, 30% y 42% respectivamente para cada una de las concentraciones estudiadas.(Palanisamy & Mukesh Kumar, 2019)

2.3.4 Nanofluidos de Oro y Plata en Sistemas de Intercambio de Calor

Algunos autores además han utilizado los sistemas Au-Agua y Ag-Agua, debido al potencial que tienen estos metales de favorecer la transferencia de calor.

Heydari, et. al. Reportan, utilizando simulaciones de *Computational Fluid Dynamics* (CFD) de un intercambiador de calor de tubos y coraza que utilizando un nanofluido Au-Agua con nanopartículas dispersas de tamaño promedio de 25 nm a un flujo másico constante, los coeficientes global y convectivo de transferencia de calor disminuyen conforme se incrementa la fracción en volumen de nanopartículas en el agua, este efecto es atribuido al incremento de la viscosidad del fluido(Heydari et al., 2017); mientras que Sabir, et. al. reportaron que, bajo las condiciones de su experimentación con una tubería aislada térmicamente, lograron un incremento del 23% en el coeficiente global de transferencia de calor comparado con el agua el fluido base, además de que el incremento de la concentración de nanopartículas de oro en el agua favorecía al coeficiente

global de transferencia de calor, debido al incremento de la conductividad térmica del nanofluido.(Sabir et al., 2015) También, se ha buscado la aplicación de los nanofluidos oro-agua en la captación de energía solar, específicamente en los tubos de vacío buscando cambiar el fluido ya utilizado siendo el agua desionizada e intentar promover el uso de este nanofluido. Tsai, et.al., reportan que utilizando nanopartículas de oro con tamaño promedio de 24 nm suspendidas en agua se logró una disminución de la resistencia térmica de hasta el 37% comparado con el agua desionizada.(Tsai et al., 2004)

Para el sistema del nanofluido Ag-Agua la tendencia no es muy diferente, ya que, utilizando nanopartículas de plata de tamaño promedio de 54 nm dispersas en agua, Godson, et. al. obtuvieron incrementos del coeficiente global de transferencia de calor de hasta 12% con un 0.04% en volumen de nanopartículas de plata en el agua, además mostrando la tendencia del incremento del coeficiente global de transferencia de calor conforme se incrementa la concentración del nanofluido en un sistema de intercambiador de calor de tubos y coraza(Godson et al., 2013), Iyahraja, et.al., utilizaron nanopartículas de plata de tamaño promedio de 20 nm en base agua reportaron que el coeficiente de transferencia de calor por convección en el lado del nanofluido en una tubería horizontal se incrementó hasta en un 36.1% utilizando la mayor concentración de nanopartículas en su experimentación, la cual fue de 1% en volumen(Iyahraja et al., 2019); sin embargo, Nazarzade, et. al. utilizando nanopartículas de plata de tamaño promedio de 46 nm reportaron que bajo ciertas condiciones el incremento de concentración del nanofluido favorece al coeficiente global de transferencia de calor (U), pero alcanza un máximo en un cierto punto, a partir de éste, el aumento de la concentración desfavorece la transferencia de calor debido a efectos de la viscosidad y fenómenos de flujo en un

intercambiador de calor de tubos y coraza.(Nazarzade et al., 2019) Pourhoseini, et.al., también indican el hecho de que exista un punto máximo de concentración de nanopartículas las cuales favorecen la conductividad térmica, justo antes de comenzar a disminuirla. En el estudio se indica que a una concentración de 2.5 mg/L se alcanza un punto máximo donde la conductividad es hasta 36% mayor que la del agua y a partir de ahí disminuye, este efecto se atribuyó a la agregación de las nanopartículas.(Pourhoseini et al., 2018)

Estos resultados reportados ofrecen un área de oportunidad grande para probar diferentes condiciones de operación de estos nanofluidos de oro y plata buscando su utilización en operaciones de transferencia de calor para promover su aplicación en las cada vez más nuevas y desafiantes tecnologías.

2.4 Justificación del Proyecto

El incremento de desarrollos tecnológicos y la búsqueda de incrementar la eficiencia en procesos químicos ha llevado a buscar incrementar las eficiencias y efectividades en las operaciones y equipos de transferencia de calor. Intentos por lograr esto se han realizado basados en modificar patrones y regímenes de flujo utilizando los mismos equipos de transferencia de calor ya conocidos e incluso haciendo modificaciones en la geometría de estos sistemas, sin embargo, todos quedando restringidos por las propiedades termofísicas de los fluidos de servicio y siendo éste un aspecto importante a mejorar en los sistemas de intercambio de calor.

En este trabajo se propone utilizar un fluido de servicio en sistemas de intercambio de calor con propiedades termofísicas mejoradas comparadas con un fluido de servicio

típico, como el agua. Esto permite tener una mayor efectividad en estos sistemas. Para lograr esto se toma como fluido base el agua y se suspenden nanopartículas de metales como oro y plata, dos metales con propiedades térmicas hasta 3 órdenes de magnitud mayores a las del agua, y se prueban teórica y experimentalmente en intercambiadores de calor para probar su mejoramiento en el desempeño térmico comparado con el fluido base y además permite observar el beneficio energético, económico y ambiental al utilizar estos nanofluidos.

2.5 Descripción del Proyecto

En este proyecto se estudia el desempeño térmico de nanofluidos de oro y plata en sistemas de intercambio de calor. Se determinan las propiedades termofísicas teórica y parcialmente de manera experimental para ambos nanofluidos y utilizando simulaciones en Excel de intercambiadores de calor de doble tubo y de tubos y coraza en un sistema agua-nanofluido se determina el incremento en la efectividad de los sistemas de intercambio de calor, asimismo su beneficio energético, económico y ambiental al incrementar esta efectividad.

2.6 Marco Teórico

2.6.1 Propiedades Termofísicas

Las propiedades termofísicas de los fluidos participantes en operaciones de intercambio de calor ofrecen ventajas, pero también limitaciones en éstas, de ahí nace la idea de buscar mejorar las propiedades de un fluido base para incrementar su potencial para el intercambio de calor. La propiedad termofísica más importante para mejorar y que

directamente afecta el desempeño de los fluidos en el intercambio de calor es la conductividad térmica (k) la cual representa la capacidad de un material para conducir calor (Cengel & Ghajar, 2011), sin embargo, no son las únicas, la difusividad térmica (α), la densidad (ρ) y la viscosidad (μ) también influyen en estas operaciones. En la Tabla I se resumen algunos valores de propiedades termofísicas de ciertos materiales a temperatura ambiente.

TABLA I.

PROPIEDADES TERMOFÍSICAS DE MATERIALES UTILIZADOS EN APLICACIONES DE NANOFLUIDOS.⁵

Material	k , [W/m K]	α , [m ² /s] ($\times 10^6$)	ρ , [kg/m ³]	μ , [Pa s]
Agua	0.607	0.14	996	0.0007623
Cobre	401	113	8960	-
Aluminio	237	97.5	2700	-
Plata	429	149	10490	-
Oro	317	127	19304	-

Observando los valores de conductividad y difusividad térmica de metales como el oro y la plata justifica la utilización de éstos como nanopartículas que fomenten el incremento de estas propiedades en un nanofluido base agua.

2.6.2 Análisis de Intercambiadores de Calor

El modelado de la transferencia de calor en un intercambiador de calor puede ser explicado y simplificado como una red de resistencias térmicas entre los fluidos y la pared

del material que está diseñado el intercambiador de calor. De esta forma se puede determinar una resistencia térmica total conformada por las tres involucradas dos involucran el fenómeno de convección tanto interna como externa de un tubo y la otra la conducción de calor a través de la pared, comúnmente metálica, del intercambiador de calor, la resistencia térmica total se muestra en ecuación 1.

$$R = R_i + R_{pared} + R_o = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{\ln \ln \left(\frac{D_o}{D_i} \right)}{2\pi k L} + \frac{1}{h_o A_o} \quad [1]$$

Dónde A son las áreas de intercambio de calor y h los coeficientes de transferencia de calor por convección internos y externos, con los subíndices i y o, respectivamente.

El cálculo de los coeficientes de transferencia de calor por convección hace uso de las propiedades termofísicas del fluido y de números adimensionales como los números de Reynolds, Prandtl y Nusselt (ecuaciones 2, 3 y 4), éste último está en función de los de los primeros dos y depende del régimen de flujo.

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad [2]$$

$$Pr = \frac{\mu C_p}{k} \quad [3]$$

$$Nu = \frac{h D}{k} = f(Re, Pr) \quad [4]$$

Así, ahora se puede expresar la razón de transferencia de calor en referencia a esta resistencia total (ecuación 5), donde U es llamado coeficiente global de transferencia de calor, coeficiente que en este trabajo será útil para evaluar el desempeño del intercambiador de calor con el sistema agua- nanofluido propuesto.

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{R} = U A_s \Delta T = U_i A_i \Delta T = U_o A_o \Delta T \quad [5]$$

Para realizar el análisis de los intercambiadores de calor propuestos donde se pretende determinar la razón de transferencia de calor y que permitirá calcular las temperaturas de salida de los fluidos frío y caliente que pasen por el sistema se basa en el método de la efectividad-NTU. Este método se basa en el parámetro de efectividad de la transferencia de calor, (ecuación 6), que es definido por la razón de la transferencia de calor real entre la razón máxima posible de la transferencia de calor. La razón de calor real transferido ahora queda en función de la razón máxima posible de transferencia de calor y la efectividad del intercambiador de calor dado. La determinación de la razón máxima posible de transferencia de calor requiere solamente de la información de entrada de los fluidos frío y caliente (temperatura y gasto másico), así como de la capacidad calorífica mínima de los dos fluidos, como se muestra en la ecuación 7, y la efectividad es una función del número de unidades de transferencia, NTU (ecuación 8), y de la relación de capacidades caloríficas (ecuación 9).

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_{max}} \quad [6]$$

$$\dot{Q}_{max} = (\dot{m}Cp)_{min}(T_{h,ent} - T_{c,ent}) \quad [7]$$

$$NTU = \frac{UA_s}{(\dot{m}Cp)_{min}} \quad [8]$$

$$c = \frac{(\dot{m}Cp)_{min}}{(\dot{m}Cp)_{max}} = \frac{C_{min}}{C_{max}} \quad [9]$$

Donde U representa el coeficiente global de transferencia de calor y A_s el área superficial de transferencia de calor.

$$\Delta P_t = \rho_{nf}(g\Delta z + h_{fT}) \quad [10]$$

$$P = \frac{\dot{m}_{nf}\Delta P_t}{\rho_{nf}\eta_{bomba}} \quad [11]$$

Haciendo uso del método de la efectividad-NTU, y conociendo la caída de presión del fluido de interés (dependiendo la geometría del intercambiador de calor), es posible determinar la razón de transferencia de calor, el coeficiente global de transferencia de calor y la potencia de bombeo necesaria (ecuaciones 10 y 11), donde ΔP_t es la caída de presión total en el intercambiador de calor que depende de la densidad del nanofluido (ρ_{nf}), el cambio de altura si existiera (Δz) y la pérdidas por fricción (h_{fT}) y además una eficiencia de la bomba de alimentación (η_{bomba}); lo cual permite determinar el desempeño de un intercambiador de calor en un sistema, para un sistema agua-nanofluido.

CAPÍTULO 3

HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

3.1 Hipótesis

Los nanofluidos de oro y plata base agua permiten incrementar el coeficiente global de transferencia de calor en sistemas de intercambio de calor comparado con un fluido de servicio común, el agua.

3.2 Objetivo General

Mejorar el desempeño térmico de sistemas de intercambio de calor utilizando nanofluidos de oro y plata base agua como fluidos de servicio para incrementar la efectividad térmica, disminuir el impacto ambiental y favorecer la economía de estos sistemas.

3.3 Objetivos Específicos

- Sintetizar nanopartículas de plata.
- Caracterizar las nanopartículas de plata mediante espectrofotometría UV-Visible, microscopía electrónica de barrido.
- Desarrollar nanofluidos estables con concentraciones de nanopartículas de plata conocidas.

- Determinar las propiedades termofísicas de manera teórica de los nanofluidos de oro y plata y, experimentalmente, las propiedades termofísicas del nanofluido de plata.
- Simular utilizando Microsoft Excel © el desempeño térmico, en configuraciones de intercambiadores de calor de doble tubo y coraza y tubos con 1 paso por la coraza y 1 o 2 pasos por los tubos, del sistema agua-nanofluido para ambos nanofluidos teniendo como respuestas la efectividad de intercambio de calor y la potencia de bombeo necesaria para hacer fluir los nanofluidos.
- Realizar análisis energético, exergético, económico y ambiental de los sistemas de intercambio de calor propuestos.
- Comparar y establecer conclusiones sobre el efecto de la adición de nanopartículas de oro y plata al agua para incrementar la transferencia de calor en los sistemas de calor propuestos y su impacto en el desempeño térmico.

CAPÍTULO 4

MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Materiales y Equipos

4.1.1 Reactivos

- Nitrato de plata (Sigma-Aldrich)
- Acido tánico (Sigma-Aldrich)
- Citrato de sodio dihidratado (Sigma-Aldrich)
- Solución de etanol al 96% v/v

4.1.2 Soluciones Preparadas

Para la síntesis de nanopartículas de plata fueron utilizadas las siguientes soluciones:

- Solución acuosa de citrato de sodio dihidratado (5 mM) y ácido tánico (1 mM)
- Solución acuosa de nitrato de plata (25 mM)

4.1.3 Equipos de Laboratorio

El listado de los equipos de laboratorio utilizados en el proyecto y su aplicación se muestra en la tabla II.

TABLA II.

EQUIPOS DE LABORATORIO Y SUS APLICACIONES.

Equipo Marca/Modelo	Aplicación
Balanza Sartorius/ ENTRIS 224-1S	Medir la masa de los reactivos utilizados en la síntesis de nanopartículas de plata.
Termomezclador Eppendorf/Thermomixer C	Calentar y agitar la solución reductora para la síntesis de nanopartículas de plata.
Centrífuga Thermo Scientific/Sorvall Legend XFR	Centrifugar solución de nanopartículas de plata para purificación.
Horno de secado Shell Lab/SGO 68	Secado de residuos de etanol y solución reductora después de centrifugar solución de nanopartículas de plata.
Liofilizadora Labconco/Freezone 6	Deshidratar nanopartículas de plata sintetizadas.
Baño de ultrasonido Vevor/PL6000	Acelerar la disolución de las nanopartículas de plata dispersas en agua y romper la acumulación de éstas.

Viscosímetro capilar Cannon Fenske / 100	Medir la viscosidad cinemática de los nanofluidos sintetizados.
Densímetro de tubo vibrante Anton Paar/DMA5000	Medir la densidad de los nanofluidos sintetizados

4.2 Metodología Experimental

4.2.1 Síntesis de Nanopartículas de Plata

La síntesis de nanopartículas de plata se realizó basada en el trabajo de Bastús y colaboradores (Bastús et al., 2014), donde se pretendía sintetizar nanopartículas con tamaños promedio de entre 40 y 60 nm.

Se utilizaron tubos Corning de 50 mL para realizar la síntesis de nanopartículas de plata, por lo cual las cantidades utilizadas están referenciadas para un tubo Corning de 50 mL.

Se tomaron 40 mL de solución acuosa de citrato de sodio dihidratado (5 mM) y ácido tánico (1 mM) y se calentó utilizando el termomezclador a 100°C a 600 rpm hasta observar ebullición, después se agregaron 4 mL de la solución de sal precursora de nitrato de plata, donde inmediatamente la solución tomó un color rojizo y se dejó mezclando por 5 minutos más ya sin calentamiento. La solución final tomó un color gris, más turbio que el color inicial.

4.2.2 Purificación de nanopartículas de plata

La purificación de nanopartículas de plata estuvo basada en la síntesis realizada por Escárcega y colaboradores (Escárcega-González et al., 2018) donde la solución resultante de nanopartículas de plata pasó por un proceso de centrifugación, secado y liofilización (figura 1).

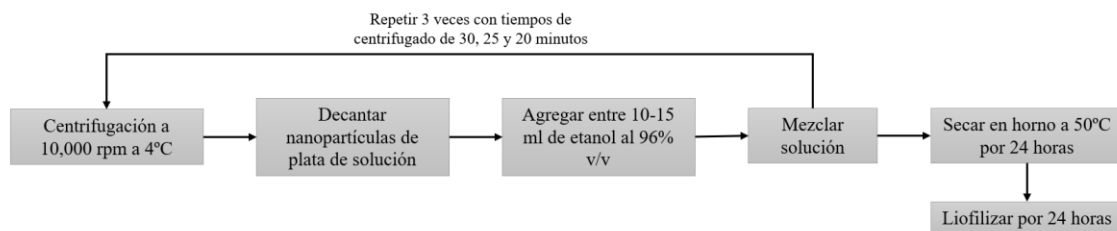


Figura 1. Proceso de purificación de nanopartículas de plata.

La solución de nanopartículas de plata se centrifugó a 10,000 rpm a 4°C por 35 minutos, después se separó la solución restante de las nanopartículas por el método de decantación y se agregaron entre 10 y 15 mL de etanol (96% v/v) para el lavado de las nanopartículas de plata, este proceso se repitió 3 veces más con tiempos de centrifugación de 30, 25 y 20 minutos. Una vez separadas las nanopartículas de plata en la última iteración de decantación, la solución restante se evaporó al colocar los tubos Corning en un horno de secado por 24 horas. Después para la deshidratación final se liofilizaron las nanopartículas de plata durante 24 horas y finalmente se obtienen las nanopartículas de plata secas.

4.2.3 Formulación de nanofluidos de plata

Las nanopartículas purificadas se molieron y se pesaron para después dispersarse en agua destilada, con el fin de asegurar una buena disolución y evitar la formación de

conglomerados de nanopartículas de plata, los nanofluidos formulados se dejaron en un baño de ultrasonido por 2 horas (potencia de 50 W y frecuencia de 60 Hz). Los nanofluidos de plata formados tuvieron las concentraciones en volumen de 0.1%, 0.08%, 0.06% y 0.04%.

4.2.4 Determinación experimental de propiedades termofísicas

La determinación experimental de propiedades termofísicas consistió en sólo determinar las propiedades de densidad y viscosidad a las 4 muestras de nanofluidos de plata sintetizadas.

Para determinar la densidad de las 4 muestras de nanofluido de plata se colocaron aproximadamente 3 mL en un densímetro de tubo vibrante inyectándolos por la parte lateral al tubo, como el mostrado en la figura 2. Se estudió la densidad a 25°C.



Figura 2. Densímetro de tubo vibrante Anton Para DMA 5000.

La determinación de la viscosidad cinemática de los nanofluidos se realizó utilizando un viscosímetro capilar Cannon Fenske 100, como el mostrado en la figura 3.



Figura 3. Viscosímetro capilar Cannon Fenske 100.

Las medidas de tiempo se tomaron con un cronómetro y el viscosímetro capilar se encontraba en un baño de temperatura a 25°C.

Se obtuvieron 3 medidas de tiempo con desviaciones de +/- 1 segundo y se multiplicaron por la constante de 0.1325 cSt/s para convertir las medidas de tiempo a viscosidad cinemática y se utilizó un promedio de estos 3 valores.

La viscosidad dinámica se obtuvo multiplicando los valores de viscosidad cinemática por la densidad de las suspensiones.

4.3 Metodología de Simulación

4.3.1 Determinación Teórica de Propiedades Termofísicas

La determinación de las propiedades termofísicas de los nanofluidos se llevarán a cabo haciendo uso de correlaciones para este tipo de fluidos y con métodos experimentales. Las propiedades termofísicas necesarias son: densidad efectiva, calor específico, conductividad térmica efectiva y viscosidad efectiva, las cuales son las variables independientes en las ecuaciones 2, 3 y 4.

La densidad efectiva, al igual que la mayoría de las propiedades termofísicas de los nanofluidos está directamente relacionada a la fracción volumétrica de nanopartículas en el fluido (f_v), la cual es la relación entre el volumen de las nanopartículas con el volumen del fluido base (ecuación 12), la densidad efectiva será calculada con la correlación reportada en Pak y Cho (ecuación 13)(Bock Choon Pak, 2013), la cual es función de f_v , y las densidades de las nanopartículas y el fluido base (ρ_{np} y ρ_{bf} , respectivamente).

$$f_v = \frac{V_{np}}{V_{bf}} \quad [12]$$

$$\rho_{nf} = f_v \rho_{np} + (1 - f_v) \rho_{bf} \quad [13]$$

Mediante la ecuación 14, tomada del trabajo de Xuan y Roetzel(Xuan & Roetzel, 2000), la cual es función de las capacidades caloríficas del nanofluido, el fluido base y las nanopartículas (Cp_{nf} , Cp_{bf} y Cp_{np} , respectivamente) se determinará el valor de calor específico del nanofluido.

$$Cp_{nf} = \frac{(1 - f_v)(\rho Cp)_{bf} + f_v(\rho Cp)_{np}}{\rho_{nf}} \quad [14]$$

Para la determinación de la conductividad térmica efectiva se hará uso de la ecuación 15, correlación obtenida en el trabajo de Hamilton y Crosser(Hamilton & Crosser, 1962), en esta se considera un parámetro “n” incorporando el factor de forma de las nanopartículas, siendo 3 para partículas esféricas y 6 para cilíndricas, y las conductividades térmicas del nanofluido (k_{nf}), el fluido base (k_{bf}) y las nanopartículas (k_{np}).

$$k_{nf} = k_{bf} \left(\frac{k_{np} + (n - 1)k_{bf} - (n - 1)(k_{bf} - k_{np})f_v}{k_{np} + (n - 1)k_{bf} + (k_{bf} - k_{np})f_v} \right) \quad [15]$$

Para la determinación de la viscosidad se hará uso de la ecuación 16 para el cálculo teórico, del trabajo de Einstein obtenida de Rudyak y Minakov, donde el factor alfa depende del nanofluido, siendo μ_{nf} la viscosidad del nanofluido y μ_{bf} la viscosidad del fluido base.(Rudyak & Minakov, 2018)

$$\mu_{nf} = \mu_{bf}(1 + \alpha f_v) \quad [16]$$

4.3.2 Análisis de Intercambiadores de Calor (Simulación en Excel)

Para evaluar el efecto del uso de nanofluidos de oro y plata como fluidos de servicio en sistemas de intercambio de calor se realizaron simulaciones en Excel para diversas configuraciones de intercambiadores de calor en el sistema agua-nanofluido a diferentes concentraciones de nanopartículas de ambos metales (0-5 % V/V) pudiendo determinar los coeficientes globales de transferencia de calor, la efectividad de intercambio de calor en estos sistemas, así como la potencia de bombeo necesaria para hacer que el nanofluido fluya por el intercambiador de calor. Finalmente se estableció un análisis económico y ambiental que permita explorar el efecto del uso de estos nanofluidos en esos aspectos.

4.3.3 Intercambiador de Calor de Doble Tubo

Se parte de un intercambiador de calor modelo ya dimensionado que permita explorar el efecto de los nanofluidos como fluido de servicio, las especificaciones del intercambiador de calor, así como del sistema establecido son las siguientes:

- Fluido por el tubo interno: Nanofluido de oro o plata (Fluido frío).
- Fluido por el espacio anular: Agua (Fluido caliente).

- Material del intercambiador de calor: Acero inoxidable.
- Dimensiones del intercambiador de calor: El dimensionamiento del intercambiador de calor se muestra en la Tabla III y se esquematiza en la Figura 4.

TABLA III.

DIMENSIONAMIENTO DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR DE DOBLE TUBO.

Tubo	D. Nominal (in)	Cédula	D. Interno (m)
Interno	1/8"	40	0.00683
Externo	3/8"	40	0.01252

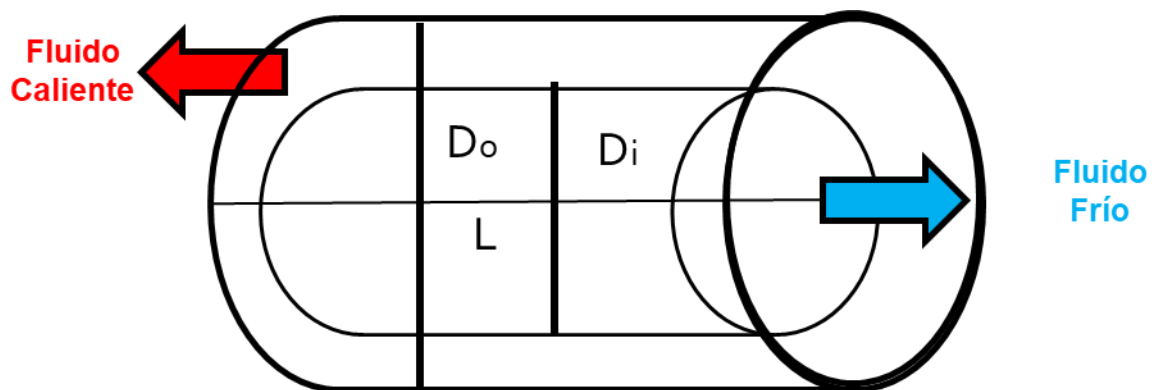


Figura 4. Esquema del intercambiador de calor de doble tubo.

4.3.3.1 Cálculo del Coeficiente de Transferencia de Calor por Convección en Tubo Interno (h_i)

Una vez calculadas las propiedades termofísicas de los nanofluidos de oro y plata desde 0-5% volumen, se realiza el cálculo del coeficiente de transferencia de calor por convección en el tubo interno.

Inicialmente se usan 5 flujos volumétricos de 1.8, 2, 2.2, 2.4, y 2.6 L/min de nanofluido para estudiar el efecto del flujo volumétrico en el sistema de intercambio de calor propuesto.

Se determina el régimen de flujo en el tubo interno a partir del número de Reynolds (ecuación 17), se considera turbulento para un $Re > 4000$.

$$Re = \frac{\rho D_i V}{\mu} \quad [17]$$

Donde ρ y μ representan la densidad y viscosidad del nanofluido, respectivamente; mientras que D_i es el diámetro interno del tubo interno y V la velocidad del nanofluido que está directamente relacionada con los 5 flujos volumétricos propuestos.

Considerando que, para los flujos volumétricos trabajados bajo todas las condiciones de concentración en el nanofluido estudiadas, el régimen de flujo es turbulento, el cálculo del número de Nusselt parte de una correlación para determinarlo, la correlación utilizada es la de Gnielinski (ecuación 18), esta correlación es adecuada para flujos turbulentos y ofrece resultados con errores menor al 10% en el cálculo del número de Nusselt; el cual es función del número de Reynolds, Prandtl (ecuación 19) y del factor de fricción considerando que el tubo no es liso debido al material utilizado, la correlación para este factor se muestra en la ecuación 20.

$$Nu = \frac{\left(\frac{f}{8}\right)(Re-1000)Pr}{1+12.7\left(\frac{f}{8}\right)^{0.5}\left(Pr^{\frac{2}{3}}-1\right)} \quad [18]$$

$$Pr = \frac{\mu C_p}{k} \quad [19]$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -1.8 \log \left[\frac{6.9}{Re} + \left(\frac{\epsilon}{3.7 D_i} \right)^{1.11} \right] \quad [20]$$

Una vez determinado el número de Nusselt, a partir de la ecuación 21, es posible calcular el valor del coeficiente de transferencia de calor por convección en el tubo interno para las diversas concentraciones del nanofluido para ambos metales.

$$h_i = \frac{kNu}{D_i} \quad [21]$$

4.3.3.2 Cálculo del Coeficiente de Transferencia de Calor por Convección en Espacio Anular (h_o)

Una vez determinadas las propiedades termofísicas del agua, se realiza el cálculo del coeficiente de transferencia de calor por convección en el espacio anular. El flujo volumétrico del fluido caliente, es decir el agua, por el espacio anular es de 1.2 L/min.

Se determina el régimen de flujo en el espacio anular a partir del número de Reynolds (ecuación 22), se considera turbulento para un $Re > 4000$.

$$Re = \frac{\rho D_e V}{\mu} \quad [22]$$

$$D_e = D_o - D_i \quad [23]$$

Donde ρ y μ representan la densidad y viscosidad del agua, respectivamente; mientras que D_e es el diámetro equivalente en el espacio anular, está representado como se muestra en la ecuación 23, y V la velocidad del agua en el espacio anular.

Considerando que, para el flujo volumétrico determinado, el régimen de flujo es turbulento, el cálculo del número de Nusselt es similar al del cálculo de este número para el tubo interno, la correlación utilizada es la de Gnielinski (ecuación 18); la cual es función del número de Reynolds, Prandtl (ecuación 19) y del factor de fricción considerando que el tubo no es liso debido al material utilizado, la correlación para este factor se muestra en la ecuación 20.

Una vez determinado el número de Nusselt, a partir de la ecuación 24, es posible calcular el valor del coeficiente de transferencia de calor por convección en el espacio anular para el agua.

$$h_i = \frac{kNu}{D_e} \quad [24]$$

4.3.3.3 Cálculo del Coeficiente Global de Transferencia de Calor (U)

Debido al espesor despreciable del tubo interno y a la alta conductividad térmica del material del tubo, la resistencia térmica debida a la conducción de calor en el tubo se desprecia, por lo cual, el coeficiente global de transferencia de calor en el intercambiador de calor está relacionado solamente a la transferencia de calor por convección de los fluidos participantes, así el coeficiente U puede ser calculado mediante la ecuación 25.

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_o}} \quad [25]$$

4.3.3.4 Efectividad del Intercambiador de Calor de Doble Tubo

Conociendo el coeficiente global de transferencia de calor en el intercambiador de calor, es posible hacer el cálculo de la efectividad de la transferencia de calor en los diversos sistemas agua-nanofluido propuestos.

Inicialmente se desarrollan las capacidades caloríficas de los fluidos en el sistema (ecuaciones 26 y 27) y se determina la mínima y la máxima entre ellas, así se puede establecer una relación de capacidades, c , mostrada en la ecuación 28, ésta es útil en el cálculo de la efectividad.

$$C_{frío} = \dot{m}_{frío} C_{p_{frío}} \quad [26]$$

$$C_{caliente} = \dot{m}_{caliente} C_{p_{caliente}} \quad [27]$$

$$c = \frac{C_{\text{mínimo}}}{C_{\text{máximo}}} \quad [28]$$

Las relaciones de efectividad de transferencia de calor incluyen la relación UA_s/C_{min} , donde A_s es el área superficial de intercambio de calor, por lo cual se relacionan en un grupo adimensional llamado número de unidades de transferencia (NTU). Con la relación de capacidades y el NTU es posible determinar la efectividad de intercambio de calor en el sistema a partir de la relación mostrada en la ecuación 29, aplicable para un intercambiador de calor de doble tubo a contraflujo.

$$\varepsilon = \frac{1 - \exp(-NTU(1 - c))}{1 - c \exp(-NTU(1 - c))} \quad [29]$$

4.3.3.5 Cálculo de Potencia de Bombeo del Nanofluido

Para el cálculo de la potencia de bombeo que se suministra al nanofluido para su flujo en el tubo interno es necesario el cálculo de la caída de presión que se presentará en el tubo, la cual es calculada mediante un balance de energía mecánica, resultando en la ecuación 30, donde el factor de fricción, f , es el mostrado en la ecuación 20.

$$\Delta P = \frac{\rho f L}{D_i} \left(\frac{V^2}{2} \right) \quad [30]$$

$$P = \frac{\Delta P \dot{v}}{\eta} \quad [31]$$

Con el cálculo de caída de presión y conociendo el flujo volumétrico, \dot{v} , del nanofluido, se calcula con la ecuación 31 la potencia de bombeo necesaria para el nanofluido considerando una eficiencia, η , de bombeo del 60%.

4.3.4 Intercambiador de Calor de Tubos y Coraza

Se parte de un intercambiador de calor modelo ya dimensionado que permita explorar el efecto de los nanofluidos como fluido de servicio, las especificaciones del intercambiador de calor, así como del sistema establecido son las siguientes:

- Fluido por los tubos: Nanofluido de oro o plata (fluido frío).
- Fluido por la coraza: Agua (fluido caliente).
- Material del intercambiador de calor: Cobre
- Los tubos son de 18 BWG, de 1 in de diámetro externo con un layout cuadrado de 1 in y un diámetro de coraza de 15.25 in. Las dimensiones del intercambiador de calor se muestran en la tabla IV, así como en la esquematización de la figura 5.

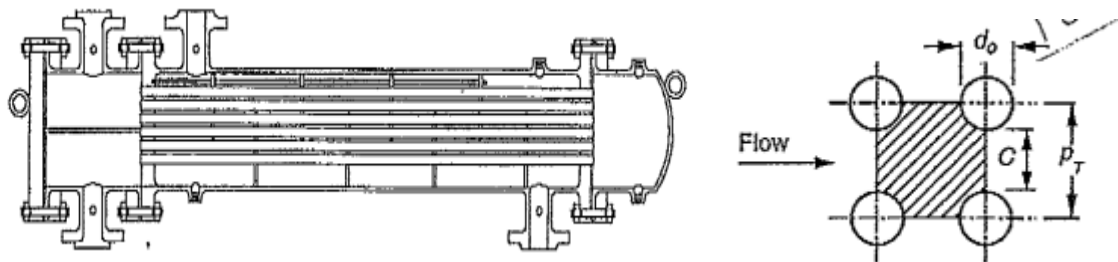


Figura 5. Esquema de intercambiador de calor de tubos y coraza y layout cuadrado del acomodo de los tubos dentro del intercambiador de calor.

TABLA IV.

DIMENSIONES DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR DE TUBOS Y CORAZA.

Lado Tubos		Lado Coraza	
$D_o=$	0.0254 m	$P_t=$	0.0318 m
$D_i=$	0.0229 m	$C=$	0.0064 m
$L=$	10 m	$B=$	0.3048 m

$N_t=$	81 tubos	$D_s=$	0.3874 m
Pasos=	1 // 2 pasos	Pasos=	1 paso

4.3.4.1 Cálculo del Coeficiente de Transferencia de Calor por Convección en los Tubos (h_t)

Una vez calculadas las propiedades termofísicas de los nanofluidos de oro y plata desde 0-5% volumen, se realiza el cálculo del coeficiente de transferencia de calor por convección en el tubo interno.

Inicialmente se consideran 4 flujos volumétricos de 0.031, 0.039, 0.047 y 0.055 m^3/s de nanofluido para estudiar el efecto del flujo volumétrico en el sistema de intercambio de calor propuesto.

El cálculo de la velocidad, V , del nanofluido en los tubos está relacionado con el número de tubos y número de pasos en los tubos del intercambiador de calor, como se muestra en las ecuaciones 32 y 33.

$$A_t = \pi \frac{D_i^2}{4} \quad [32]$$

$$V = \frac{\dot{v} (\# \text{pasos})}{N_t A_t} \quad [33]$$

Se determina el régimen de flujo en los tubos a partir del número de Reynolds (ecuación 34), se considera turbulento para un $Re > 4000$.

$$Re = \frac{\rho D_i V}{\mu} \quad [34]$$

Donde ρ y μ representan la densidad y viscosidad del nanofluido, respectivamente; mientras que D_i es el diámetro interno los tubos dentro de la coraza y V la velocidad del nanofluido que está directamente relacionada con los 4 flujos volumétricos propuestos.

Considerando que para los flujos volumétricos estudiados bajo todas las condiciones de concentración en el nanofluido estudiadas, el régimen de flujo es turbulento, el cálculo del número de Nusselt parte de una correlación para determinarlo, la correlación utilizada es la de Gnielinski (ecuación 35), esta correlación es adecuada para flujos turbulentos y ofrece resultados con errores menor al 10% en el cálculo del número de Nusselt; tal y como se puede observar es función del número de Reynolds, Prandtl (ecuación 36) y el factor de fricción considerando que el tubo no es liso debido al material utilizado, la correlación para este factor se muestra en la ecuación 37.

$$Nu = \frac{\left(\frac{f}{8}\right)(Re-1000)Pr}{1+12.7\left(\frac{f}{8}\right)^{0.5} (Pr^{\frac{2}{3}}-1)} \quad [35]$$

$$Pr = \frac{\mu Cp}{k} \quad [36]$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -1.8 \log \left[\frac{6.9}{Re} + \left(\frac{\epsilon}{3.7 D_i} \right)^{1.11} \right] \quad [37]$$

Una vez determinado el número de Nusselt, a partir de la ecuación 38, es posible calcular el valor del coeficiente de transferencia de calor por convección en los tubos para las diversas concentraciones del nanofluido para ambos metales.

$$h_t = \frac{kNu}{D_i} \quad [38]$$

4.3.4.2 Cálculo del Coeficiente de Transferencia de Calor por Convección en la Coraza (h_o)

El fluido que pasa por la coraza es el agua a razón de 80,000 kg/h. El cálculo de la velocidad, V, del agua en la coraza está relacionado con el arreglo de los tubos cuadrado, como se muestra en la ecuación 39 y ecuación 40.

$$D_e = \frac{4(\text{área de flujo neto})}{\text{Perímetro mojado}} = \frac{4(P_t^2 - \pi \frac{D_o^2}{4})}{\pi D_o} \quad [39]$$

Dado que no hay un área de libre flujo del lado de la coraza, resulta imposible calcular la velocidad másica, G_c , del agua, por lo cual se calculan valores aproximados de velocidad másica basado en el área donde existe un mayor flujo, esta área corresponde al centro de la coraza. El área al centro de la coraza se ve afectada por el diámetro de la coraza, D_c , el espacio entre tubos adyacentes, C , el tamaño de paso, P_t , y el espaciamiento entre deflectores, B ; como se muestra en la ecuación 40 y calculando la velocidad másica con la ecuación 41.

$$A_c = \frac{D_c C B}{P_t} \quad [40]$$

$$G_c = \frac{\dot{m}}{A_c} \quad [41]$$

Posteriormente, se determina el régimen de flujo en la coraza a partir del número de Reynolds (ecuación 42).

$$Re = \frac{D_e G_c}{\mu} \quad [42]$$

Conociendo el régimen de flujo turbulento ($Re > 10,000$) en esta zona, a partir de la correlación de McAdams (ecuación 43) para flujo dentro de la coraza se puede calcular el número de Nusselt, esta correlación es función de los números de Reynolds, Prandtl, así como una relación entre las viscosidades a la temperatura promedio del fluido, μ_c , y a la temperatura de la superficie del tubo, μ_w .

$$Nu = 0.36 Re^{0.55} Pr^{0.33} \left(\frac{\mu_c}{\mu_w} \right)^{0.14} \quad [43]$$

Una vez determinado el número de Nusselt, a partir de la ecuación 44, es posible calcular el valor del coeficiente de transferencia de calor por convección en la coraza para el flujo del agua.

$$h_o = \frac{kNu}{D_e} \quad [44]$$

4.3.4.3 Cálculo del Coeficiente Global de Transferencia de Calor (U)

Considerando los efectos debidos a la conducción de calor de los tubos del intercambiador de calor, sumados a los efectos convectivos, la ecuación 45 representa el cálculo del coeficiente global de transferencia de calor para el intercambiador de calor de tubos y coraza planteado.

$$U = \frac{1}{\frac{D_o}{D_i h_i} + \frac{D_o \ln \left(\frac{D_o}{D_i} \right)}{2k_{material}} + \frac{1}{h_o}} \quad [45]$$

4.3.4.4 Efectividad del Intercambiador de Calor de Doble Tubo

Conociendo el coeficiente global de transferencia de calor en el intercambiador de calor, es posible hacer el cálculo de la efectividad de la transferencia de calor en los diversos sistemas agua-nanofluido propuestos.

Los parámetros involucrados son los mismos a los mostrados en las ecuaciones 26, 27 y 28, así como el uso del número de unidades de transferencia, NTU. Ahora las relaciones entre estos parámetros y la efectividad son diferentes, en la ecuación 46 se muestra la relación de la efectividad para un intercambiador de calor de tubos y coraza con un paso por los tubos y un paso por la coraza, mientras que en la ecuación 47 se muestra la relación de la efectividad para un intercambiador de calor de tubos y coraza con dos pasos por los tubos y un paso por la coraza.

$$\varepsilon = \frac{1 - \exp(-NTU(1 - c))}{1 - c \exp(-NTU(1 - c))} \quad [46]$$

$$\varepsilon = 2(1 + c + \sqrt{1 + c^2} \frac{1 + \exp(-NTU\sqrt{1 + c^2})}{1 - \exp(-NTU\sqrt{1 + c^2})})^{-1} \quad [47]$$

4.3.4.5 Cálculo de Potencia de Bombeo del Nanofluido

Para el cálculo de la potencia de bombeo que se suministra al nanofluido para su flujo en los tubos es necesario el cálculo de la caída de presión que se presentará en los tubos, esta caída de presión es calculada partiendo de un balance de energía mecánica, resultando en la ecuación 48, donde el factor de fricción, f , es el mostrado en la ecuación 20.

$$\Delta P = \frac{\rho f L N_p}{D_i} \left(\frac{V^2}{2} \right) + 4 N_p \rho \left(\frac{V^2}{2} \right) \quad [48]$$

Con el cálculo de caída de presión y conociendo el flujo volumétrico, \dot{v} , del nanofluido, se calcula con la ecuación 31 la potencia de bombeo necesaria para el nanofluido considerando una eficiencia, η , de bombeo del 60%.

4.3.5 Análisis Económico de los Sistemas de Intercambio de Calor

Una vez desarrollados los análisis térmicos en cada uno de los sistemas de intercambio de calor se realiza un análisis económico asociado a su operación y el cómo la utilización de nanofluidos de oro y plata beneficia la transferencia de calor en los intercambiadores, también aumentando la potencia de bombeo necesaria en el uso de estos nanofluidos.

Para el análisis se calculan las cantidades de calor intercambiado extra y potencia extra utilizadas debido al uso de los nanofluidos comparados con el uso del agua

convencional, como se muestran en las ecuaciones 49 y 50, para cada concentración de nanofluido en el rango del 0-5% volumen.

$$Q_{int,extra} = Q_{int,agua-nanofluido} - Q_{int,agua-agua} \quad [49]$$

$$P_{bombeo,extra} = P_{bombeo,nanofluido} - P_{bombeo,agua} \quad [50]$$

Un valor positivo de $Q_{int,extra}$ resulta benéfico para el sistema y un valor positivo de $P_{bombeo,extra}$ resulta perjudicial para el sistema, por lo cual se desarrolla el concepto de beneficio energético, relacionando los dos aspectos (ecuación 51).

$$Beneficio\ energético = Q_{int,extra} - P_{bombeo,extra} \quad [51]$$

Con el fin de representar económicamente este beneficio energético se considera que este beneficio es cantidad de energía eléctrica ahorrada en la utilización de un sistema de intercambio de calor en una operación unitaria como la que se muestra en este trabajo, por lo cual, considerando que uno de estos sistemas de intercambio de calor funcionen 24 horas diarias, 300 días al año y considerando la tarifa DIT (Demanda industrial en transmisión) de CFE en el estado de Nuevo León en horario punta actualizada a febrero del año 2022, la cual es de 0.065 USD/kWh; el ahorro económico de estos sistemas de intercambio de calor en 1 año está dado por la ecuación 52.

$$Beneficio\ económico\ anual = Beneficio\ energético\ anual \cdot Tarifa\ DIT \quad [52]$$

4.3.6 Análisis Ambiental de Sistemas de Intercambio de Calor

Considerando el beneficio energético anual discutido en la sección anterior, esta energía eléctrica no utilizada impacta directamente a las emisiones de CO₂ emitidas al ambiente durante estas operaciones unitarias. Según información de Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), el factor de emisión de la energía eléctrica es de 0.709 kg CO₂ emitidos/kWh, por lo cual es posible, mediante la ecuación 53, calcular las emisiones evitadas de CO₂ al reemplazar el uso de energía eléctrica por tecnología que eficientiza las operaciones de transferencia de calor.

$$\text{Emisiones evitadas de CO}_2 = \text{Beneficio energético anual} \cdot \text{Factor de emisión} \quad [53]$$

4.3.7. Análisis exergético de los Sistemas de Intercambio de Calor

Con el fin de analizar las irreversibilidades de los sistemas de intercambio de calor estudiados y el efecto de utilizar nanofluidos de oro y plata como fluidos de servicio en éstas, se realiza la siguiente metodología para calcular la exergía destruida de los sistemas y la eficiencia exergética de éstos (eficiencia de segunda ley de termodinámica), basados en el modelo de análisis exergético de Khan y Ghalban.(Khan et al., 2008)

Se realizan las siguientes consideraciones:

- Temperatura de entrada del fluido caliente ($T_{h,in}$): 65°C
- Temperatura de entrada del fluido frío ($T_{c,in}$): 30°C
- Temperatura del ambiente (T_o): 25°C
- Sistema adiabático y en estado estacionario.

Por lo cual el balance de exergía de un sistema adiabático en estado estacionario de un volumen de control es el mostrado en la ecuación 54.

$$X_d = (X_{h,in} - X_{h,out}) + (X_{c,in} - X_{c,out}) \quad [54]$$

Donde los subíndices h y c representan a los fluidos frío y caliente, respectivamente, mientras que los subíndices in y out representan las entradas y salidas del sistema. X_d es la exergía destruida en el sistema.

El balance de exergía de flujo de las dos corrientes del intercambiador de calor se muestra en la ecuación 55.

$$X_{in} - X_{out} = C_c(T_{in} - T_{out}) - C_c T_o \ln\left(\frac{T_{in}}{T_{out}}\right) - \frac{\dot{m}}{\rho} \Delta P \quad [55]$$

Donde C_c representa las capacidades caloríficas de los fluidos y ΔP la caída de presión del fluido en el sistema.

Además, usando la ecuación 56 se calcula la eficiencia exergética de cada uno de los sistemas de intercambio de calor.

$$\eta_{II} = \frac{X_{c,out} - X_{c,in}}{X_{h,in} - X_{h,out}} \quad [56]$$

CAPÍTULO 5

RESULTADOS Y DISCUSIONES

5.1 Caracterizaciones de nanofluidos de plata

5.1.1 Microscopía Electrónica de Barrido

Haciendo uso de un Microscopio Electrónico de Barrido por Emisión de Campo marca JEOL modelo JSM6701F, se realiza el análisis morfológico con una energía de aceleración del haz de 3 kV a una distancia de trabajo de 8 mm, haciendo muestreos a 250X, 1000X, 5000X, 10kX, 20kX y 50kX aumentos; así se tomaron imágenes de una muestra de nanopartículas de plata sintetizadas.

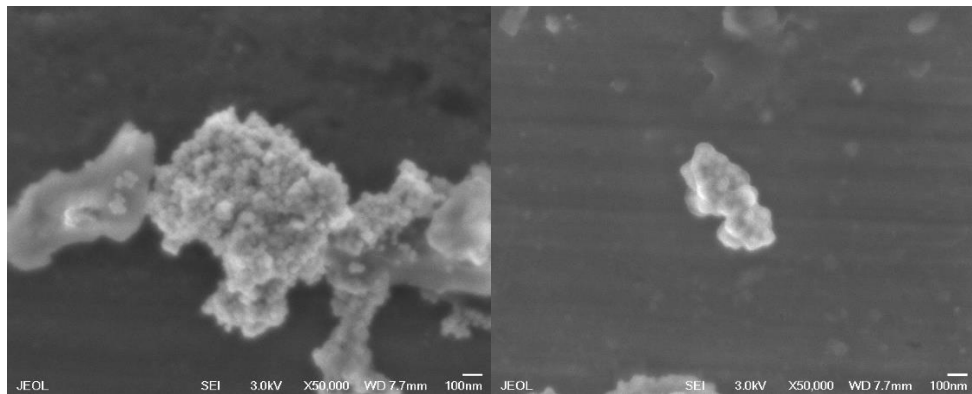


Figura 6. Imágenes de microscopía electrónica de barrido de aglomeraciones de nanopartículas de plata a escala de 100 nm.

En la figura 6 se muestran imágenes de aglomeraciones de nanopartículas de plata de tamaños menores a 100 nanómetros donde se puede identificar su morfología esférica. Las nanopartículas de plata se encuentran aglomeradas en agrupaciones de varias nanopartículas, por lo cual es poco más complicado distinguir cada una de ellas, además por la calidad en la imagen, donde se notan lugares con pobre conductividad eléctrica, se deduce que están cubiertas aún de solución reductora (citrato de sodio y ácido tánico).

Además, haciendo uso de esta técnica se determinó el tamaño promedio de las nanopartículas de plata sintetizadas (figura 7).

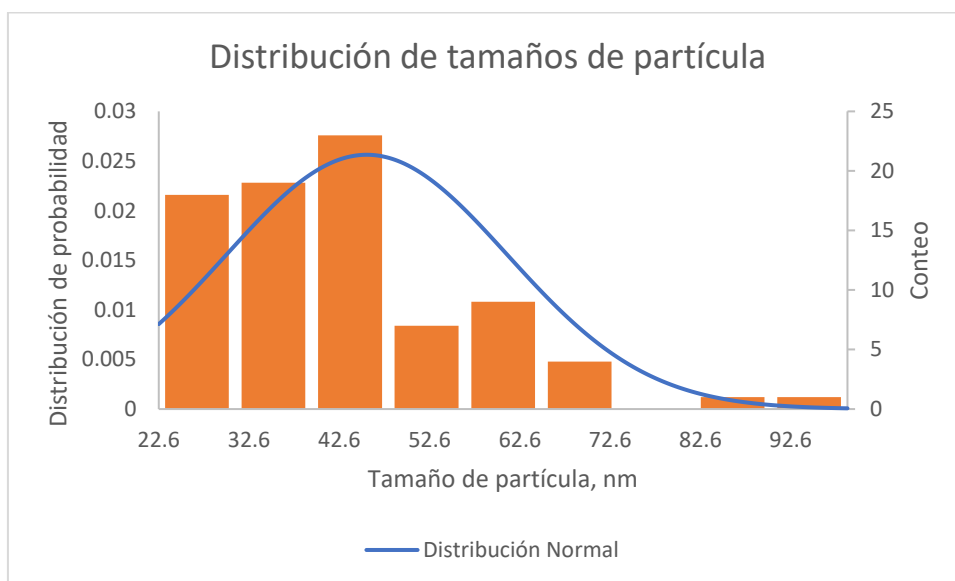


Figura 7. Distribución de tamaños de nanopartículas de plata.

El tamaño promedio resultante de las nanopartículas de plata sintetizadas fue de 45.65 nanómetros con una desviación estándar de 15.57 nanómetros.

El coeficiente de sesgo de los datos es de 0.98, lo que indica un sesgo positivo hacia la derecha, resultado de esos pocos valores de tamaño de nanopartícula arriba de los 90 nm.

5.1.2 Espectroscopia UV-Visible

Haciendo uso de un espectrofotómetro de microplacas ThermoScientific Multiskan GO se determinó el espectro de UV-Visible para 2 muestras de nanofluidos a concentraciones en volumen de nanopartículas de plata de 0.04% y 0.08%.

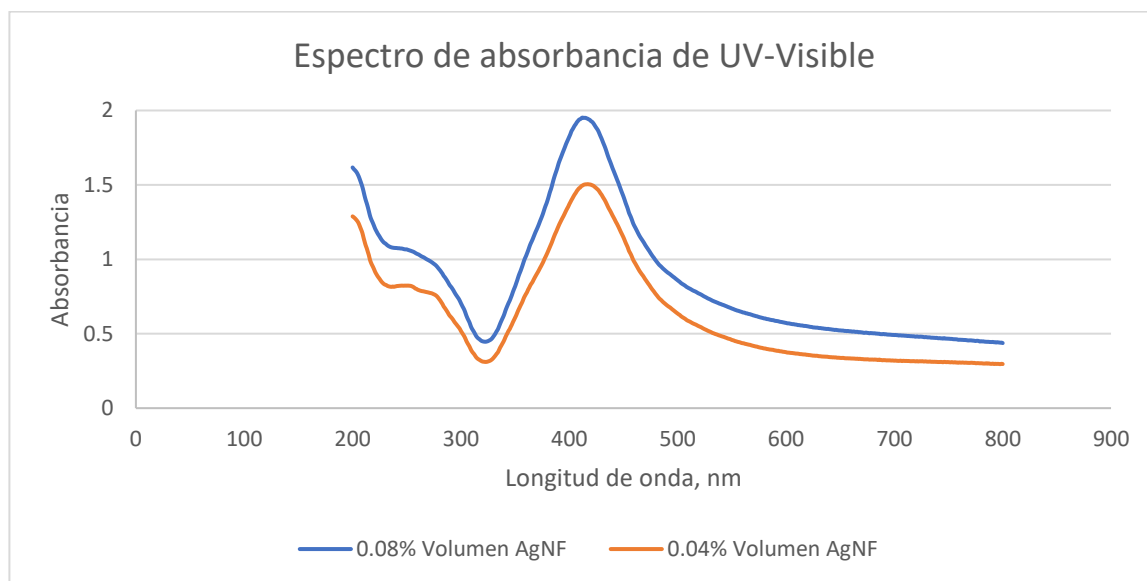


Figura 8. Espectro de absorción UV-Vis para nanofluidos de plata a concentraciones en volumen de 0.04% y 0.08%.

Los máximos picos de absorción se reportaron entre 413 y 417 nanómetros correspondiente a la resonancia de plasmón de superficie de la plata (figura 8). El pico a estas longitudes de onda corresponde a las nanopartículas de plata con tamaños promedio de 45.65 nm, sin embargo, el ancho en el pico característico muestra la dispersión de los tamaños de nanopartículas también mostradas en el análisis SEM.

La intensidad de la absorción para el nanofluido con concentración en volumen de nanopartículas de plata de 0.08% fue 1.3 veces mayor a la intensidad mostrada para el de 0.04% debido a la mayor cantidad de nanopartículas de plata en la muestra.

Estos resultados están en orden con lo reportado en trabajos anteriores.(Bastús et al., 2014; Sharma et al., 2011)

5.1 Propiedades Termofísicas

Los resultados de las propiedades termofísicas que los nanofluidos exhibieron se presentan en las figuras 9 y 10.

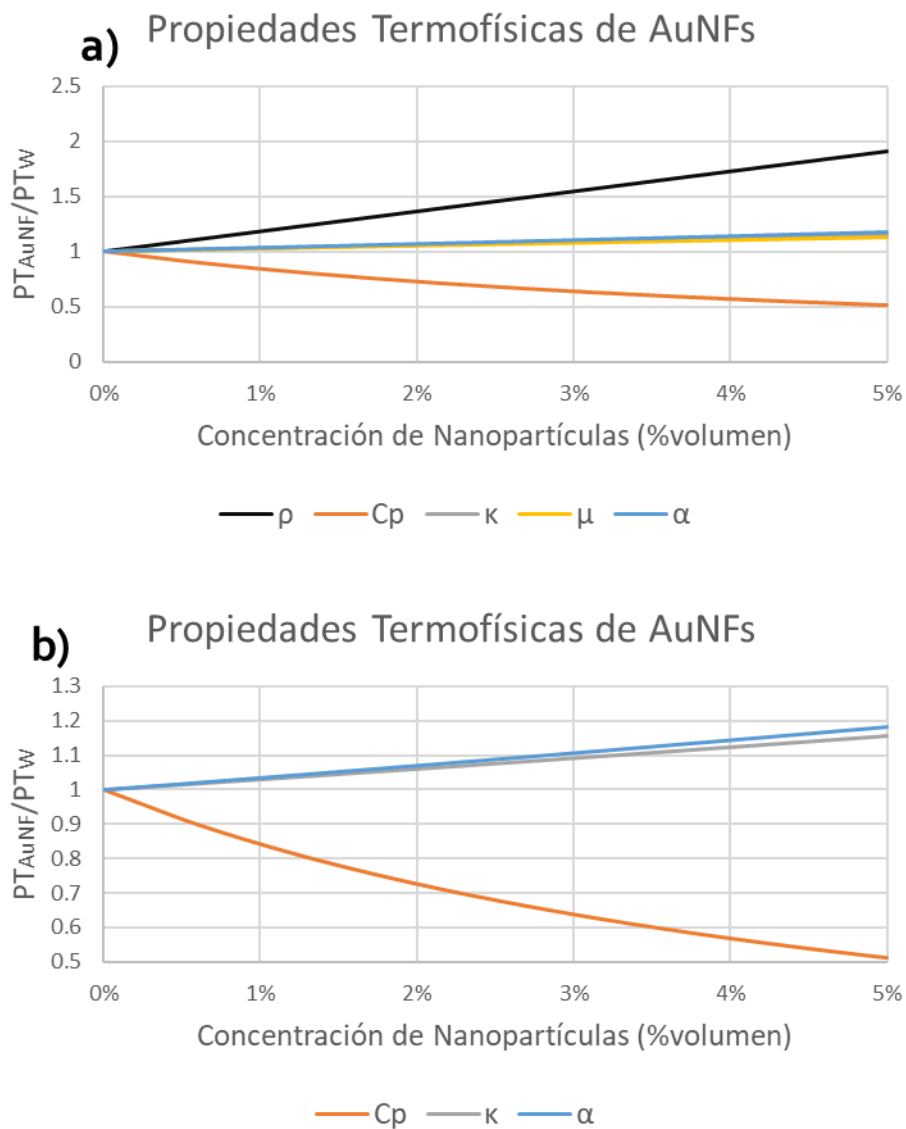


Figura 9. Propiedades termofísicas de nanofluidos de oro (AuNFs).

En las Figuras 9.a y 9.b se muestran los valores de las propiedades termofísicas del nanofluido de oro en un rango de concentración de nanopartículas de 0 a 5% en volumen contra las del fluido base, el agua. La densidad se incrementó en un 92% en el valor máximo de concentración, mientras que la capacidad calorífica disminuyó hasta en un 49%. La conductividad térmica del nanofluido de oro, así como su viscosidad, se vieron incrementados hasta en un 16% y 13%, respectivamente a una concentración de 5% en volumen, estas propiedades ligadas directamente al incremento del desempeño térmico de sistemas de intercambio de calor y su incremento de caída de presión en el flujo. En la Figura 9.b se muestra con mayor claridad la difusividad térmica, esta aumentó conforme se incrementó la concentración de nanopartículas, llegando a un máximo de 18% mayor. La difusividad térmica es una relación entre el calor conducido y almacenado de un material, en este caso, del nanofluido; lo cual indica que el incremento de concentración de nanopartículas favorece la conducción de calor en el fluido y así mismo el desempeño térmico que este tendrá en operaciones de intercambio de calor.

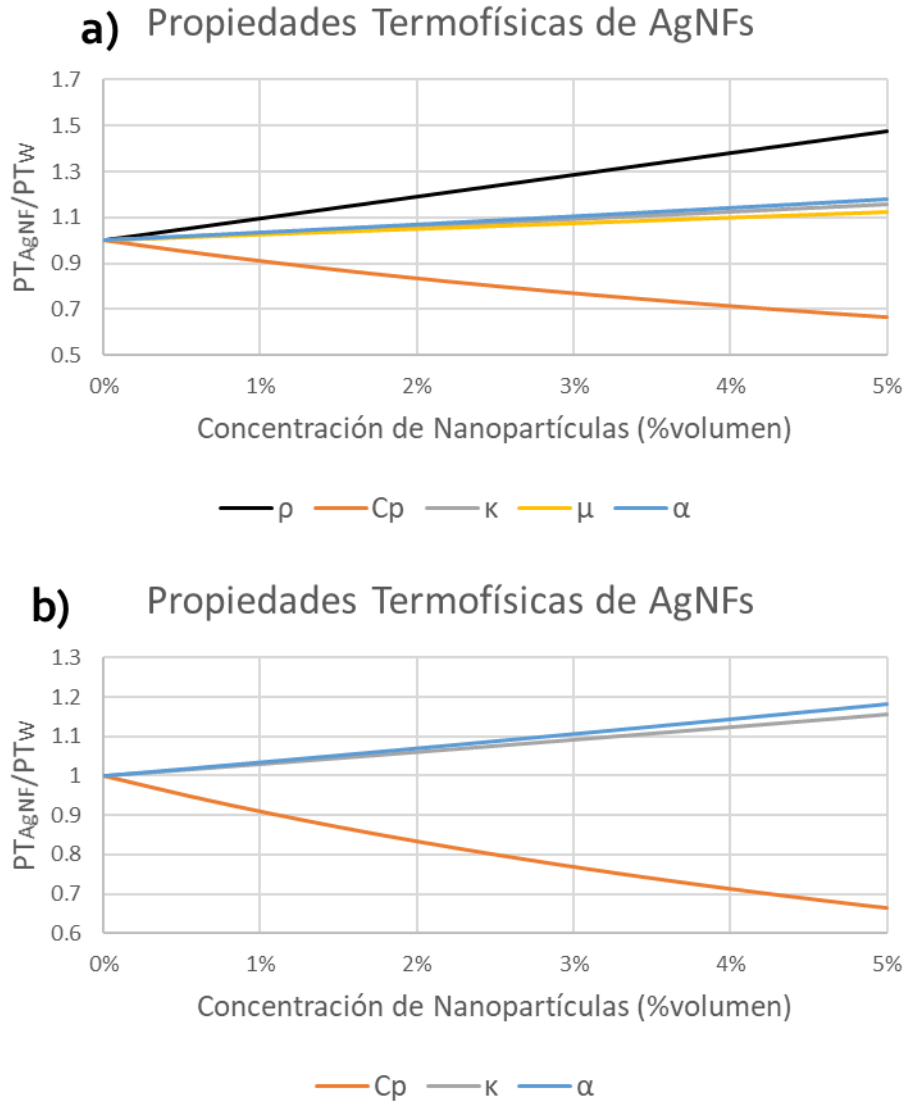


Figura 10. Propiedades termofísicas de nanofluidos de plata (AgNFs).

Para los nanofluidos de plata los valores de las propiedades del nanofluido tuvieron un comportamiento similar al nanofluido de oro. Como puede observarse en la figura 10 la densidad se incrementó en un 47% en el valor máximo de concentración, mientras que la capacidad calorífica disminuyó hasta en un 34%. La conductividad térmica del nanofluido de oro, así como su viscosidad, se vieron incrementados hasta en un 17% y 13%, respectivamente a la concentración máxima estudiada, como se muestra en la Figura

10.a. En la Figura 10.b se muestra con mayor claridad la difusividad térmica, la cual se incrementó conforme aumentó la concentración de nanopartículas, llegando a un máximo de 19% mayor.

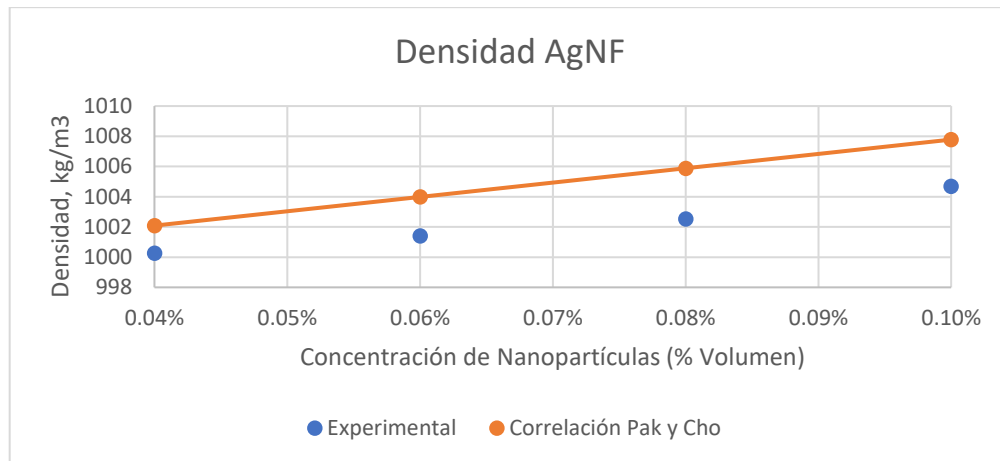


Figura 11. Densidad experimental y reportada de nanofluidos de plata (AgNFs).

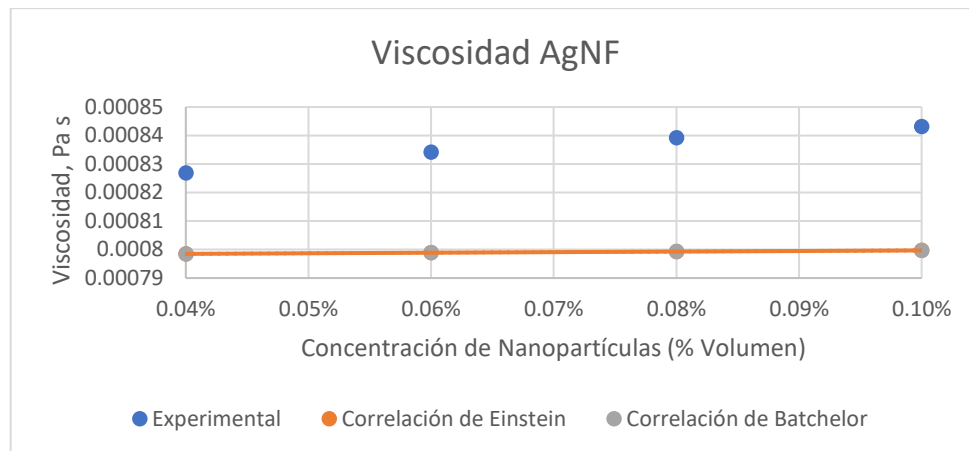


Figura 12. Viscosidad experimental y reportada de nanofluidos de plata (AgNFs).

Con los nanofluidos de plata formados se determinó experimentalmente las propiedades termofísicas de densidad y viscosidad para las concentraciones de 0.04%, 0.06%, 0.08% y 0.10% en volumen.

En la figura 11 se muestra como la densidad se incrementó hasta en un 0.64% a la mayor concentración experimentalmente estudiada, de 0.10%. Estos resultados fueron

comparados con los estimados partiendo de la correlación de Pak y Cho(Bock Choon Pak, 2013), existe una desviación promedio entre los valores del 0.27% siendo los datos experimentales menores a los de la correlación, esto se atribuyó a la precipitación de las nanopartículas de plata al momento de realizar las pruebas experimentales, por lo cual se propone una correlación propia para estos datos en el rango de 0.04% a 0.10% de concentración en volumen en la ecuación 54 con unidades de kg/m³.

$$\rho_{nf} = 7197 * f_v + 997.18 \quad [54]$$

La viscosidad mostró un incremento máximo, en la concentración de 0.10% volumen, de 5.7% (figura 12). Estos resultados fueron comparados con los estimados partiendo de las correlaciones de Einstein reportadas en Rudyak y Minakov(Rudyak & Minakov, 2018) y también con el trabajo de Batchelor(Batchelor, 1977), que para concentraciones menores a 0.10% dan valores muy cercanos. Existe una desviación promedio entre los valores del 4.6% siendo los datos experimentales mayores a los de la correlación, esto debido a la formación de aglomerados de nanopartículas de plata en el nanofluido, por lo cual se propone una correlación propia para la viscosidad en el rango de 0.04% a 0.10% de concentración en volumen en la ecuación 55 con unidades de Pa s.

$$\mu_{nf} = 0.027 * f_v + 0.0008 \quad [55]$$

El incremento de las propiedades tales como la densidad y la conductividad térmica son factores clave en la búsqueda del mejoramiento del desempeño térmico de sistemas de intercambio de calor utilizando nanofluidos como fluidos para un intercambio de calor más efectivo.

5.2 Intercambiador de Calor de Doble Tubo

El análisis del sistema de intercambiador de calor de doble tubo es realizado desde diversos ángulos, comenzando con el coeficiente global de transferencia de calor, utilizando nanofluidos de oro a concentraciones del 0 a 5% en volumen.

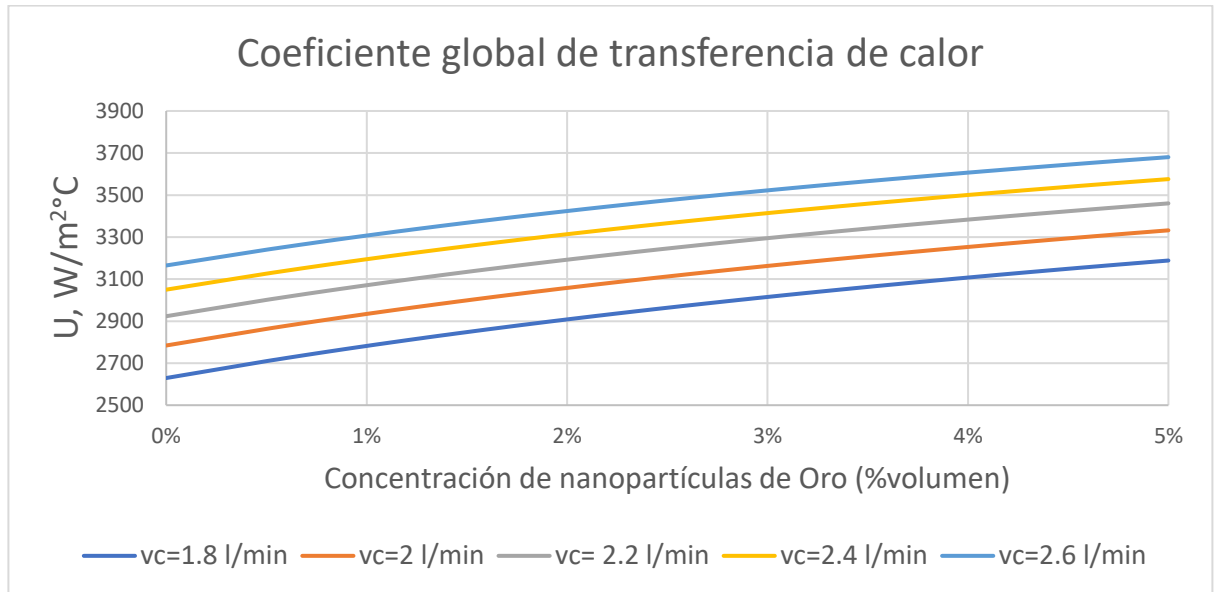


Figura 13. Coeficiente global de transferencia de calor (U) en intercambiador de calor de doble tubo utilizando nanofluidos de oro como fluido de servicio.

De acuerdo con los datos mostrados en la Figura 13 se observó un incremento máximo del 21% en el coeficiente U; este incremento máximo se obtuvo en el flujo volumétrico más bajo trabajado, de 1.8 L/min. Igualmente se observó un incremento por el efecto del aumento del flujo volumétrico del nanofluido, este efecto logró que el coeficiente global de transferencia de calor aumentara en un 20% máximo entre el flujo volumétrico máximo y el mínimo estudiados. Es necesario considerar que en todas las simulaciones las condiciones del fluido que atraviesa el espacio anular, el agua, se

mantuvieron constantes, por lo cual todos los efectos observados en el coeficiente U se atribuyen al nanofluido pasando por el tubo interno.

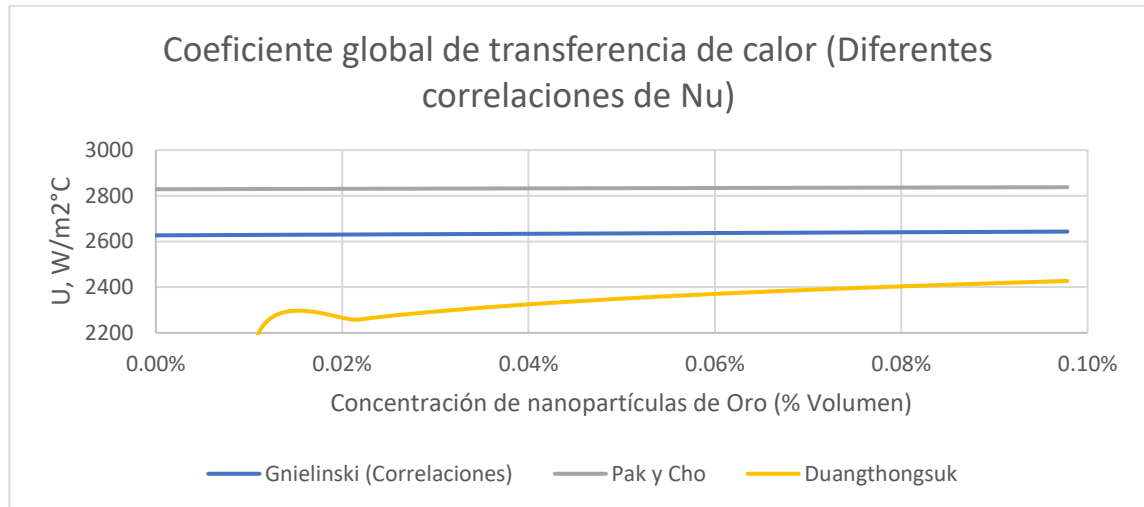


Figura 14. Coeficiente global de transferencia de calor (U) en intercambiador de calor de doble tubo utilizando nanofluidos de oro como fluido de servicio con diferentes correlaciones de número de Nusselt.

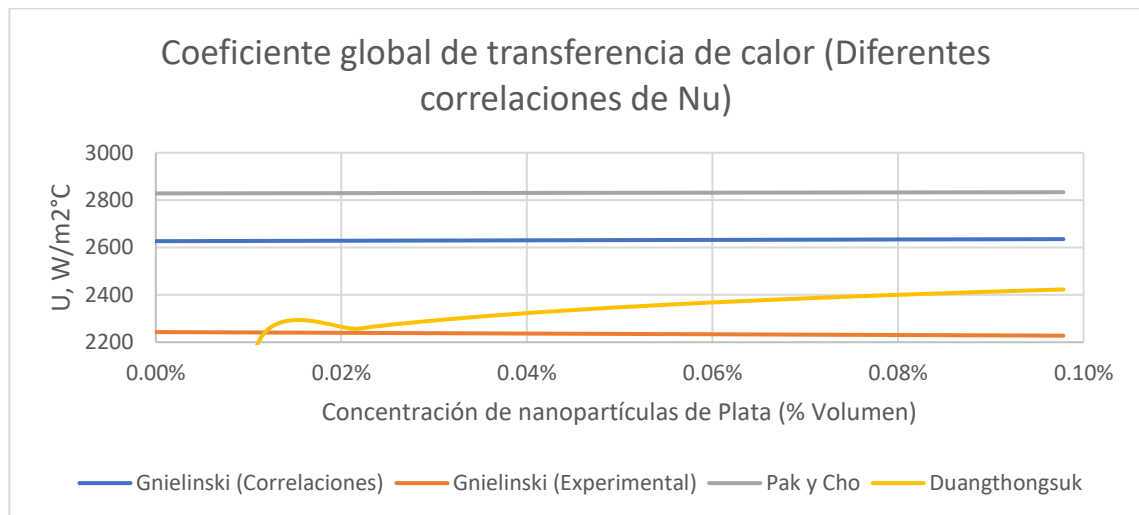


Figura 15. Coeficiente global de transferencia de calor (U) en intercambiador de calor de doble tubo utilizando nanofluidos de plata como fluido de servicio con diferentes correlaciones de número de Nusselt.

Además de utilizar la ecuación de Gnielinski (ecuación 18) en el análisis del tubo interno en la simulación del intercambiador de calor de doble tubo, se comparó con otras correlaciones del número de Nusselt utilizadas en sistemas de intercambio de calor con

nanofluidos como fluidos de servicio. En la figura 14 se muestra el coeficiente global de transferencia de calor utilizando las correlaciones de número de Nusselt reportadas en Pak y Cho (Bock Choon Pak, 2013) y en Duangthongsuk (Duangthongsuk & Wongwises, 2010) en el rango de concentración en volumen de nanopartículas de 0% a 0.1%. Existió una desviación de los resultados con la correlación de Pak y Cho del 8%, mientras que con la correlación de Duangthongsuk fue del 11%. Los parámetros considerados en la relación de Pak y Cho son el número de Reynolds y el número de Prandtl sin considerar el factor de fricción como si lo hace la correlación de Gnielinski, razón por la cual los valores de coeficiente global de transferencia de calor son más altos. La correlación de Duangthongsuk utiliza los mismos parámetros que Pak y Cho sin embargo agrega la fracción volumétrica de nanopartículas, por lo que, a concentraciones bajas, utilizar esta correlación dio valores menores a los de Gnielinski y estos serán más cercanos conforme se incremente esta fracción.

En la figura 15 se realizó una evaluación similar, pero utilizando nanofluidos de plata como fluido de servicio. En este punto se agregó una comparación utilizando los valores resultantes de la determinación experimental de densidad y viscosidad y aplicando la ecuación de Gnielinski de igual manera para estos valores. La desviación entre la utilización de la ecuación de Gnielinski con las propiedades obtenidas de correlaciones experimentales y de las determinadas experimentalmente fue de 17.7% en promedio, y como se puede ver en la figura 7, el coeficiente global de transferencia de calor disminuyó hasta en un 0.7% en el máximo del rango de concentración volumen de nanopartículas analizado, esto debido principalmente al incremento de la viscosidad determinada experimentalmente comparada con la calculada utilizando las correlaciones

experimentales. La desviación entre la utilización de la ecuación de Gnielinski y las correlaciones por Pak y Cho y la utilizada en Duangthongsuk fue similar a la mostrada en el análisis utilizando nanofluidos de oro (figura 14).

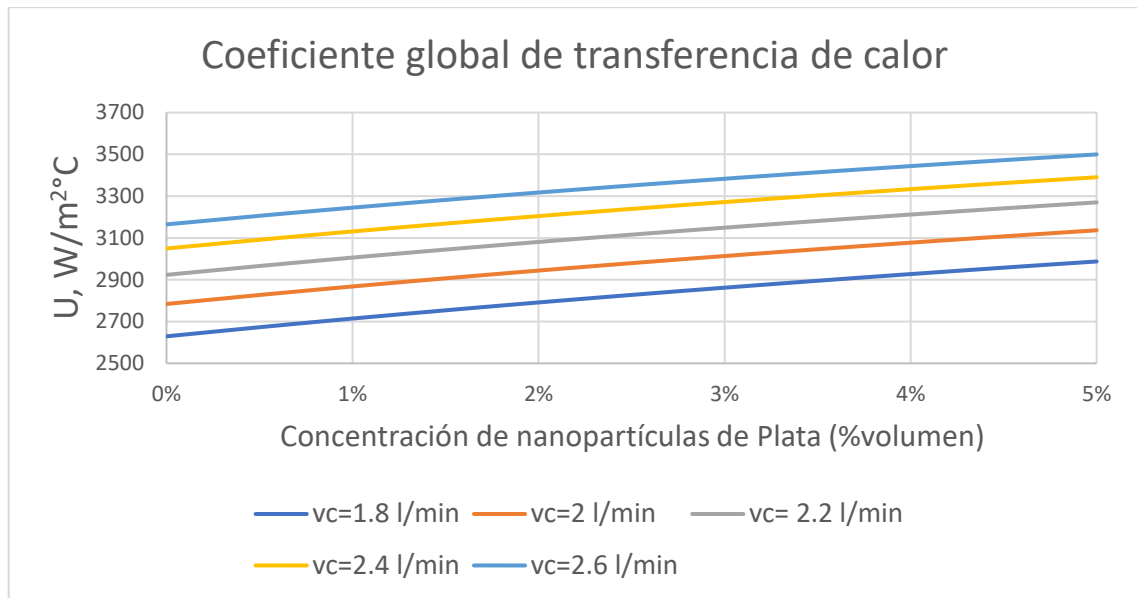


Figura 16. Coeficiente global de transferencia de calor (U) en intercambiador de calor de doble tubo utilizando nanofluidos de plata como fluido de servicio.

Para los nanofluidos de plata el comportamiento se observa similar, en la figura 16 se muestra un incremento máximo de 14% en el coeficiente U, el cual se logra con el flujo volumétrico más bajo trabajado, de 1.8 L/min. Del mismo modo se observa un incremento por el efecto del aumento del flujo volumétrico del nanofluido, este efecto logra que el coeficiente global de transferencia de calor aumente en un 20% máximo entre el flujo volumétrico máximo y el mínimo estudiados.

Para evaluar el sistema de intercambio de calor completo y determinar el efecto de los nanofluidos en la transferencia de calor, se utiliza la efectividad del intercambiador de

calor de doble tubo como parámetro para observar la mejora en los resultados de la operación unitaria.

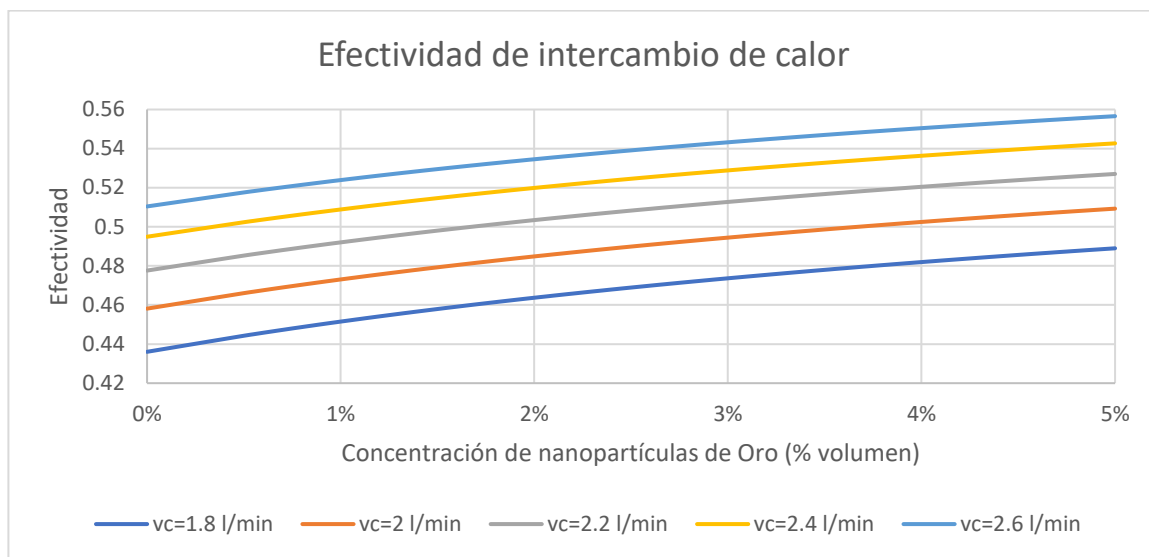


Figura 17. Efectividad en intercambiador de calor de doble tubo utilizando nanofluidos de oro como fluido de servicio.

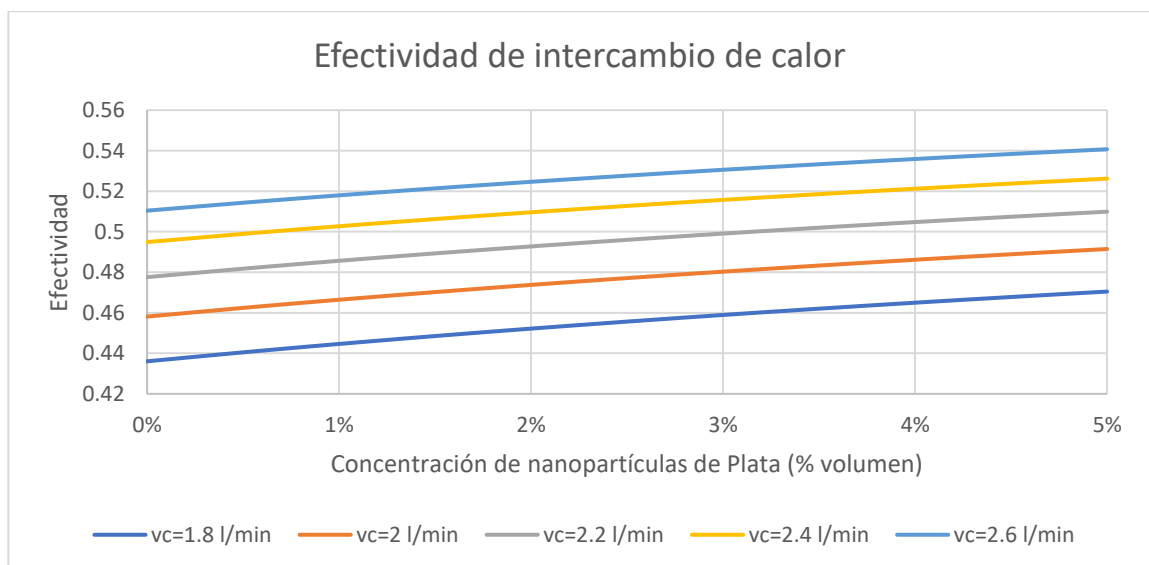


Figura 18. Efectividad en intercambiador de calor de doble tubo utilizando nanofluidos de plata como fluido de servicio.

Utilizando nanofluidos de oro, la efectividad de intercambio de calor incrementa hasta en un 12%, este incremento máximo se obtiene en el flujo volumétrico más bajo trabajado, de 1.8 L/min, como se muestra en la figura 17. El aumento del flujo volumétrico

también trae consigo una mejora en la efectividad de transferencia de calor en el sistema, llegando hasta ser un 17% mayor entre el máximo y el mínimo flujo volumétrico estudiado (figura 17). Teniendo nanofluidos de plata como fluido de servicio en el intercambiador de calor, la efectividad se incrementa un máximo de 8%, dado este resultado en el flujo volumétrico menor estudiado, el aumento del flujo volumétrico incrementa igualmente en un 17% como máximo, similar a su contraparte de nanofluido de oro (figura 18).

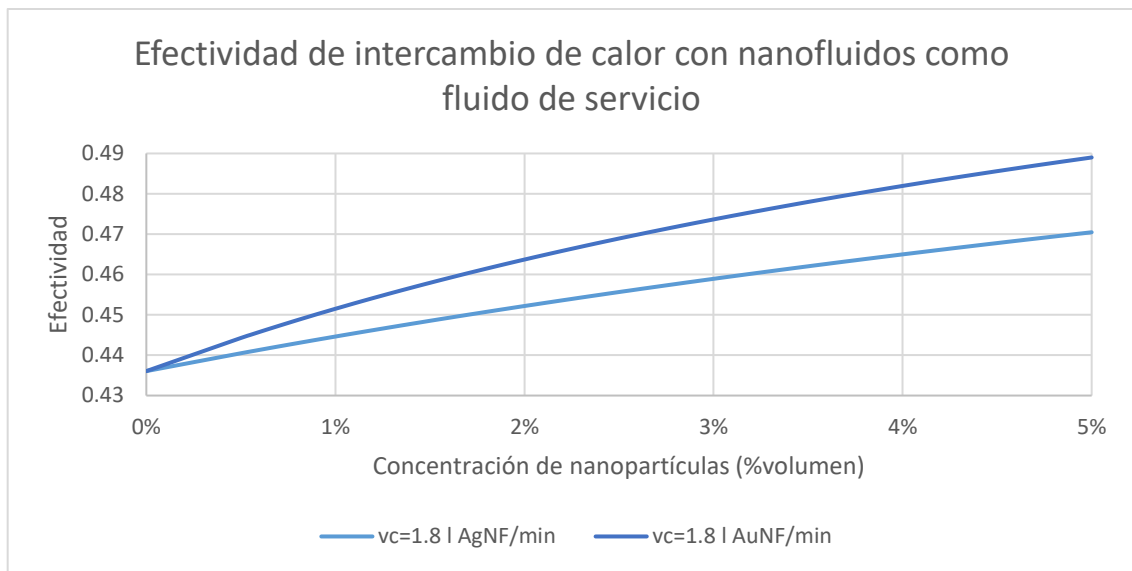


Figura 19. Efectividad en intercambiador de calor de doble tubo utilizando nanofluidos como fluido de servicio.

En la Figura 19 se muestra la comparación entre los nanofluidos de ambos metales con las efectividades resultantes en el intercambiador de calor de doble tubo para un flujo volumétrico de 1.8 L/min, en el punto de concentración máxima de nanopartículas estudiado, la efectividad utilizando el nanofluido de oro es 4% mayor a la efectividad mostrada con el nanofluido de plata.

Utilizando un intercambiador de calor de doble tubo en el sistema agua-nanofluido, el desempeño térmico evaluado a partir del coeficiente global de transferencia de calor y la efectividad de intercambio de calor en el sistema muestra que para ambos

nanofluidos existe un mejoramiento de este desempeño térmico; sin embargo, utilizando nanofluido de oro como fluido de servicio se obtienen incrementos mayores para las concentraciones y flujos volumétricos estudiados, no obstante dado el alto costo de la producción de las nano partículas de oro, es más viable el uso de nanopartículas de plata.

El mejoramiento del desempeño térmico se atribuye a la modificación de las propiedades termofísicas que las nanopartículas ofrecen al fluido base, incrementando la difusividad térmica mejorando la convección y conducción de calor en el nanofluido. Además, el incremento de la densidad favorece la intensificación de la turbulencia en el flujo del fluido, siendo ésta la razón por la cual los nanofluidos de oro obtienen resultados más altos de incrementos en el coeficiente U y la efectividad de intercambio de calor. En el caso específico de la efectividad, entra en competencia el efecto de la disminución de la capacidad calorífica del nanofluido con el incremento de la turbulencia debido al incremento de la densidad, como se observa, existe un incremento en la efectividad para ambos nanofluidos; sin embargo, se ve restringida por la disminución de la capacidad calorífica.

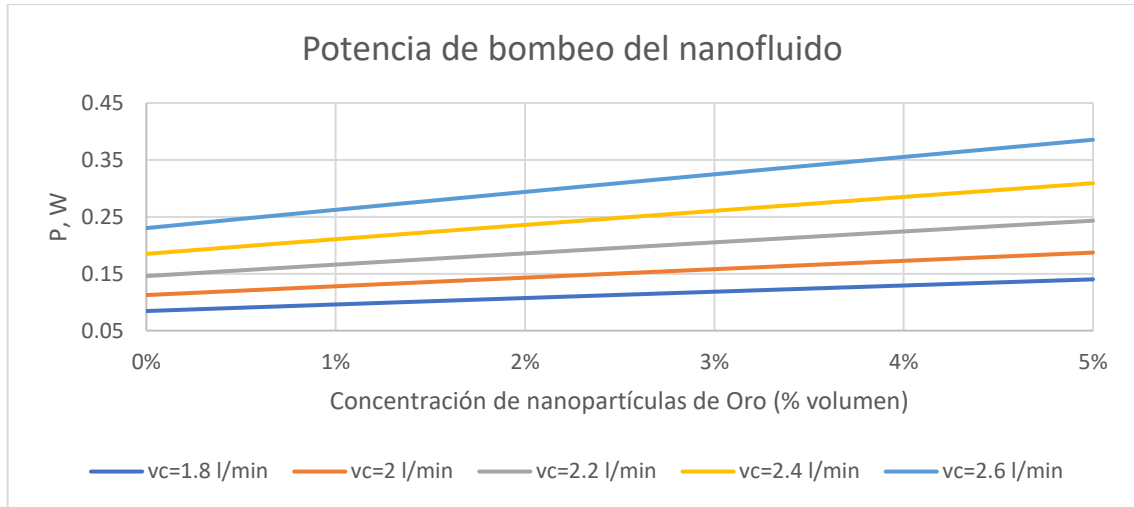


Figura 20. Potencia de bombeo necesaria en el tubo interno utilizando nanofluidos de oro como fluido de servicio.

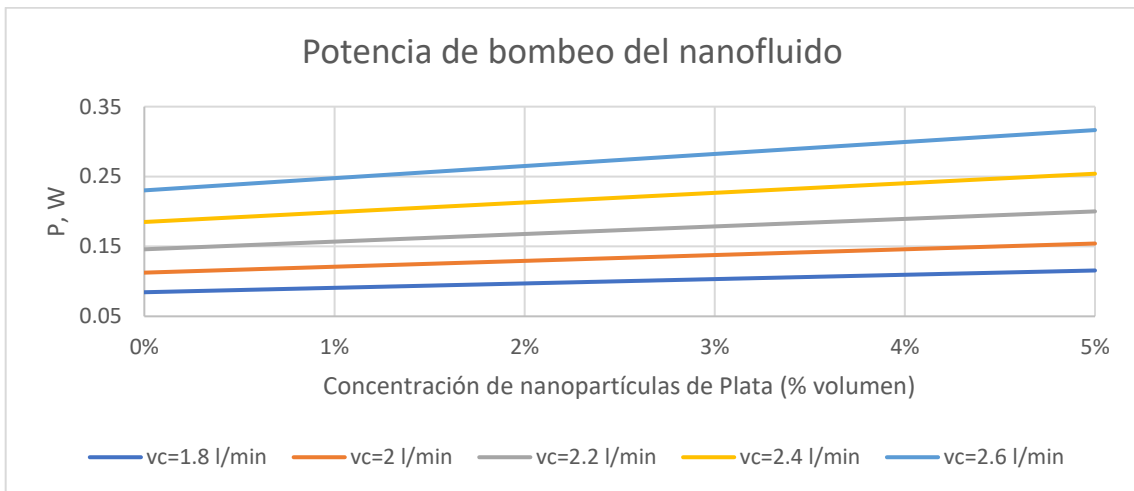


Figura 21. Potencia de bombeo necesaria en el tubo interno utilizando nanofluidos de plata como fluido de servicio.

Otro aspecto para considerar es el incremento de potencia de bombeo necesaria para que fluya el nanofluido dentro del tubo interno, este aspecto se ve incrementado hasta en un 67% para el nanofluido de oro y en un 37% para el nanofluido de plata (figuras 20 y 21) para todos los flujos volumétricos estudiados. Para el flujo volumétrico más alto estudiado de 2.6 L/min la potencia de bombeo se ve incrementada en un 174%, comparado con el flujo volumétrico menor de 1.8 L/min, para ambos nanofluidos. El incremento de

la potencia de bombeo por parte del nanofluido de oro esta igualmente ligado al incremento del número de Reynolds influenciado por el aumento de la densidad del fluido.

5.3 Intercambiador de Calor de Tubos y Coraza

El análisis del sistema de intercambiador de calor de tubos y coraza es realizado considerando los mismos parámetros que el intercambiador de calor de doble tubo, comenzando con el coeficiente global de transferencia de calor en la configuración de 1 paso por la coraza y 1 paso por los tubos.

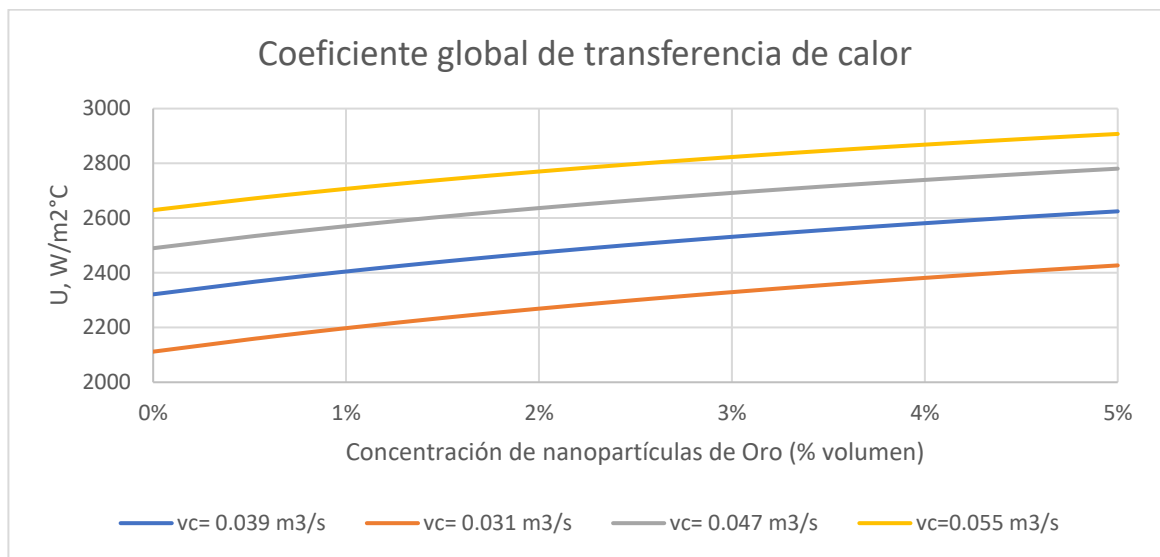


Figura 22. Coeficiente global de transferencia de calor (U) en intercambiador de calor de tubos y coraza (1 paso por la coraza y 1 paso por los tubos) utilizando nanofluidos de oro como fluido de servicio.

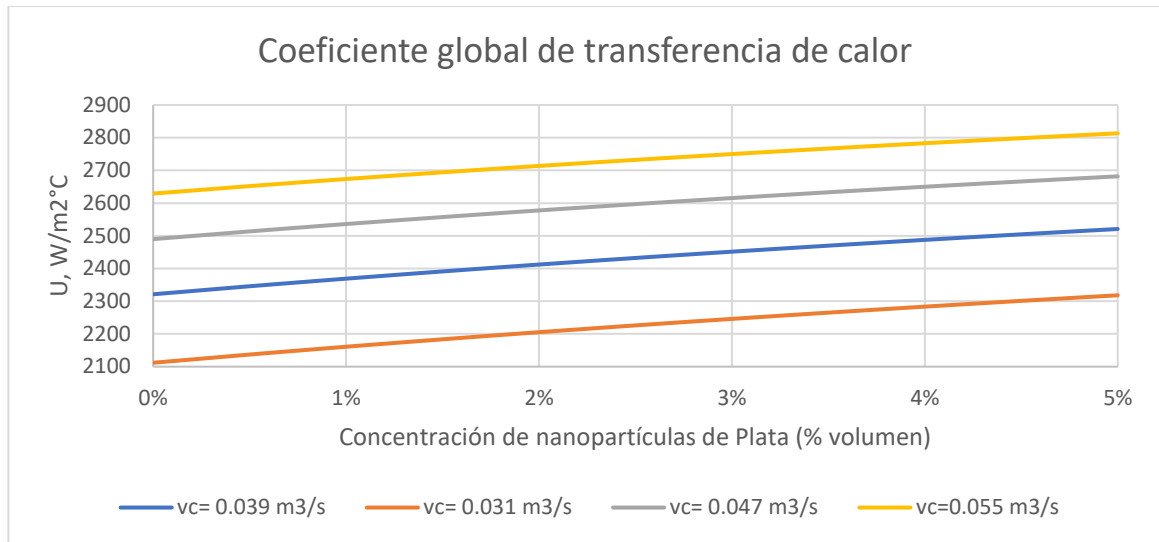


Figura 23. Coeficiente global de transferencia de calor (U) en intercambiador de calor de tubos y coraza (1 paso por la coraza y 1 paso por los tubos) utilizando nanofluidos de plata como fluido de servicio.

Utilizando nanofluidos de oro a concentraciones del 0 a 5% en volumen, se estima un incremento máximo del 15% en el coeficiente U (figura 22), este incremento máximo se obtiene en el flujo volumétrico más bajo trabajado, de $0.031 \text{ m}^3/\text{s}$. Del mismo modo se observa un incremento por el efecto del aumento del flujo volumétrico del nanofluido, con lo que se logra que el coeficiente global de transferencia de calor aumente en un 24% máximo entre el flujo volumétrico máximo y el mínimo estudiados. Las condiciones del fluido que fluye por la coraza, el agua, fueron constantes, es decir, todos los efectos observados se atribuyen al nanofluido pasando por los tubos del intercambiador de calor.

Para el nanofluido de plata el incremento calculado resulto en un máximo del 10%, igualmente este se da en el flujo volumétrico más bajo trabajado, de $0.031 \text{ m}^3/\text{s}$ (figura 23). El efecto del flujo volumétrico en el coeficiente U es igual al observado en el nanofluido de oro.

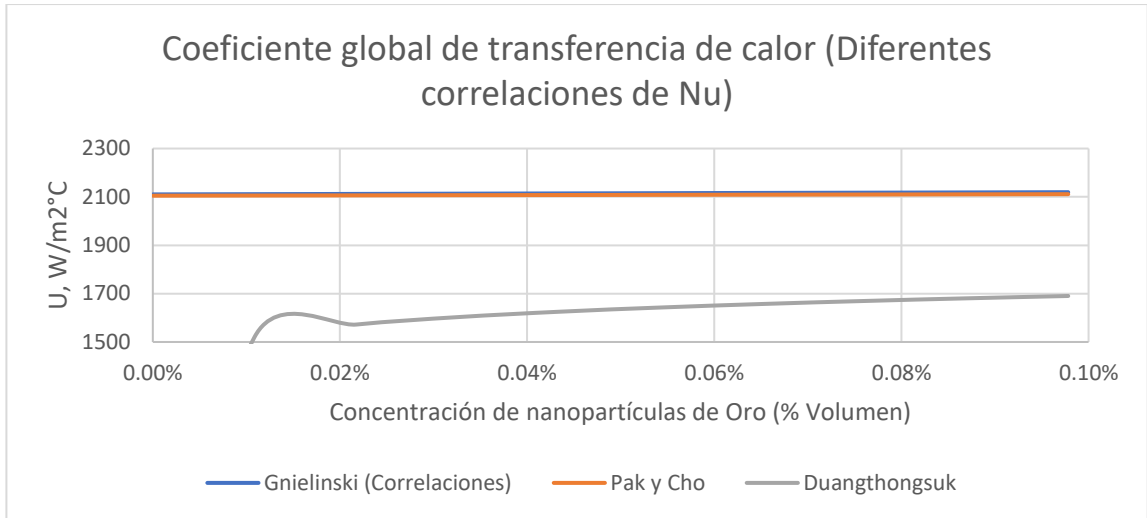


Figura 24. Coeficiente global de transferencia de calor (U) en intercambiador de calor de tubos y coraza (1 paso por la coraza y 1 paso por los tubos) utilizando nanofluidos de oro como fluido de servicio con diferentes correlaciones de número de Nusselt.

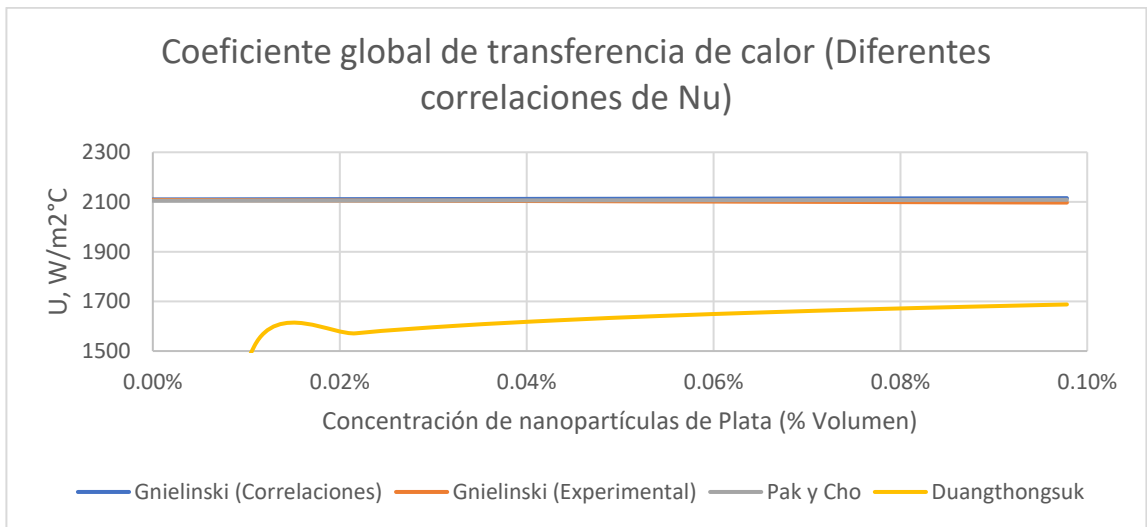


Figura 25. Coeficiente global de transferencia de calor (U) en intercambiador de calor de tubos y coraza (1 paso por la coraza y 1 paso por los tubos) utilizando nanofluidos de plata como fluido de servicio con diferentes correlaciones de número de Nusselt.

Además de utilizar la ecuación de Gnielinski (ecuación 18) en el análisis de los tubos en la simulación del intercambiador de calor de tubos y coraza (1 paso por la coraza y 1 paso por los tubos), se comparó con otras correlaciones del número de Nusselt utilizadas en sistemas de intercambio de calor con nanofluidos como fluidos de servicio. En la figura 24 se muestra el coeficiente global de transferencia de calor utilizando las

correlaciones de número de Nusselt reportadas en Pak y Cho (Bock Choon Pak, 2013) y en Duangthongsuk (Duangthongsuk & Wongwises, 2010) en el rango de concentración en volumen de nanopartículas de 0% a 0.1%. Existió una desviación de los resultados con la correlación de Pak y Cho del 0.3%, mientras que con la correlación de Duangthongsuk fue del 23%. Los parámetros considerados en la relación de Pak y Cho son el número de Reynolds y el número de Prandtl sin considerar el factor de fricción como si lo hace la correlación de Gnielinski, los números de Reynolds altos utilizados en este trabajo y la alta dependencia de las correlaciones del número de Nusselt de Pak y Cho, y de Gnielinski permitieron que la desviación fuera muy baja. La correlación de Duangthongsuk utiliza los mismos parámetros que Pak y Cho sin embargo agrega la fracción volumétrica de nanopartículas, por lo que, a concentraciones bajas, utilizar esta correlación dio valores menores a los de Gnielinski y estos serán más cercanos conforme se incremente esta fracción.

En la figura 25 se realizó una evaluación similar, pero utilizando nanofluidos de plata como fluido de servicio. En este punto se agregó una comparación utilizando los valores resultantes de la determinación experimental de densidad y viscosidad y aplicando la ecuación de Gnielinski de igual manera para estos valores. La desviación entre la utilización de la ecuación de Gnielinski con las propiedades obtenidas de correlaciones experimentales y de las determinadas experimentalmente fue de 0.6% en promedio, el coeficiente global de transferencia de calor disminuyó hasta en un 0.5% en el máximo del rango de concentración volumen de nanopartículas analizado, esto debido principalmente al incremento de la viscosidad determinada experimentalmente comparada con la calculada utilizando las correlaciones experimentales. La desviación entre la utilización

de la ecuación de Gnielinski y las correlaciones por Pak y Cho y la utilizada en Duangthongsuk fue similar a la mostrada en el análisis utilizando nanofluidos de oro (figura 24).

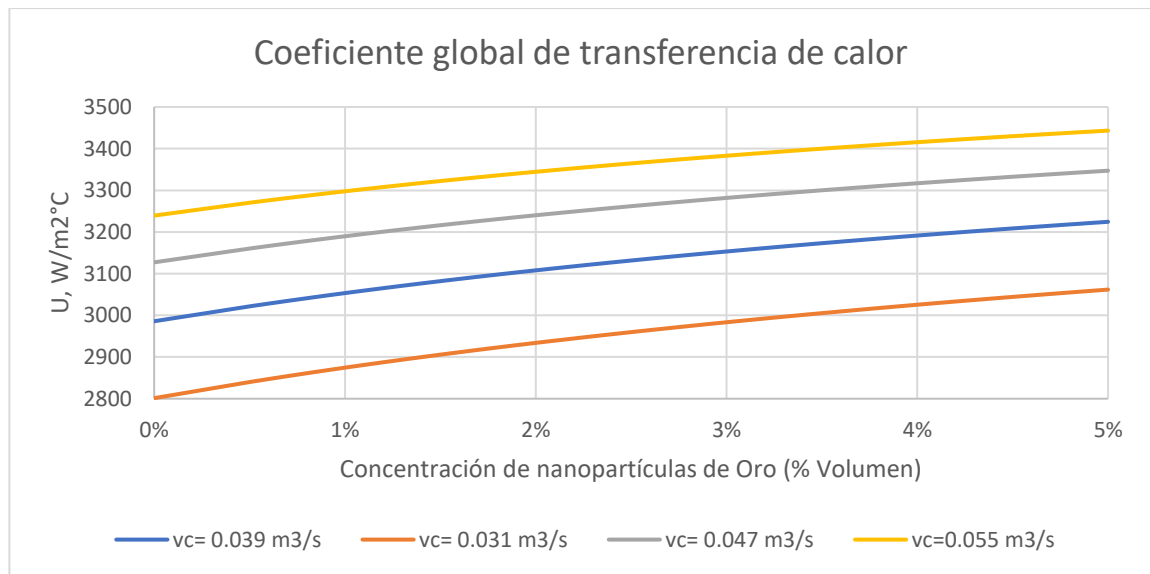


Figura 26. Coeficiente global de transferencia de calor (U) en intercambiador de calor de tubos y coraza (1 paso por la coraza y 2 pasos por los tubos) utilizando nanofluidos de oro como fluido de servicio.

Modificando la geometría del intercambiador de calor, de un paso por la coraza y 1 paso por los tubo a 1 paso por la coraza y 2 pasos por los tubos, para los nanofluidos de oro en los tubos se observó un incremento máximo del 9% en el coeficiente U (Figura 26), este incremento máximo se fue logrado con el flujo volumétrico más bajo estudiado de 0.031 m³/s, además se muestra un incremento por el efecto del aumento del flujo volumétrico del nanofluido, este efecto logró que el coeficiente global de transferencia de calor aumente en un 15% máximo entre el flujo volumétrico máximo y el mínimo estudiados. Para el nanofluido de plata el incremento calculado resultó en un máximo del

6%, igualmente este se da en el flujo volumétrico más bajo trabajado, de $0.031 \text{ m}^3/\text{s}$ (figura 27). El efecto del flujo volumétrico en el coeficiente U es igual al observado en el nanofluido de oro.

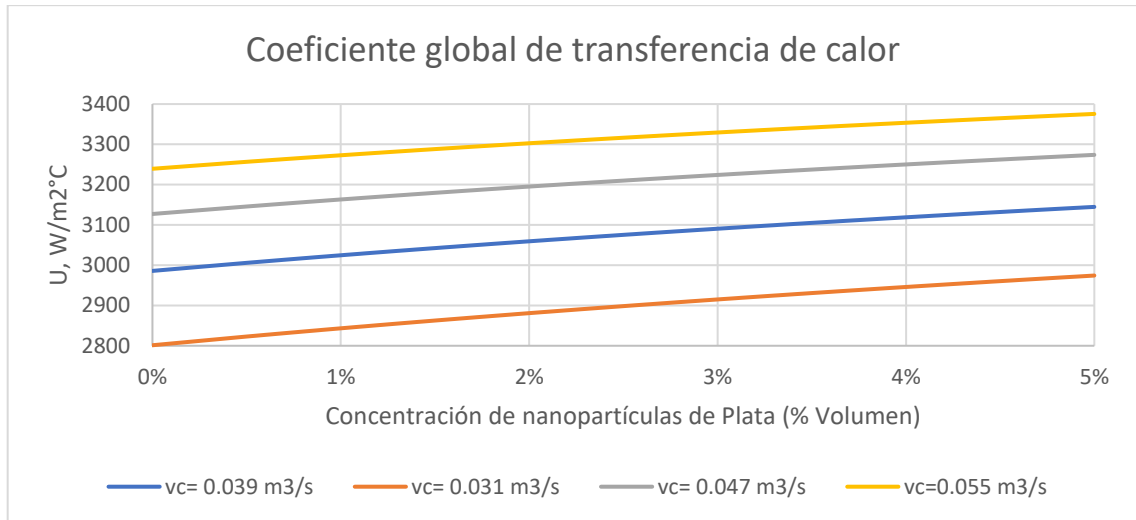


Figura 27. Coeficiente global de transferencia de calor (U) en intercambiador de calor de tubos y coraza (1 paso por la coraza y 2 pasos por los tubos) utilizando nanofluidos de plata como fluido de servicio.

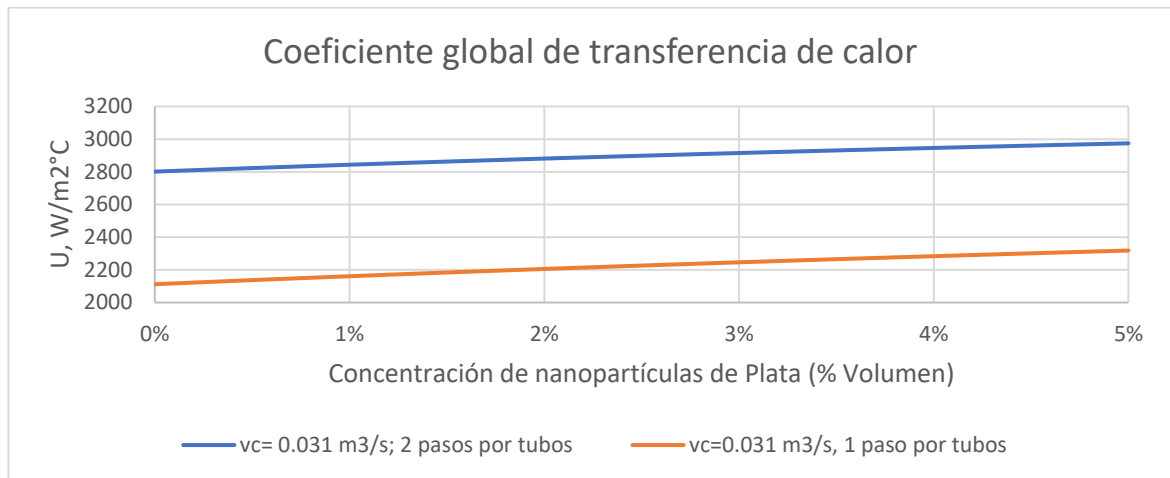


Figura 28. Coeficiente global de transferencia de calor (U) en intercambiador de calor de tubos y coraza utilizando nanofluidos de plata como fluido de servicio.

Para el flujo volumétrico más bajo estudiado de $0.031 \text{ m}^3/\text{s}$, con el nanofluido de plata, se estudia el efecto de la geometría del intercambiador de calor de tubos y coraza

(figura 28); de acuerdo con los datos mostrados se observan valores más altos de coeficiente U , hasta un 34% mayor para la configuración de 2 pasos por los tubos; sin embargo, el efecto de las nanopartículas en el nanofluido es menor en esta configuración, ya que sólo existe una mejoría de este coeficiente en un 6% con la concentración máxima de nanopartículas de 5% en volumen; comparado con el 10% de incremento mostrado en la configuración de 1 sólo paso por los tubos.

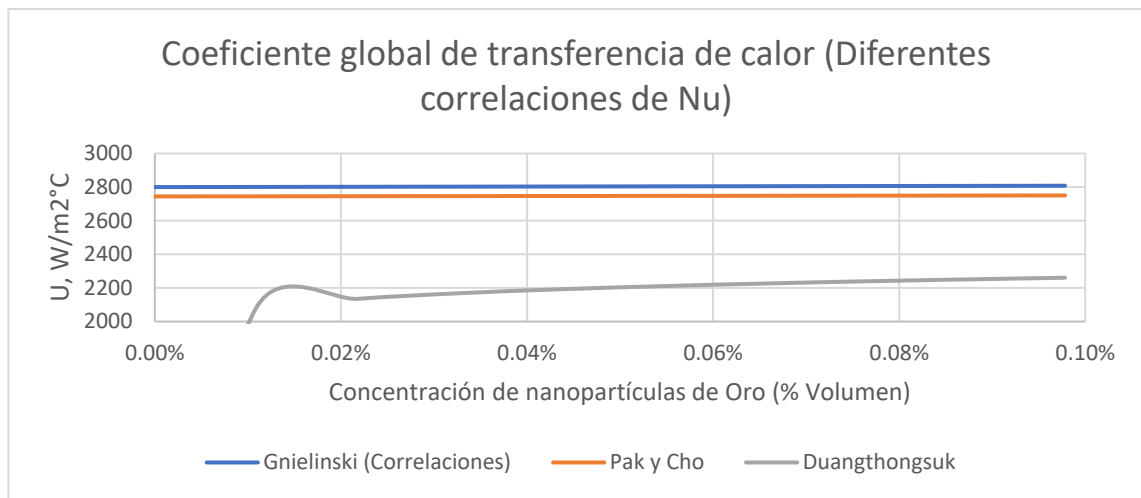


Figura 29. Coeficiente global de transferencia de calor (U) en intercambiador de calor de tubos y coraza (1 paso por la coraza y 2 pasos por los tubos) utilizando nanofluidos de oro como fluido de servicio con diferentes correlaciones de número de Nusselt.

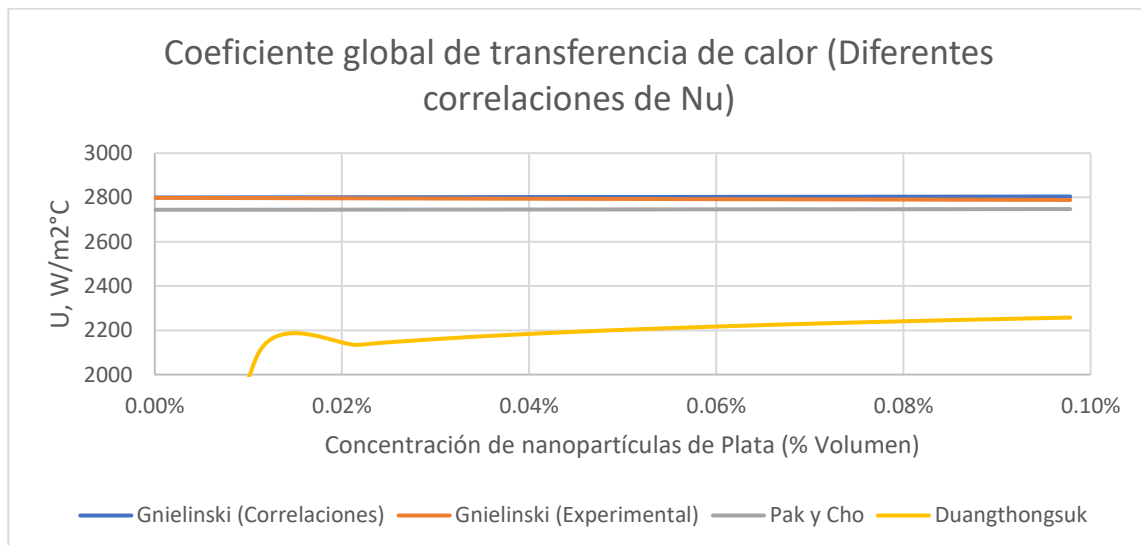


Figura 30. Coeficiente global de transferencia de calor (U) en intercambiador de calor de

tubos y coraza (1 paso por la coraza y 2 pasos por los tubos) utilizando nanofluidos de plata como fluido de servicio con diferentes correlaciones de número de Nusselt.

Además de utilizar la ecuación de Gnielinski (ecuación 18) en el análisis de los tubos en la simulación del intercambiador de calor de tubos y coraza (1 paso por la coraza y 2 pasos por los tubos), se comparó con otras correlaciones del número de Nusselt utilizadas en sistemas de intercambio de calor con nanofluidos como fluidos de servicio. En la figura 29 se muestra el coeficiente global de transferencia de calor utilizando las correlaciones de número de Nusselt reportadas en Pak y Cho (Bock Choon Pak, 2013) y en Duangthongsuk (Duangthongsuk & Wongwises, 2010) en el rango de concentración en volumen de nanopartículas de 0% a 0.1%. Existió una desviación de los resultados con la correlación de Pak y Cho del 2%, mientras que con la correlación de Duangthongsuk fue del 22%. Los parámetros considerados en la relación de Pak y Cho son el número de Reynolds y el número de Prandtl sin considerar el factor de fricción como si lo hace la correlación de Gnielinski, los números de Reynolds altos utilizados en este trabajo y la alta dependencia de las correlaciones del número de Nusselt de Pak y Cho, y de Gnielinski permitieron que la desviación fuera muy baja. La correlación de Duangthongsuk utiliza los mismos parámetros que Pak y Cho sin embargo agrega la fracción volumétrica de nanopartículas, por lo que, a concentraciones bajas, utilizar esta correlación dio valores menores a los de Gnielinski y estos serán más cercanos conforme se incremente esta fracción.

En la figura 30 se realizó una evaluación similar, pero utilizando nanofluidos de plata como fluido de servicio. En este punto se agregó una comparación utilizando los valores resultantes de la determinación experimental de densidad y viscosidad y aplicando

la ecuación de Gnielinski de igual manera para estos valores. La desviación entre la utilización de la ecuación de Gnielinski con las propiedades obtenidas de correlaciones experimentales y de las determinadas experimentalmente fue de 0.3% en promedio, el coeficiente global de transferencia de calor disminuyó hasta en un 0.4% en el máximo del rango de concentración volumen de nanopartículas analizado, esto debido principalmente al incremento de la viscosidad determinada experimentalmente comparada con la calculada utilizando las correlaciones experimentales. La desviación entre la utilización de la ecuación de Gnielinski y las correlaciones por Pak y Cho y la utilizada en Duangthongsuk fue similar a la mostrada en el análisis utilizando nanofluidos de oro (figura 29).

El mejoramiento del coeficiente global de transferencia de calor es atribuido a la modificación de las propiedades termofísicas que las nanopartículas ofrecen al fluido base, incrementando la difusividad térmica mejorando la convección y conducción de calor en el nanofluido. Además, el incremento de la densidad favorece la intensificación de la turbulencia en el flujo del fluido, siendo esta la razón por la cual con los nanofluidos de oro se logran resultados más altos de incrementos en el coeficiente U . Se obtienen mayores valores de coeficiente U para la configuración con 2 pasos por los tubos debido al régimen de flujo que se alcanza al incrementar la velocidad del fluido en los tubos, la cual incrementa la turbulencia y favorece el intercambio de calor; sin embargo, el efecto de las nanopartículas es menor en esta configuración, comparada con la configuración de 1 sólo paso por los tubos, esto puede atribuirse a la relación no lineal entre los valores del número de Reynolds y el factor de fricción que impactan directamente los números de Nusselt y coeficientes de transferencia de calor por convección en los tubos.

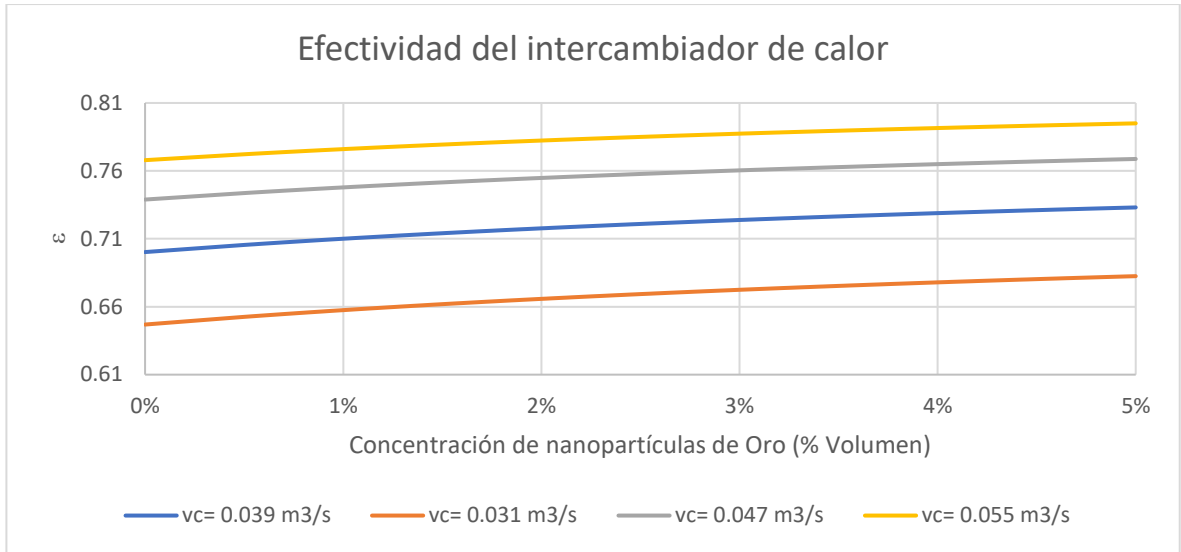


Figura 31. Efectividad en intercambiador de calor de tubos y coraza (1 paso por los tubos y 1 paso por la coraza) utilizando nanofluidos de oro como fluido de servicio.

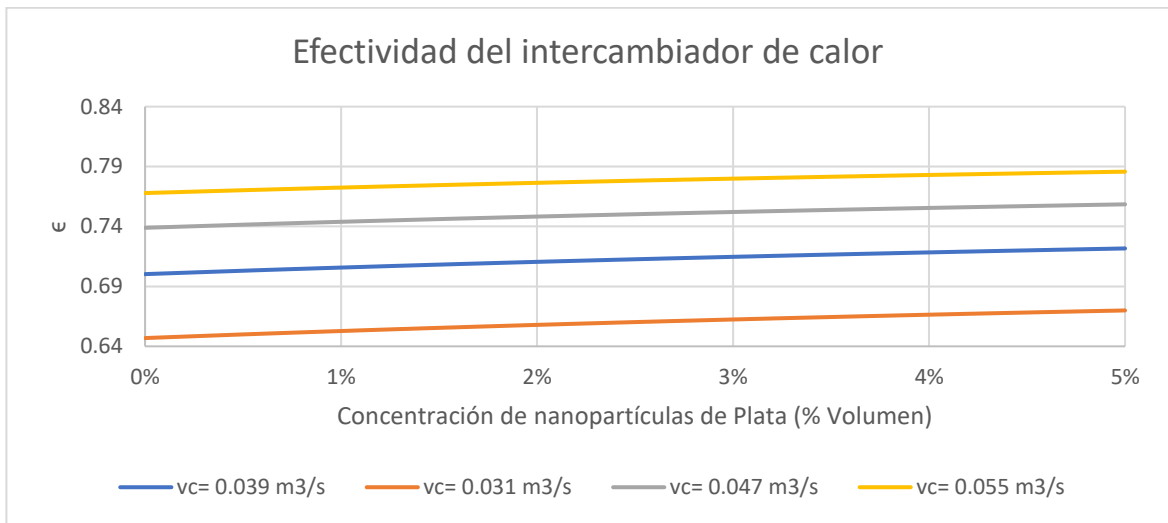


Figura 32. Efectividad en intercambiador de calor de tubos y coraza (1 paso por los tubos y 1 paso por la coraza) utilizando nanofluidos de plata como fluido de servicio.

Al igual que con el intercambiador de doble tubo, para evaluar el sistema de intercambio de calor completo y determinar el impacto de los nanofluidos en la transferencia de calor, se utiliza la efectividad del intercambiador de calor de tubos y coraza como parámetro para observar la mejora en los resultados de la operación unitaria. Mediante el uso de nanofluidos de oro, en el intercambiador de calor de tubos y coraza de

1 paso por los tubos y paso por la coraza, la efectividad de intercambio de calor incrementa hasta en un 6%, este incremento máximo se obtiene en el flujo volumétrico más bajo trabajado, de 0.031 m³/s (figura 31). El aumento del flujo volumétrico también genera una mejora en la efectividad de transferencia de calor en el sistema, llegando hasta ser un 18% mayor entre el máximo y el mínimo flujo volumétrico estudiado (figura 31). Teniendo nanofluidos de plata como fluido de servicio en el intercambiador de calor, la efectividad se incrementa en un máximo 4%, dado este resultado en el mismo flujo volumétrico menor (figura 32).

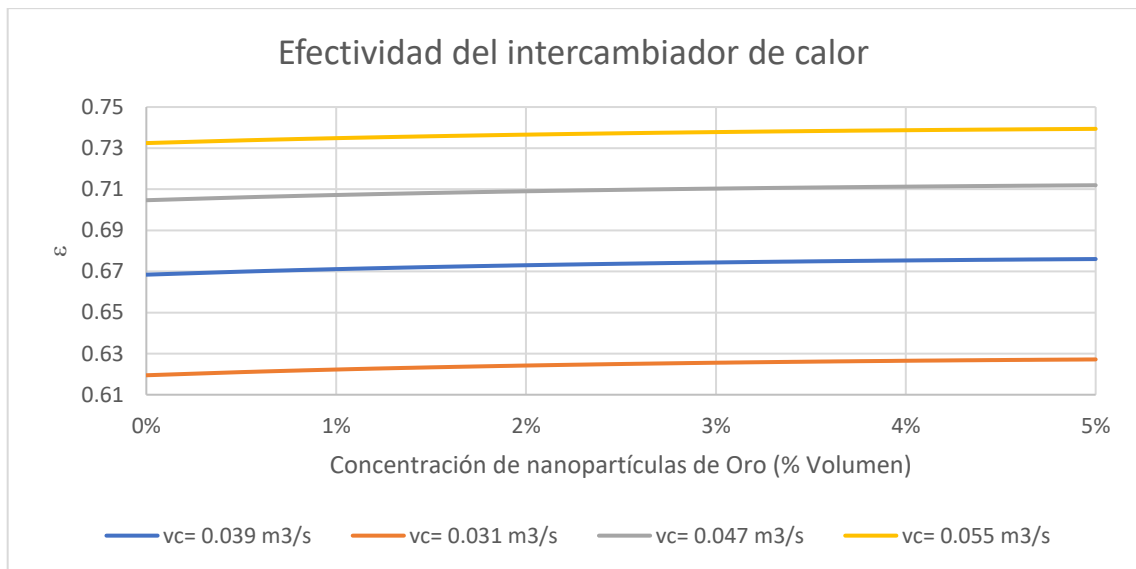


Figura 33. Efectividad en intercambiador de calor de tubos y coraza (2 pasos por los tubos y 1 paso por la coraza) utilizando nanofluidos de oro como fluido de servicio.

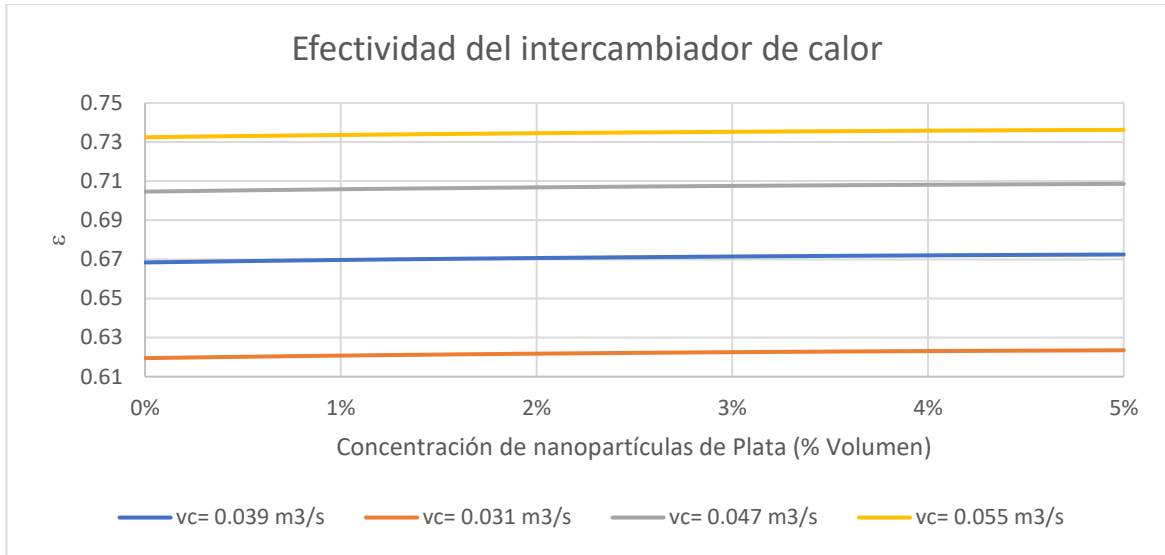


Figura 34. Efectividad en intercambiador de calor de tubos y coraza (2 pasos por los tubos y 1 paso por la coraza) utilizando nanofluidos de plata como fluido de servicio.

Para la geometría con 2 pasos por los tubos y 1 paso por la coraza, con el nanofluido de oro como fluido de servicio, la efectividad de intercambio de calor incrementa sólo en un 1.2%, este incremento máximo se obtiene en el flujo volumétrico más bajo trabajado, de 0.031 m³/s (figura 33). Teniendo nanofluidos de plata como fluido de servicio en el intercambiador de calor, la efectividad se incrementa en un máximo 0.6%, dado este resultado en el mismo flujo volumétrico menor (figura 34).

De manera similar con lo observado en el coeficiente U, el efecto de las nanopartículas en la efectividad de intercambio de calor es menor con la geometría de 2 pasos por los tubos y 1 paso por la coraza comparado con la geometría de 1 paso por los tubos y 1 paso por la coraza. Además, para ambos nanofluidos bajo todas las condiciones, la efectividad de intercambio de calor con la geometría de 1 paso por los tubos y 1 paso en la coraza es mayor al de la geometría con 2 pasos en los tubos y 1 en la coraza.

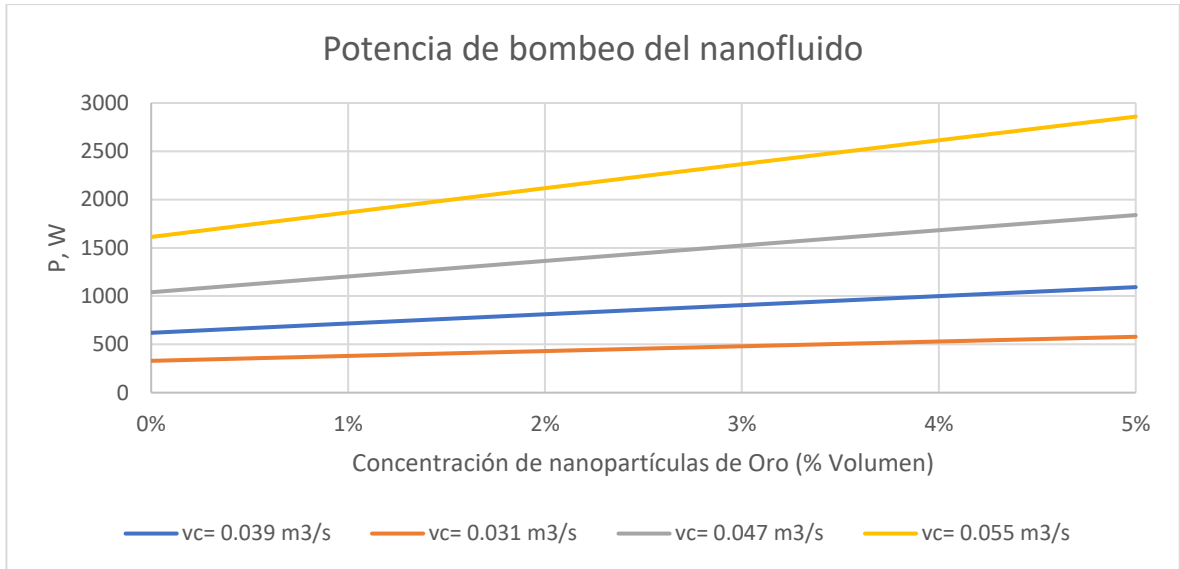


Figura 35. Potencia de bombeo necesaria en los tubos utilizando nanofluidos de oro como fluido de servicio en un intercambiador de calor de tubos y coraza (1 paso por los tubos y 1 paso por la coraza).

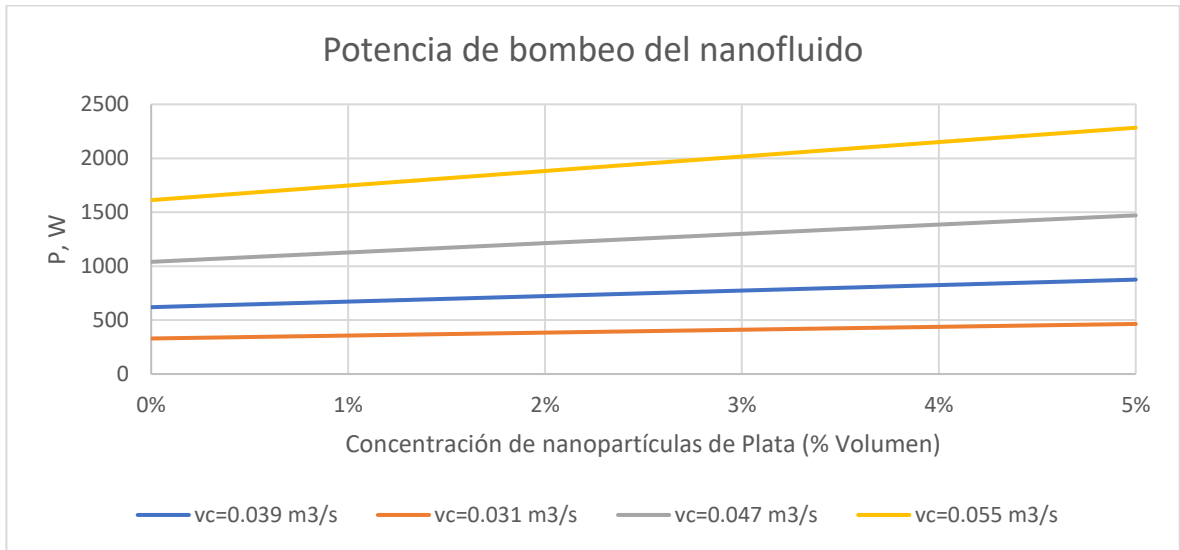


Figura 36. Potencia de bombeo necesaria en los tubos utilizando nanofluidos de plata como fluido de servicio en un intercambiador de calor de tubos y coraza (1 paso por los tubos y 1 paso por la coraza).

Completando el análisis de estos sistemas de intercambio de calor es necesario considerar el incremento de potencia de bombeo necesaria para que fluya el nanofluido dentro de los tubos. Para la geometría con 1 paso por los tubos y 1 paso por la coraza este aspecto se ve incrementado hasta en un 77% para el nanofluido de oro y en un 41% para

el nanofluido de plata (figuras 35 y 36) para todos los flujos volumétricos estudiados. Para el flujo volumétrico más alto estudiado, $0.055 \text{ m}^3/\text{s}$, la potencia de bombeo se ve incrementada en un 394%, comparado con el flujo volumétrico menor de $0.031 \text{ m}^3/\text{s}$, para ambos nanofluidos.

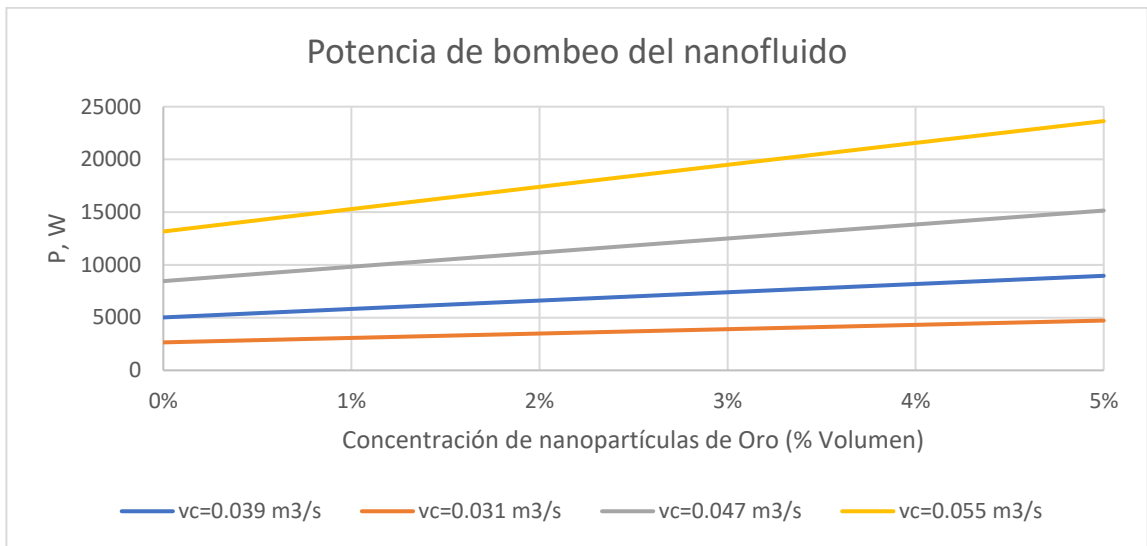


Figura 37. Potencia de bombeo necesaria en los tubos utilizando nanofluidos de oro como fluido de servicio en un intercambiador de calor de tubos y coraza (2 pasos por los tubos y 1 paso por la coraza).

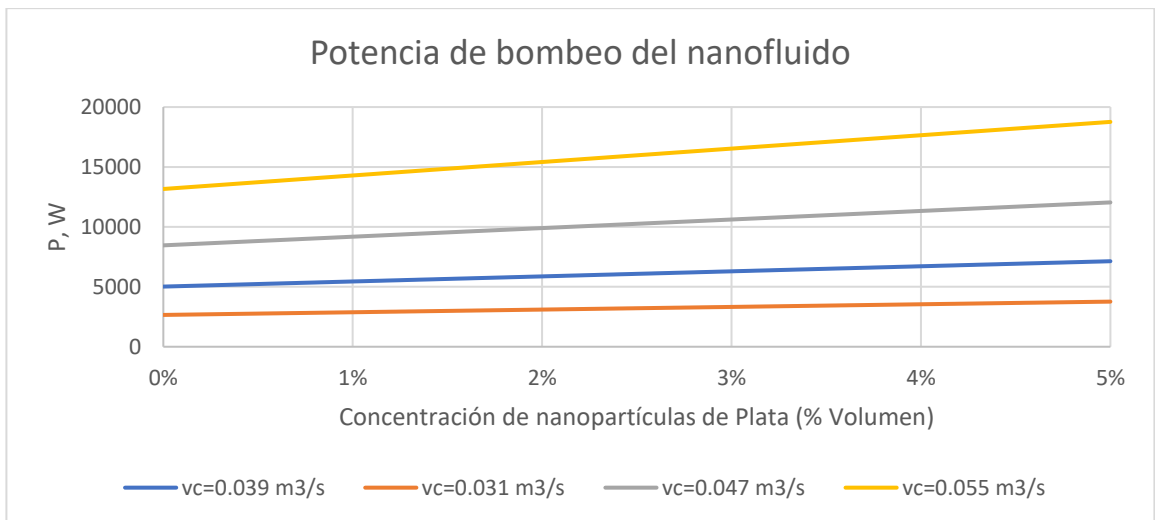


Figura 38. Potencia de bombeo necesaria en los tubos utilizando nanofluidos de plata como fluido de servicio en un intercambiador de calor de tubos y coraza (2 pasos por los tubos y 1 paso por la coraza).

Para la geometría con 2 pasos por los tubos y 1 paso por la coraza este aspecto se ve incrementado hasta en un 80% para el nanofluido de oro y en un 43% para el nanofluido de plata (figuras 37 y 38) para todos los flujos volumétricos estudiados. Para el flujo volumétrico más alto estudiado, $0.055 \text{ m}^3/\text{s}$, la potencia de bombeo se ve incrementada en un 401%, comparado con el flujo volumétrico menor de $0.031 \text{ m}^3/\text{s}$, para ambos nanofluidos.

Para ambos nanofluidos, la potencia de bombeo necesaria en el rango de concentraciones estudiado es entre 700% y 730% mayor para la configuración de 2 pasos por los tubos y 1 paso por la coraza que para la configuración que cuenta sólo con 1 paso por los tubos y 1 paso por la coraza.

El incremento, en mayor medida, de la potencia de bombeo por parte del nanofluido de oro esta igualmente ligado al incremento del número de Reynolds influenciado por el aumento de la densidad del fluido. Mientras que el efecto del incremento de la potencia de bombeo por el flujo volumétrico y la geometría del intercambiador de calor está dictado por el incremento de la velocidad en los tubos.

5.4 Análisis Económico

5.4.1 Intercambiador de Calor de Doble Tubo

En las figuras 39 y 40 se muestran los resultados de los beneficios energéticos de la utilización de estos nanofluidos.

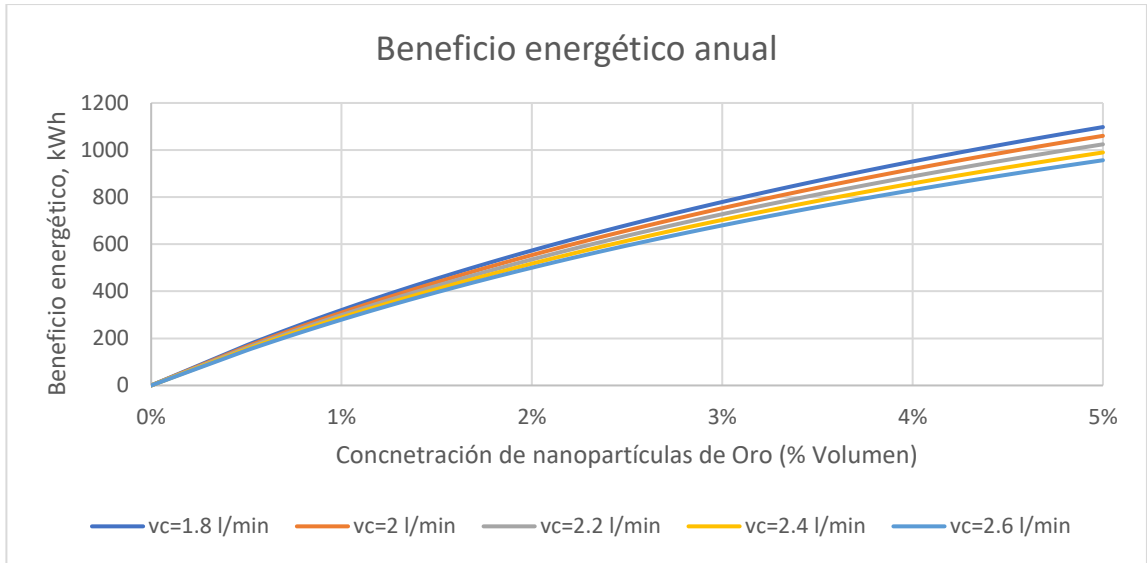


Figura 39. Beneficio energético logrado al utilizar nanofluidos de oro como fluido de servicio en un intercambiador de calor de doble tubo.

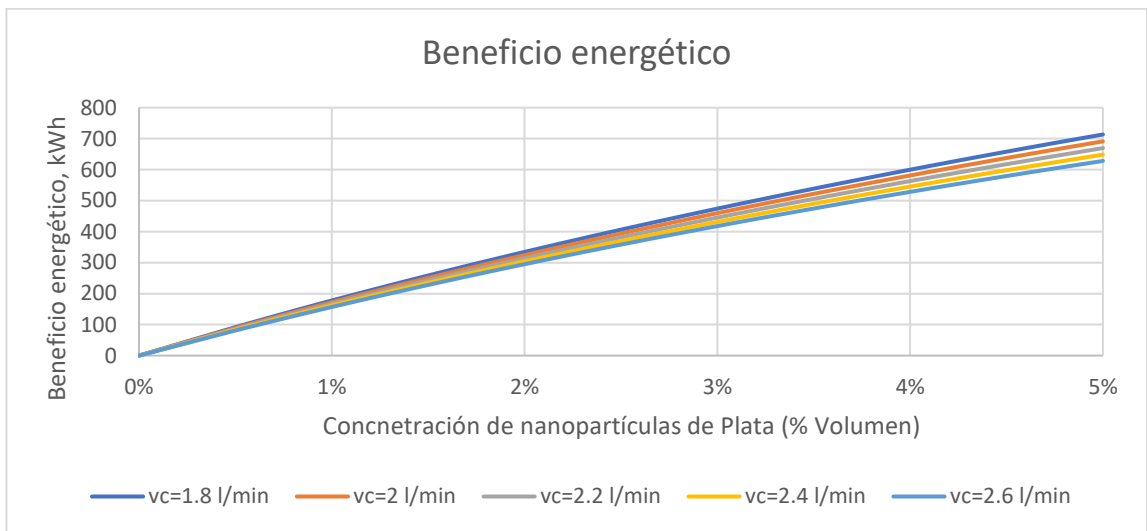


Figura 40. Beneficio energético logrado al utilizar nanofluidos de plata como fluido de servicio en un intercambiador de calor de doble tubo.

Considerando que un intercambiador de calor de doble tubo pueda trabajar 300 días al año, 24 horas diarias, el ahorro energético está dado como se muestra en las figuras 39 y 40. Para ambos nanofluidos el beneficio energético es mayor al menor flujo volumétrico estudiado, comparado con el mayor flujo volumétrico, en un 15% y 14% para el nanofluido de oro y el nanofluido de plata, respectivamente. El máximo beneficio

energético para el nanofluido de oro es de 1097 kWh anuales, mientras que para el nanofluido de plata es de 713 kWh anuales, en referencia al fluido base, el agua, al menor flujo volumétrico y máxima concentración estudiadas.

El beneficio energético de la utilización de estos nanofluidos está estrechamente ligado al beneficio económico que estos generan al sustituir el uso de energía eléctrica para llevar a cabo operaciones de transferencia de calor que satisfagan las mismas necesidades térmicas que estos nanofluidos cumplen en sistemas de intercambio de calor.

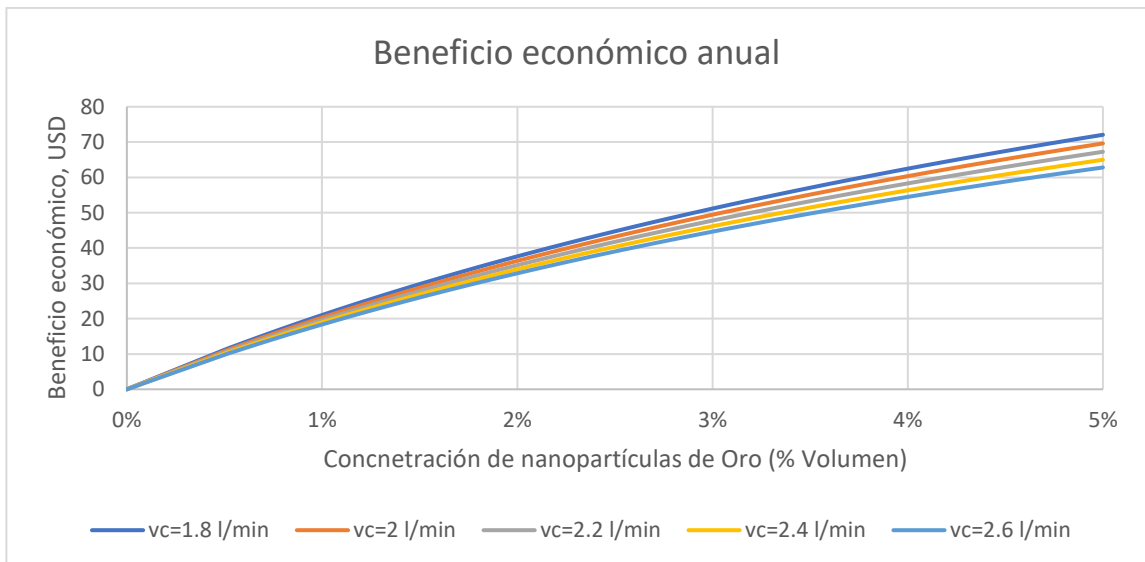


Figura 41. Beneficio económico logrado al utilizar nanofluidos de oro como fluido de servicio en un intercambiador de calor de doble tubo.

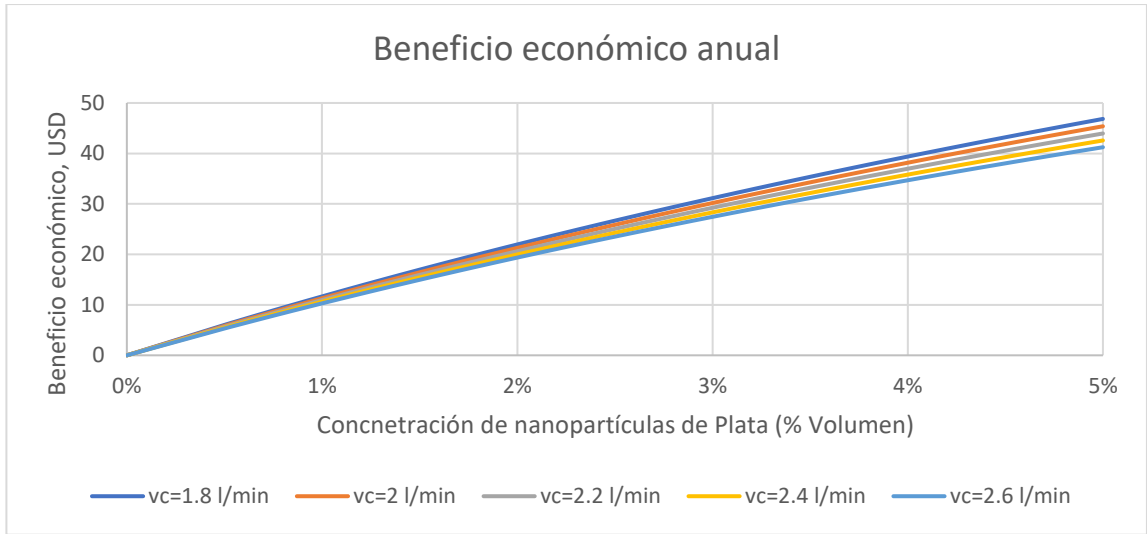


Figura 42. Beneficio económico logrado al utilizar nanofluidos de plata como fluido de servicio en un intercambiador de calor de doble tubo.

El máximo beneficio económico para el nanofluido de oro es de 72 USD anuales, mientras que para el nanofluido de plata es de 46 USD anuales, en referencia al fluido base, el agua (figuras 41 y 42).

El beneficio económico anual estimado para la utilización de nanofluidos de oro como fluido de servicio es entre 55% y 85% mayor al resultante por la utilización de nanofluidos de plata, dentro del rango de concentraciones estudiado (figura 43).

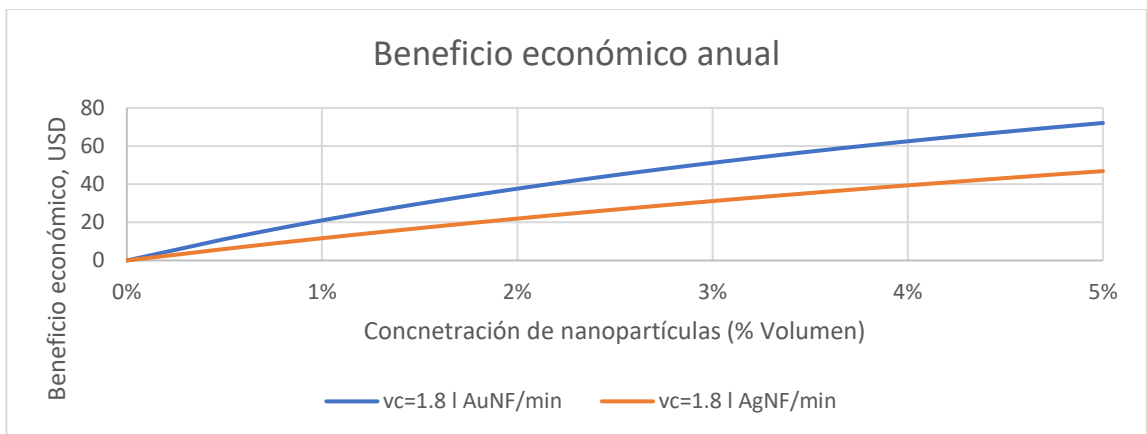


Figura 43. Beneficio económico logrado al utilizar nanofluidos como fluido de servicio en un intercambiador de calor de doble tubo.

5.4.2 Intercambiador de Calor de Tubos y Coraza

Considerando que un intercambiador de calor de tubos y coraza pueda trabajar 300 días al año, 24 horas diarias, el ahorro energético está dado como se muestra en las figuras 44, 45, 46 y 47.

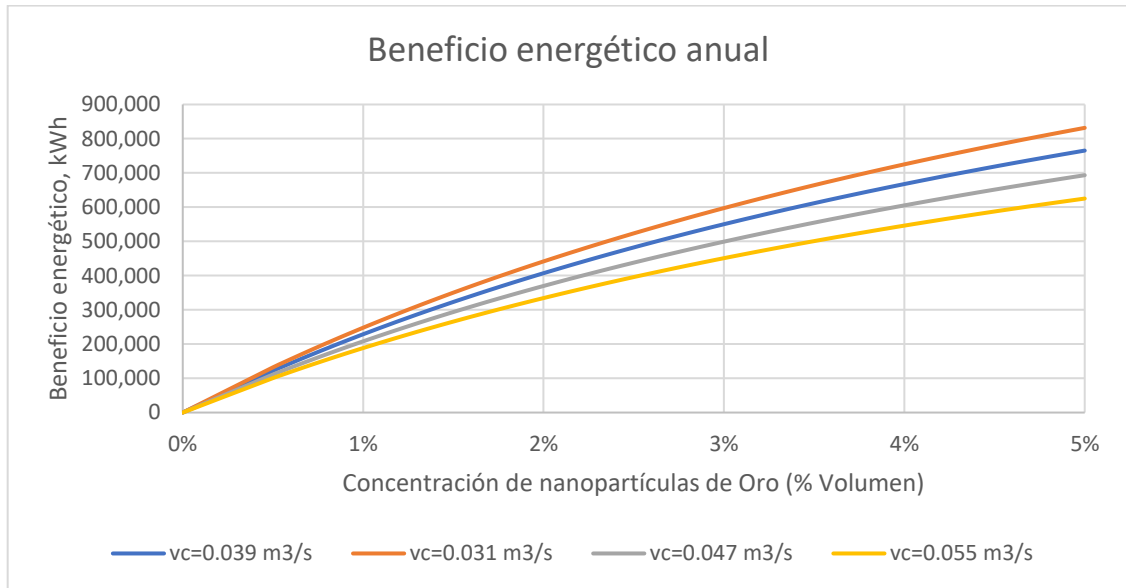


Figura 44. Beneficio energético logrado al utilizar nanofluidos de oro como fluido de servicio en un intercambiador de calor de tubo y coraza (1 paso por los tubos y 1 paso por la coraza).

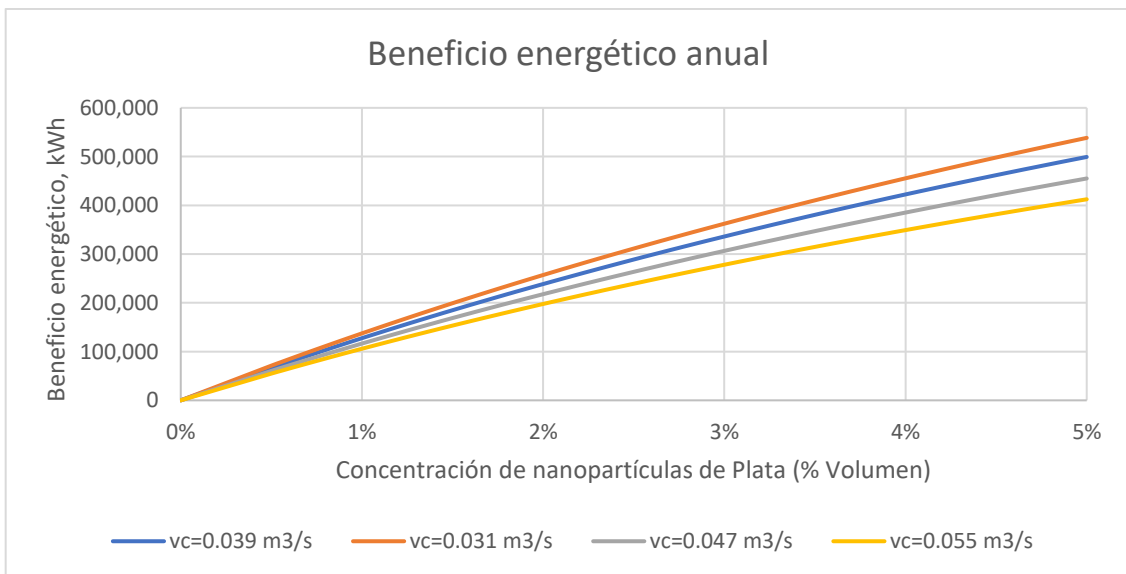


Figura 45. Beneficio energético logrado al utilizar nanofluidos de plata como fluido de

servicio en un intercambiador de calor de tubo y coraza (1 paso por los tubos y 1 paso por la coraza).

Para la configuración de 1 paso por los tubos y 1 paso por la coraza, para ambos nanofluidos el beneficio energético es mayor al menor flujo volumétrico estudiado, comparado con el mayor flujo volumétrico, en un 24% y 22% para el nanofluido de oro y el nanofluido de plata, respectivamente. El máximo beneficio energético para el nanofluido de oro es de 831,655 kWh anuales, mientras que para el nanofluido de plata es de 538,414 kWh anuales, en referencia al fluido base, el agua, dado en el menor flujo volumétrico estudiado a la máxima concentración de nanopartículas (figuras 44 y 45).

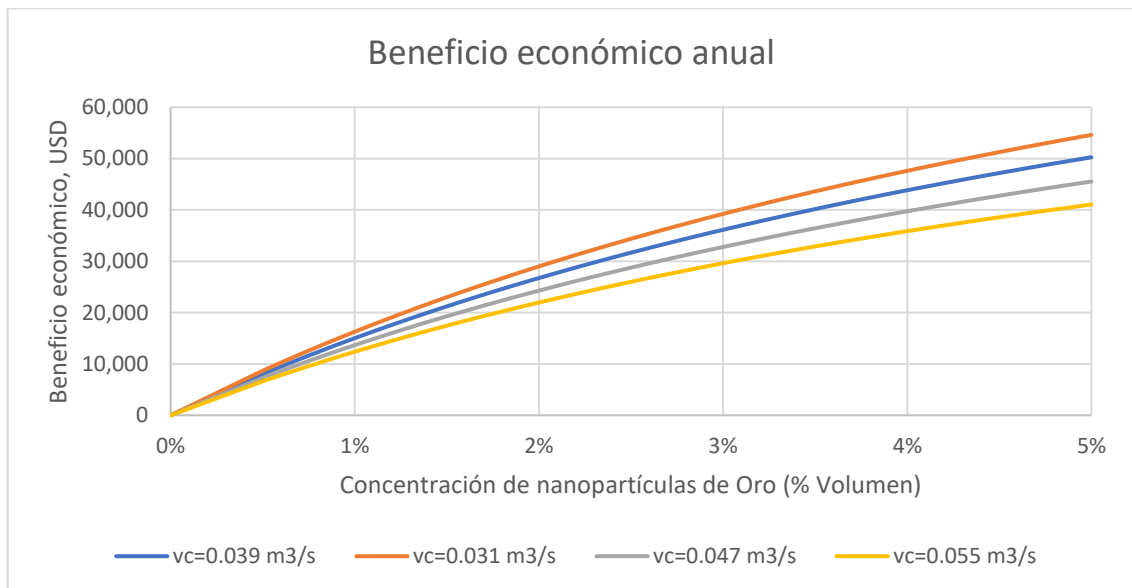


Figura 46. Beneficio económico logrado al utilizar nanofluidos de oro como fluido de servicio en un intercambiador de calor de tubo y coraza (1 paso por los tubos y 1 paso por la coraza).

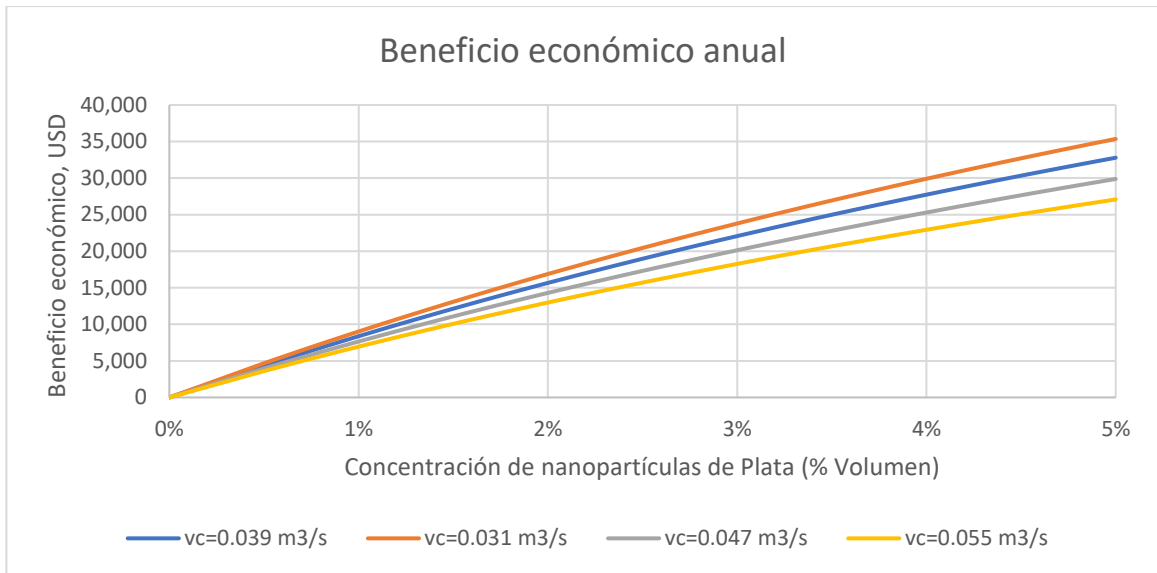


Figura 47. Beneficio económico logrado al utilizar nanofluidos de plata como fluido de servicio en un intercambiador de calor de tubo y coraza (1 paso por los tubos y 1 paso por la coraza).

Relacionado directamente, el beneficio económico de la utilización de estos nanofluidos viene dado por las figuras 46 y 47. Para la utilización del nanofluido de oro, el beneficio económico anual mayor resulta ser de 54,606 USD, mientras que en el caso del nanofluido de plata este beneficio económico anual alcanza los 35,352 USD, estos dados al menor flujo volumétrico estudiado.

Con la configuración de 2 pasos por los tubos y 1 paso por la coraza la situación es diferente debido al alto incremento de la caída de presión y su referente potencia de bombeo necesaria, esto provoca que exista un máximo de beneficio energético y económico anual a una cierta concentración de nanopartículas metálicas y posteriormente este beneficio se reduzca.

El máximo beneficio energético para el nanofluido de oro es de 165,233 kWh anuales, mientras que para el nanofluido de plata es de 85,611 kWh anuales, en referencia al fluido base, el agua, dado en el menor flujo volumétrico estudiado a la máxima

concentración de nanopartículas (figuras 48 y 49). Para los flujos volumétricos mayores, de $0.055 \text{ m}^3/\text{s}$, el máximo beneficio energético anual no es alcanzado a la máxima concentración, este máximo se alcanza utilizando una concentración 4.60% volumen para el nanofluido de oro.

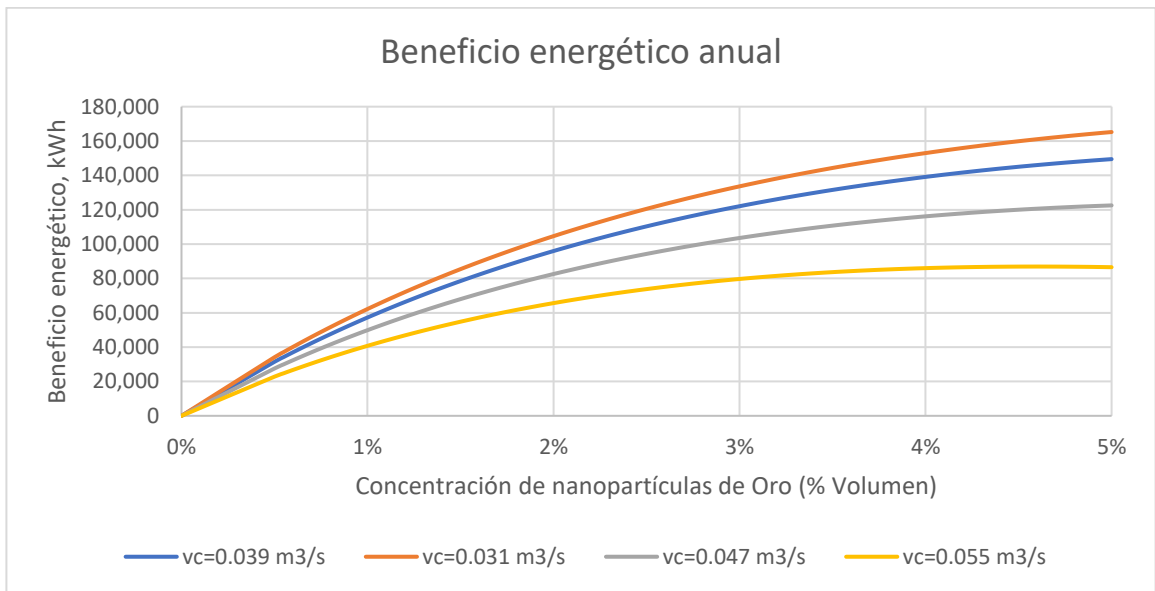


Figura 48. Beneficio energético logrado al utilizar nanofluidos de oro como fluido de servicio en un intercambiador de calor de tubo y coraza (2 pasos por los tubos y 1 paso por la coraza).

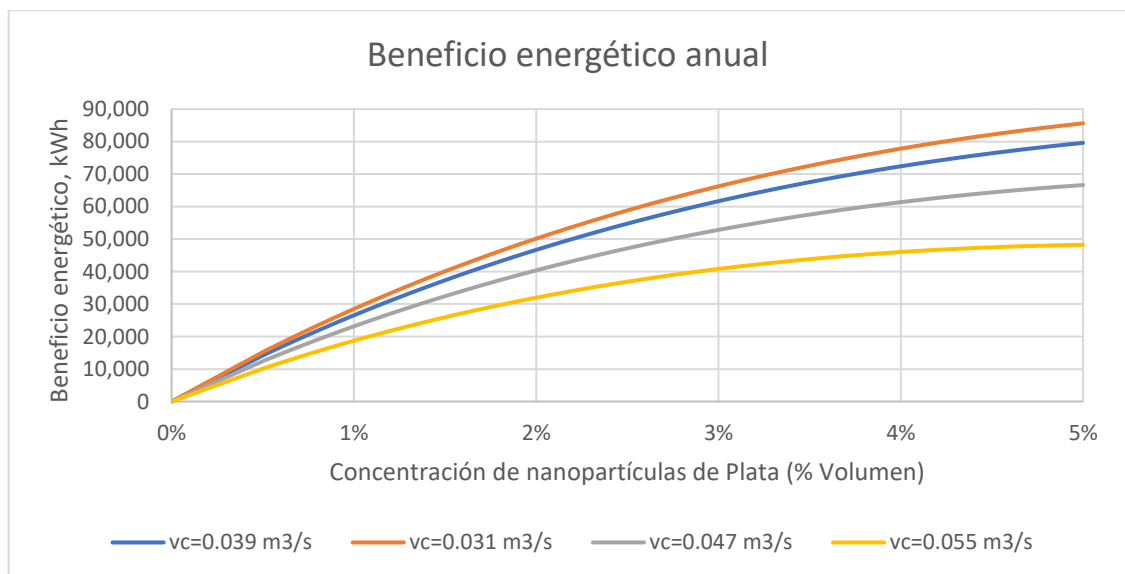


Figura 49. Beneficio energético logrado al utilizar nanofluidos de plata como fluido de

servicio en un intercambiador de calor de tubo y coraza (2 pasos por los tubos y 1 paso por la coraza).

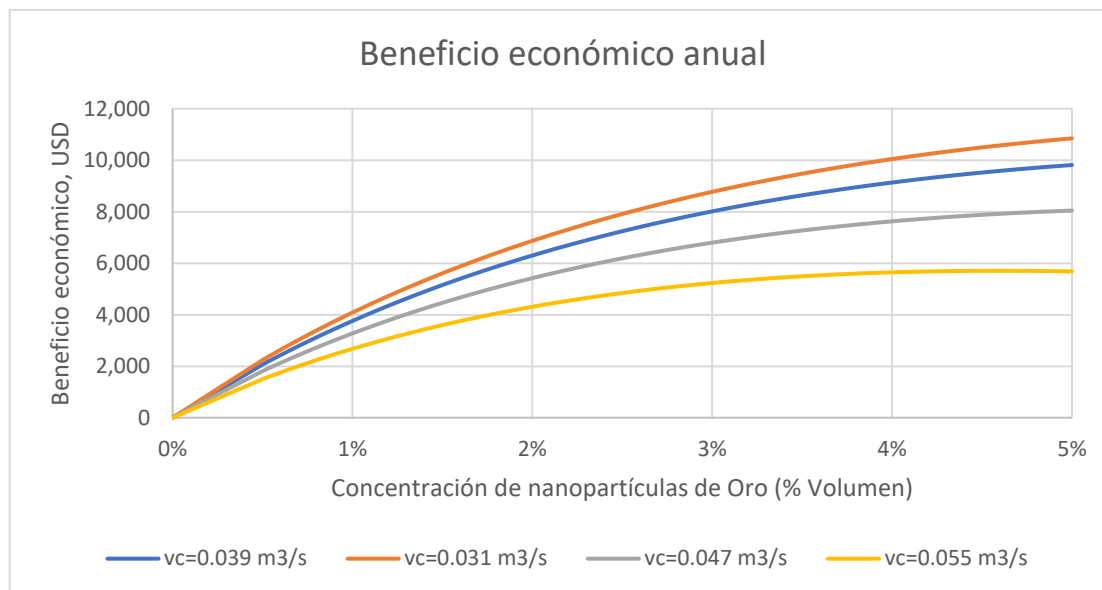


Figura 50. Beneficio económico logrado al utilizar nanofluidos de oro como fluido de servicio en un intercambiador de calor de tubo y coraza (2 pasos por los tubos y 1 paso por la coraza).

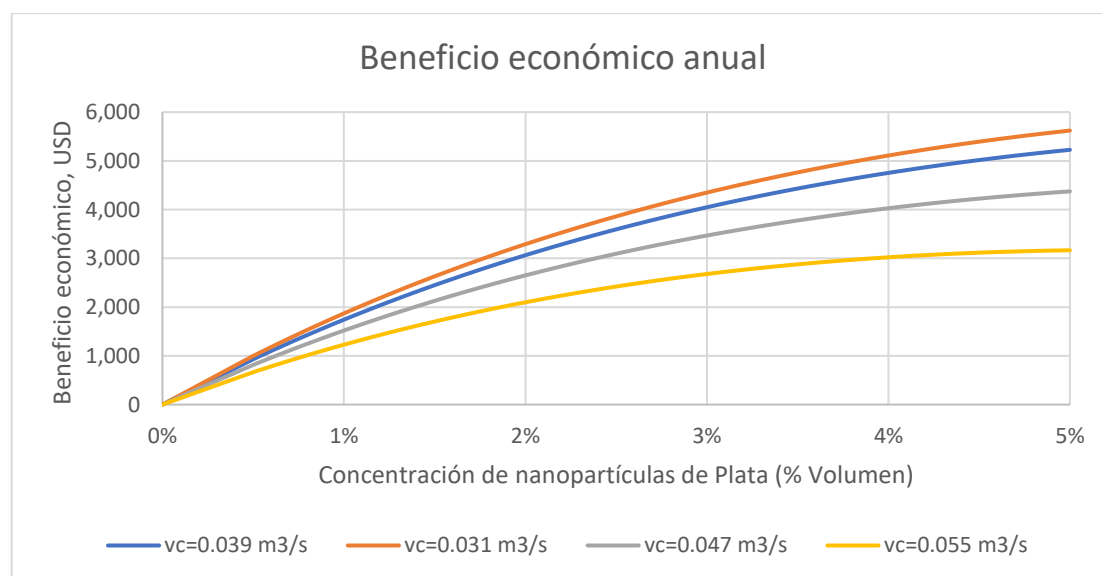


Figura 51. Beneficio económico logrado al utilizar nanofluidos de plata como fluido de servicio en un intercambiador de calor de tubo y coraza (2 pasos por los tubos y 1 paso por la coraza).

El máximo beneficio económico para el nanofluido de oro es de 10,849 USD anuales, mientras que para el nanofluido de plata es de 5,621 USD anuales, en referencia al fluido base, el agua, dado en el menor flujo volumétrico estudiado a la máxima concentración de nanopartículas (figuras 50 y 51). Para los flujos volumétricos mayores, de 0.055 m³/s, el máximo beneficio económico anual se alcanza utilizando una concentración 4.60% volumen para el nanofluido de oro.

5.5 Análisis Ambiental

El reemplazo de la energía eléctrica a partir de operaciones de transferencia de calor trae consigo un impacto ambiental positivo al reducir las emisiones de CO₂ generadas por la producción de la electricidad, por lo cual, la utilización de estos nanofluidos en sistemas de intercambio de calor evita emisiones de CO₂ en referencia al beneficio energético anual mostrado en la sección anterior.

5.5.1 Intercambiador de Calor de Doble Tubo

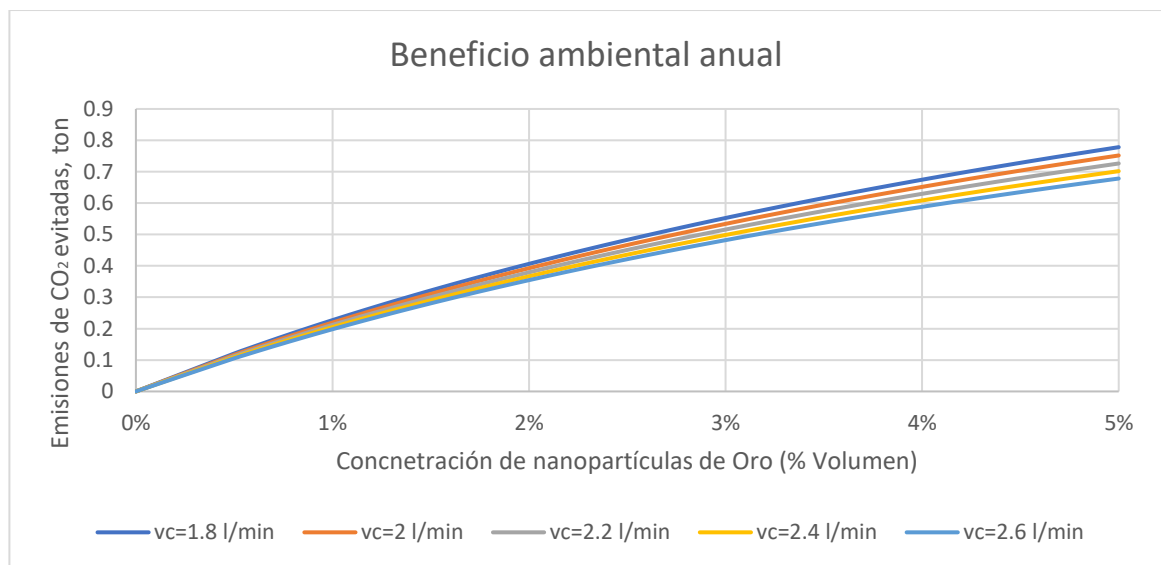


Figura 52. Beneficio ambiental logrado al utilizar nanofluidos de oro como fluido de servicio en un intercambiador de calor de doble tubo.

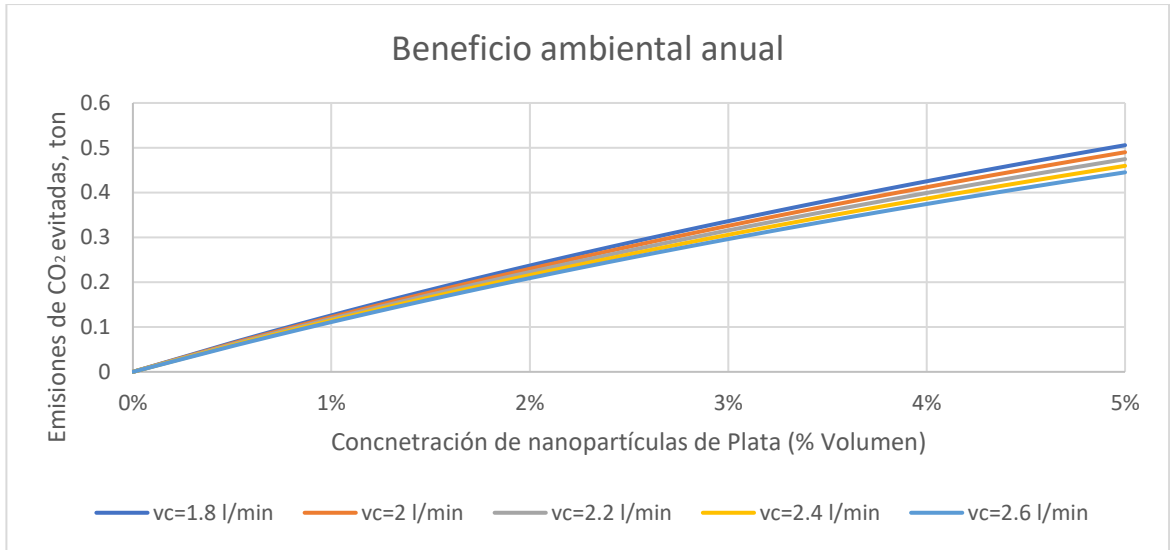


Figura 53. Beneficio ambiental logrado al utilizar nanofluidos de plata como fluido de servicio en un intercambiador de calor de doble tubo.

Para ambos nanofluidos el beneficio ambiental es mayor al menor flujo volumétrico estudiado, comparado con el mayor flujo volumétrico, en un 15% y 14% para el nanofluido de oro y el nanofluido de plata, respectivamente. El máximo beneficio ambiental para el nanofluido de oro es de 0.77 ton de CO₂ evitadas anuales, mientras que para el nanofluido de plata es de 0.51 ton de CO₂ evitadas anuales, en referencia al fluido base, el agua, al menor flujo volumétrico y máxima concentración estudiadas (figuras 52 y 53).

5.5.2 Intercambiador de Calor de Tubos y Coraza

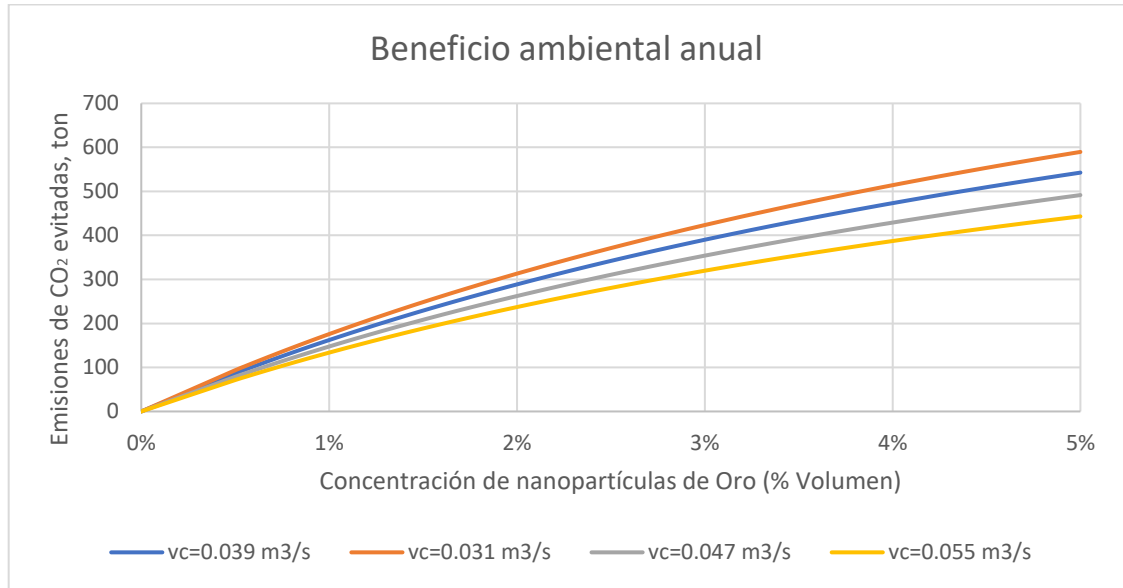


Figura 54. Beneficio ambiental logrado al utilizar nanofluidos de oro como fluido de servicio en un intercambiador de calor de tubos y coraza (1 paso por los tubos y 1 paso por la coraza).

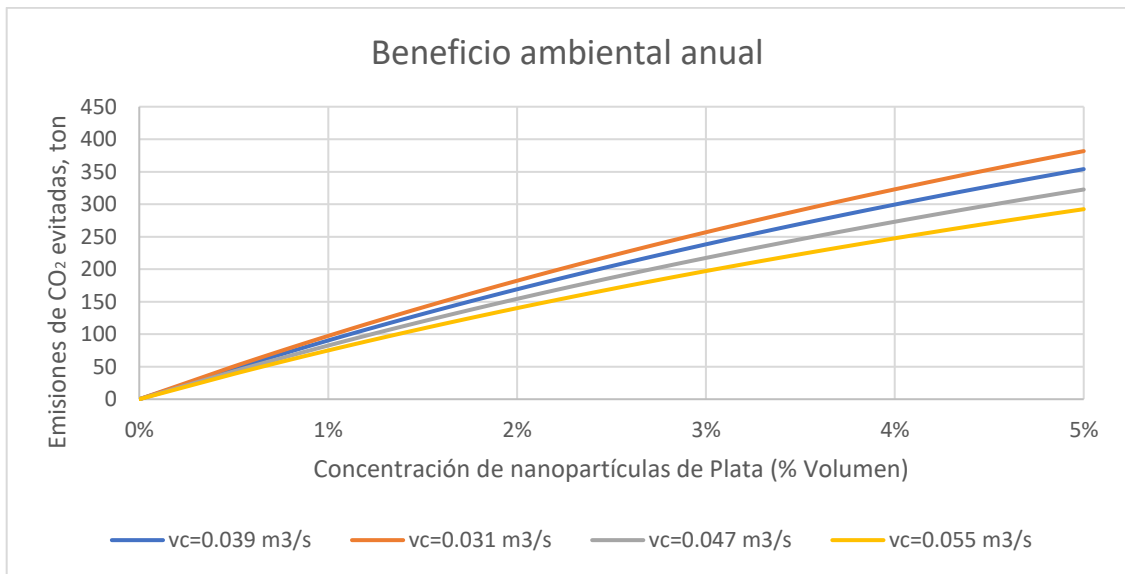


Figura 55. Beneficio ambiental logrado al utilizar nanofluidos de plata como fluido de servicio en un intercambiador de calor de tubos y coraza (1 paso por los tubos y 1 paso por la coraza).

Para la configuración de 1 paso por los tubos y 1 paso por la coraza, para ambos nanofluidos el beneficio ambiental es mayor al menor flujo volumétrico estudiado,

comparado con el mayor flujo volumétrico, en un 24% y 22% para el nanofluido de oro y el nanofluido de plata, respectivamente. El máximo beneficio ambiental para el nanofluido de oro es de 589 ton de CO₂ evitadas anuales, mientras que para el nanofluido de plata es de 381 ton de CO₂ evitadas anuales, en referencia al fluido base, el agua, dado en el menor flujo volumétrico estudiado a la máxima concentración de nanopartículas (figuras 54 y 55).

Con la configuración de 2 pasos por los tubos y 1 paso por la coraza la situación es diferente debido al comportamiento del beneficio energético explicado en secciones anteriores.

El máximo beneficio ambiental para el nanofluido de oro es de 117 ton de CO₂ evitadas anuales, mientras que para el nanofluido de plata es de 61 ton de CO₂ evitadas anuales, en referencia al fluido base, el agua, dado en el menor flujo volumétrico estudiado a la máxima concentración de nanopartículas (figuras 56 y 57). Para los flujos volumétricos mayores de 0.055 m³/s, el máximo beneficio ambiental anual no es alcanzado a la máxima concentración, este máximo se alcanza utilizando una concentración 4.6% volumen para el nanofluido de oro.

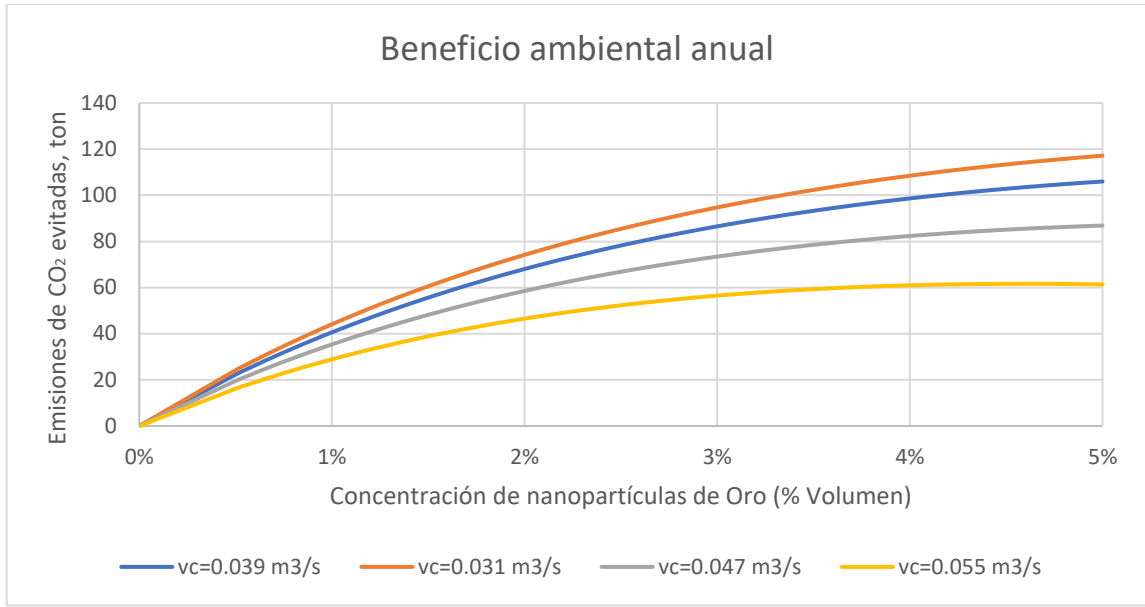


Figura 56. Beneficio ambiental logrado al utilizar nanofluidos de oro como fluido de servicio en un intercambiador de calor de tubos y coraza (2 pasos por los tubos y 1 paso por la coraza).

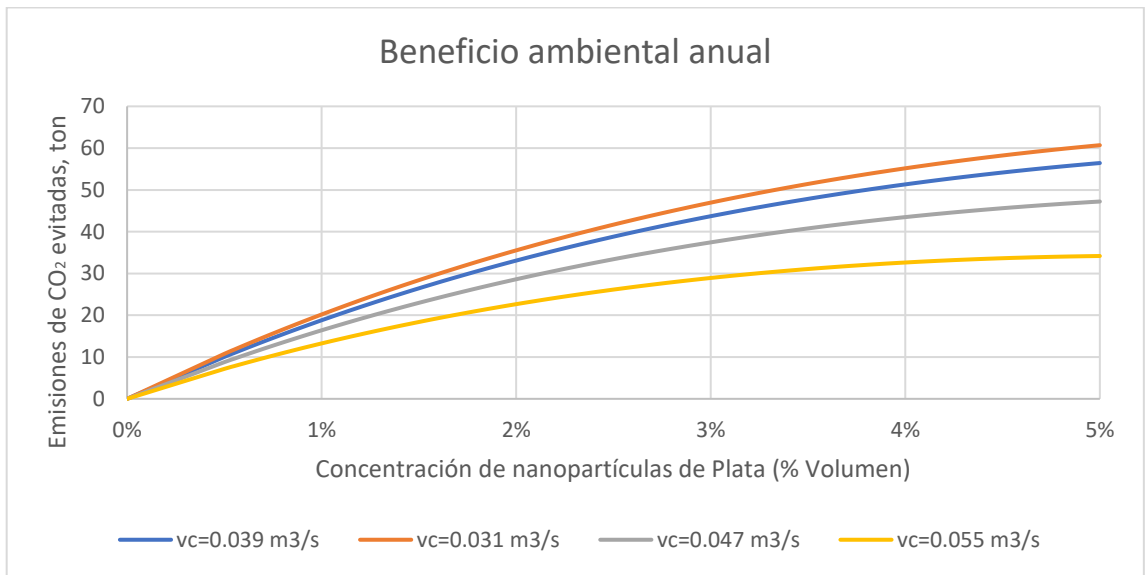


Figura 57. Beneficio ambiental logrado al utilizar nanofluidos de plata como fluido de servicio en un intercambiador de calor de tubos y coraza (2 pasos por los tubos y 1 paso por la coraza).

5.6 Análisis Exergético

La exergía en los sistemas de intercambio de calor no es conservada, hay una pérdida de exergía por el fluido caliente, en estos casos el agua, y una exergía ganada por

el fluido frío que en los sistemas de intercambio de calor fue el nanofluido, el resto es exergía destruida y esta exergía se vio alterada debido a la utilización de nanofluidos de oro y plata en estos sistemas.

5.6.1 Intercambiador de Calor de Doble Tubo

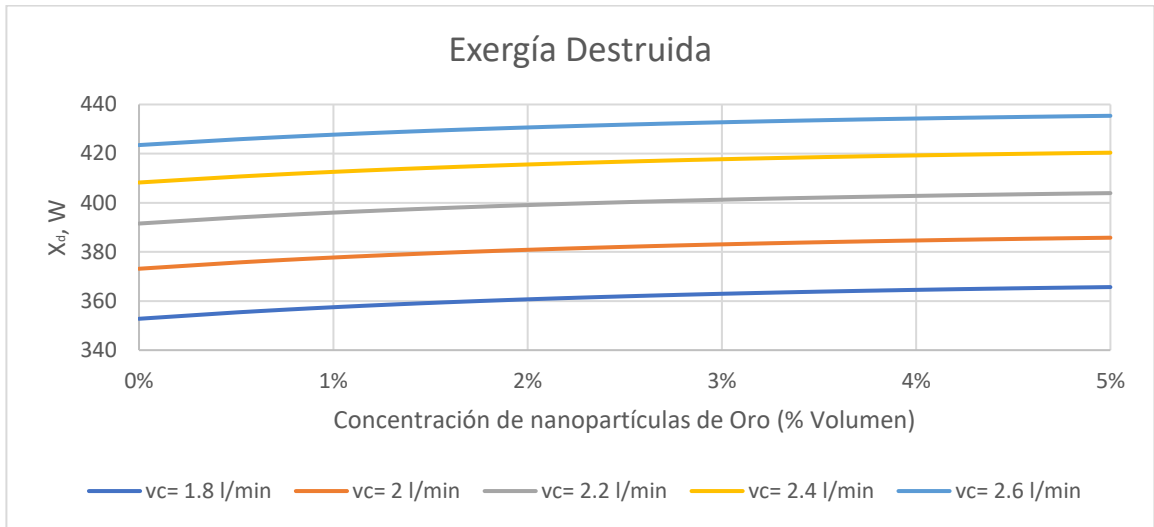


Figura 58. Exergía destruida al utilizar nanofluidos de oro como fluido de servicio en un intercambiador de calor de doble tubo.

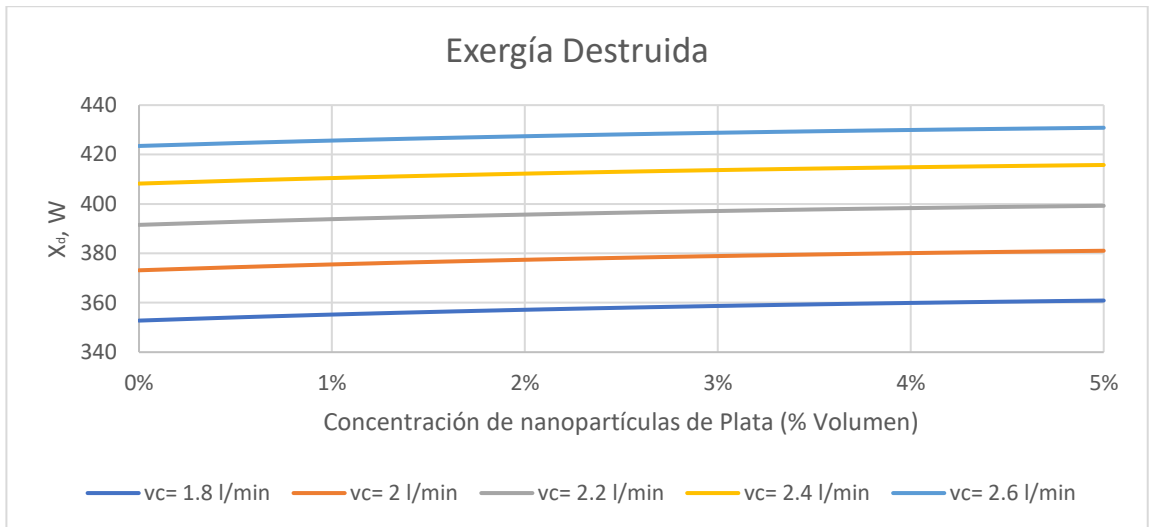


Figura 59. Exergía destruida al utilizar nanofluidos de plata como fluido de servicio en un intercambiador de calor de doble tubo.

En las figuras 58 y 59 se muestran los resultados del cálculo de exergía destruida en el sistema de intercambiador de calor de doble tubo utilizando como fluidos de servicio nanofluidos de oro y plata, respectivamente. Para ambos casos las irreversibilidades en el sistema se vieron incrementadas a mayores flujos volumétricos.

Igualmente, al incrementar la concentración en volumen de nanopartículas en el rango estudiado, la exergía destruida del sistema se incrementó. Para el caso del nanofluido de oro, el mayor incremento fue del 3.7% con el menor flujo volumétrico trabajado; mientras que para el nanofluido de plata el mayor incremento se observó al menor flujo volumétrico, siendo este de 1.8 l/min, y fue de 2.3%.

El incremento de la exergía destruida a pesar del mejoramiento del desempeño térmico al utilizar estos nanofluidos es debido a que justamente el mejoramiento de las propiedades termofísicas como densidad y conductividad térmica aumentan la ganancia de exergía del nanofluido en el sistema conforme aumenta la concentración de nanopartículas, sin embargo, este mejoramiento también está acompañado de un incremento en la exergía perdida por el fluido caliente por el incremento de efectividad del sistema de intercambio de calor, en estos casos el agua, por lo cual esta competencia entre el intercambio de exergía en los fluidos genera que bajo las condiciones y rangos trabajados, la exergía destruida incrementara.

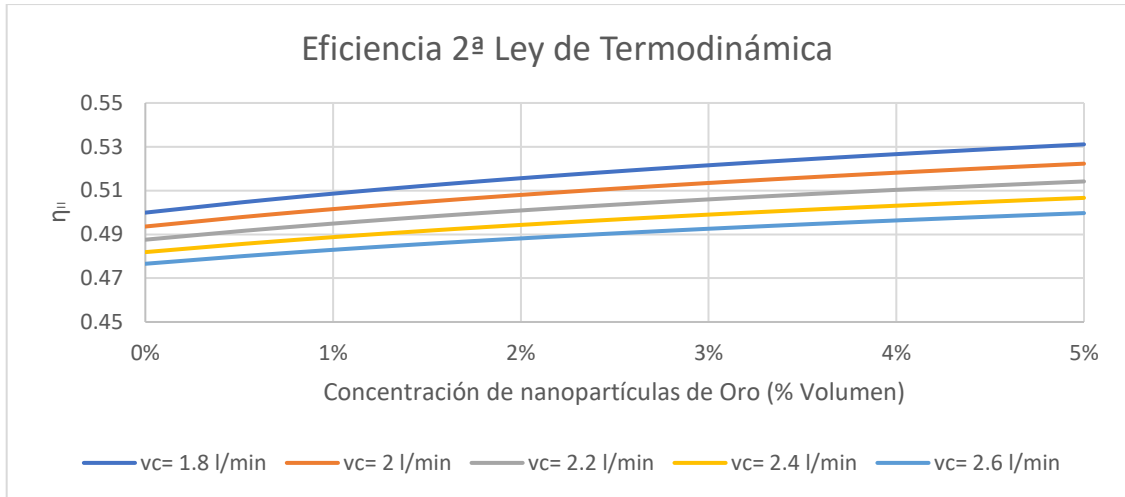


Figura 60. Eficiencia exergetica en un intercambiador de calor de doble tubo al utilizar nanofluidos de oro como fluido de servicio.

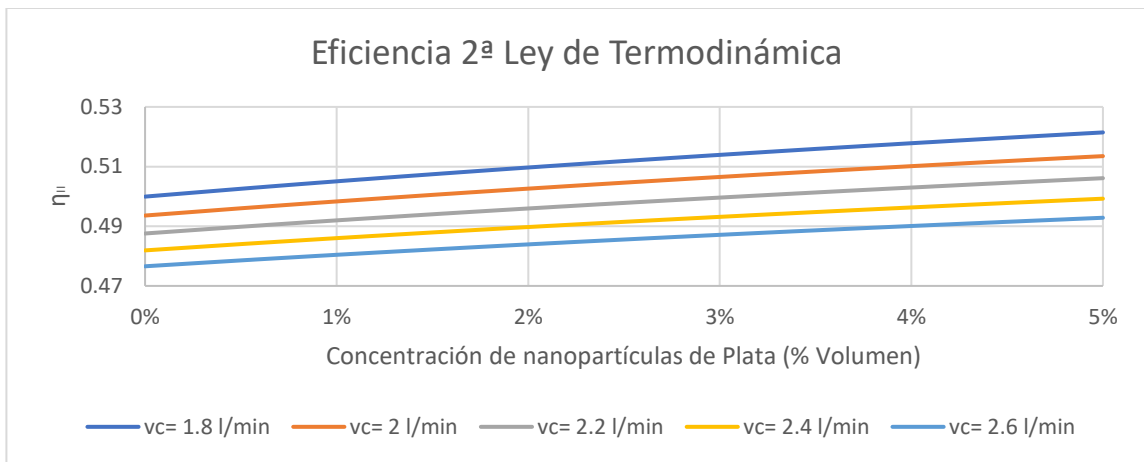


Figura 61. Eficiencia exergetica en un intercambiador de calor de doble tubo al utilizar nanofluidos de plata como fluido de servicio.

A pesar del incremento de la exergía destruida al utilizar nanofluidos de oro y plata como fluidos de servicio en el intercambiador de calor de doble tubo, la eficiencia exergetica siendo la razón de la exergía recuperada por el nanofluido y la exergía perdida por el fluido caliente, agua, se vio incrementada, como se muestra en las figuras 60 y 61. En ambos casos la mayor eficiencia exergetica se mostró al menor flujo volumétrico trabajado siendo de 53.11% y 52.15% para los nanofluidos de oro y plata, respectivamente.

Para el nanofluido de oro, la eficiencia exergética se incrementó hasta en un 6.2% en el rango de concentración de nanopartículas estudiado, mientras que esta eficiencia se incrementó en un 4.3% a la mayor concentración de nanopartículas para el caso del nanofluido de plata.

5.6.2 Intercambiador de Calor de Tubos y Coraza

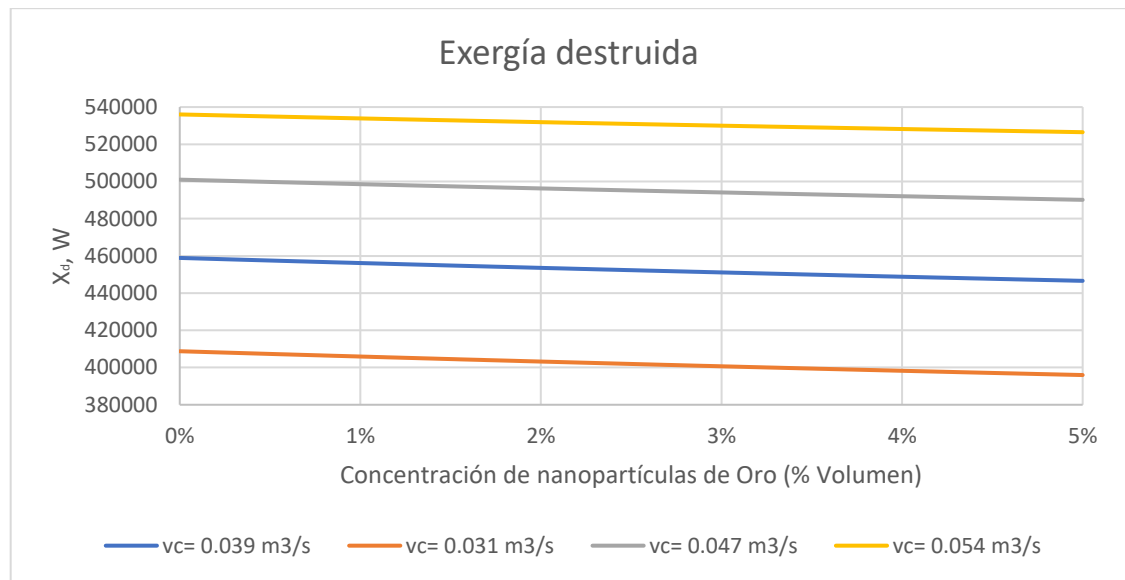


Figura 62. Exergía destruida al utilizar nanofluidos de oro como fluido de servicio en un intercambiador de calor de tubos y coraza (1 paso por los tubos y 1 paso por la coraza).

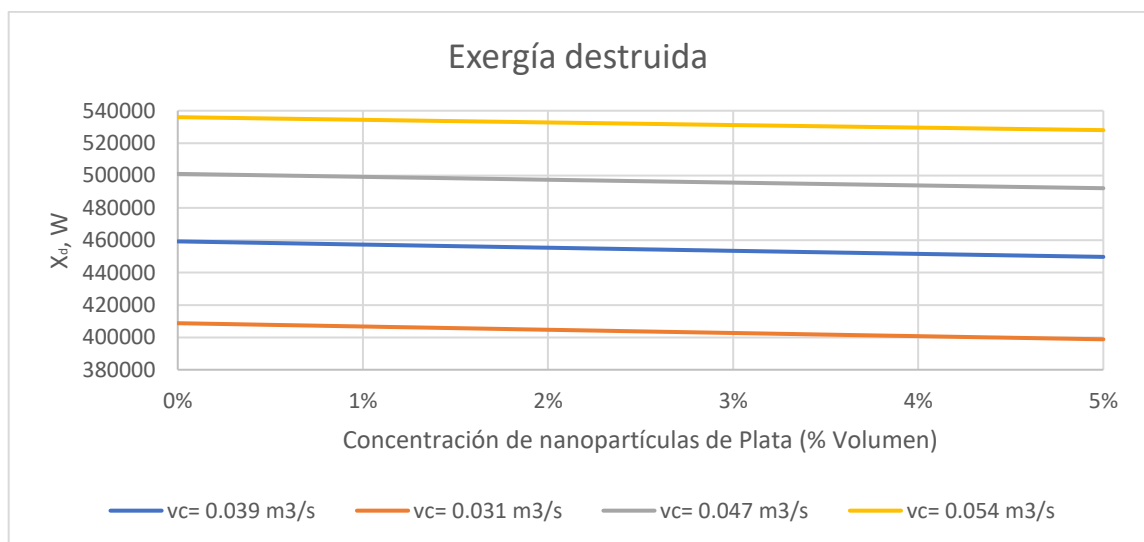


Figura 63. Exergía destruida al utilizar nanofluidos de plata como fluido de servicio en un intercambiador de calor de tubos y coraza (1 paso por los tubos y 1 paso por la coraza).

En las figuras 62 y 63 se muestran los resultados del cálculo de exergía destruida en el sistema de intercambiador de calor de tubos y coraza (1 paso por los tubos y 1 paso por la coraza). utilizando como fluidos de servicio nanofluidos de oro y plata, respectivamente. Para ambos casos las irreversibilidades en el sistema se vieron reducidas a mayores flujos volumétricos.

Al igual que, en el caso del intercambiador de calor de doble tubo, al incrementar la concentración en volumen de nanopartículas en el rango estudiado, la exergía destruida del sistema se incrementó.

Para el caso del nanofluido de oro, el mayor decremento fue del 3.1% con el menor flujo volumétrico trabajado; mientras que para el nanofluido de plata el mayor decremento se observó al menor flujo volumétrico, siendo este de $0.031 \text{ m}^3/\text{s}$, y fue de 2.4%.

El decremento de la exergía destruida a pesar del mejoramiento del desempeño térmico al utilizar estos nanofluidos en este sistema de intercambio de calor sufre la misma competencia que en el intercambiador de calor de doble tubo en el que aumenta la ganancia de exergía del nanofluido en el sistema mientras aumenta la concentración de nanopartículas, sin embargo, este mejoramiento también está acompañado de un incremento en la exergía perdida por el fluido caliente por el incremento de efectividad del sistema de intercambio de calor, en estos casos el agua, solamente que bajo estas condiciones de operación del intercambiador de calor y bajo el rango de concentración de nanopartículas estudiado, este efecto es dominado por la disminución de la capacidad calorífica del nanofluido y así su capacidad de incrementar en mayor medida la recuperación de exergía perdida por el fluido caliente.

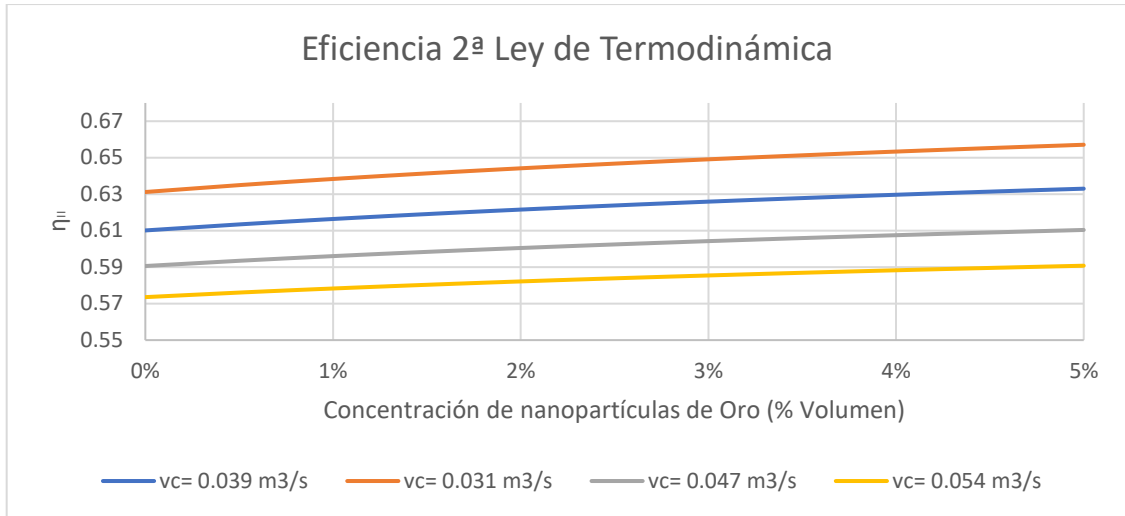


Figura 64. Eficiencia exergética en un intercambiador de calor de tubos y coraza (1 paso por los tubos y 1 paso por la coraza) al utilizar nanofluidos de oro como fluido de servicio.

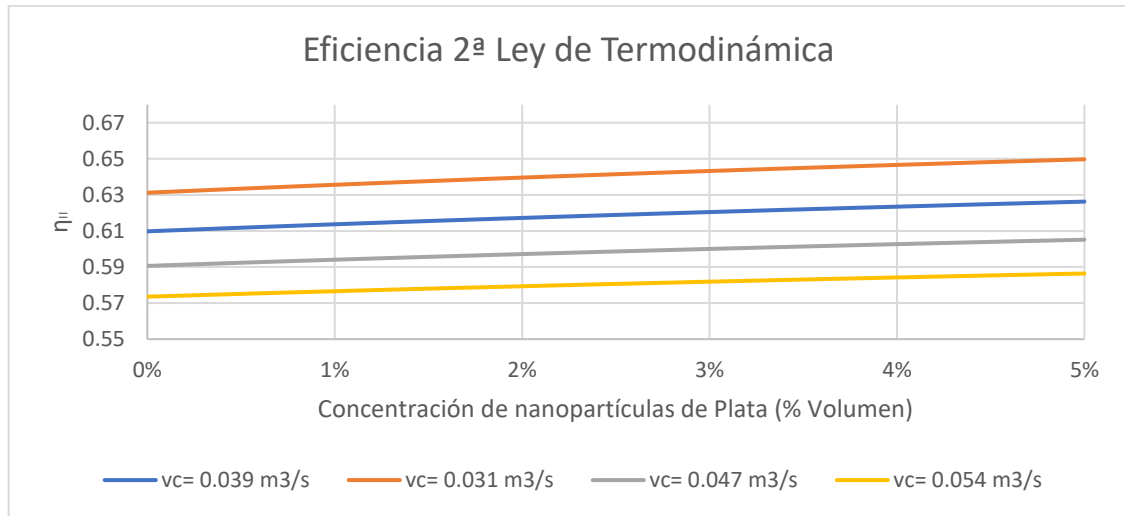


Figura 65. Eficiencia exergética en un intercambiador de calor de tubos y coraza (1 paso por los tubos y 1 paso por la coraza) al utilizar nanofluidos de plata como fluido de servicio.

La eficiencia exergética siendo la razón de la exergía recuperada por el nanofluido y la exergía perdida por el fluido caliente, agua, se vio incrementada, como se muestra en las figuras 64 y 65. En ambos casos la mayor eficiencia exergética se mostró al menor flujo volumétrico trabajado siendo de 65.71% y 64.98% para los nanofluidos de oro y plata, respectivamente.

Para el nanofluido de oro, la eficiencia exergética se incrementó hasta en un 4.1% en el rango de concentración de nanopartículas estudiado, mientras que esta eficiencia se incrementó en un 2.9% a la mayor concentración de nanopartículas para el caso del nanofluido de plata.

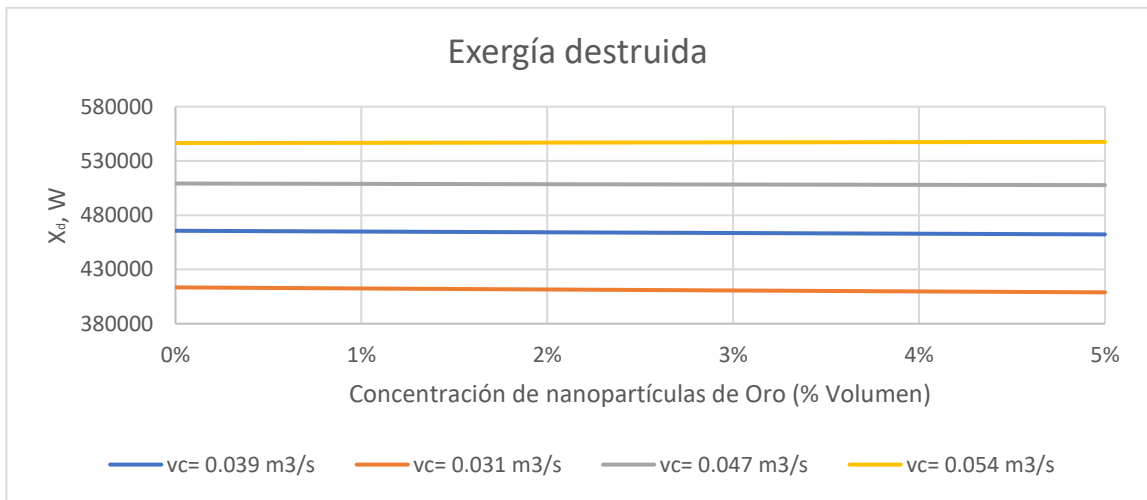


Figura 66. Exergía destruida al utilizar nanofluidos de oro como fluido de servicio en un intercambiador de calor de tubos y coraza (2 pasos por los tubos y 1 paso por la coraza).

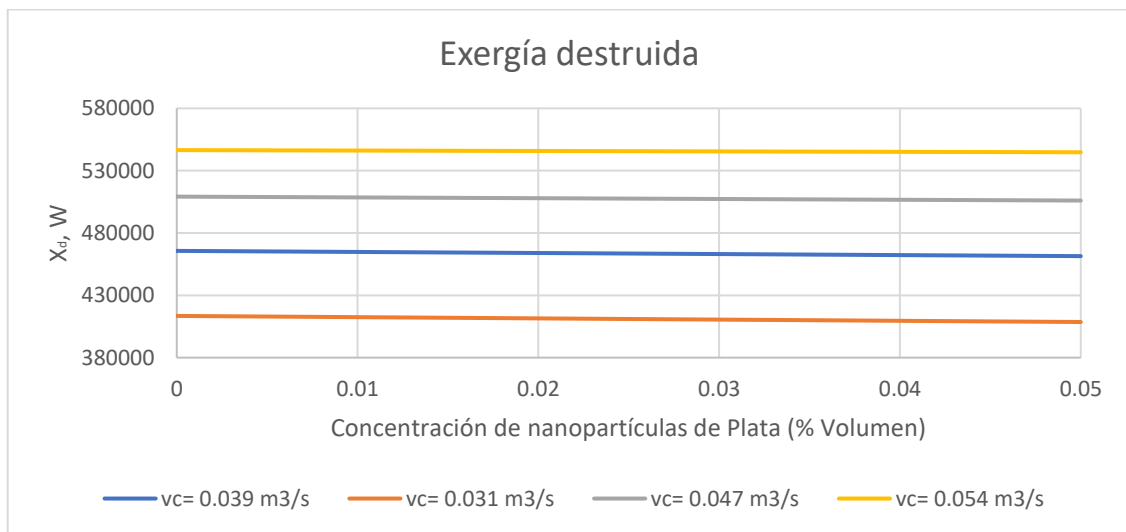


Figura 67. Exergía destruida al utilizar nanofluidos de plata como fluido de servicio en un intercambiador de calor de tubos y coraza (2 pasos por los tubos y 1 paso por la coraza).

En las figuras 66 y 67 se muestran los resultados del cálculo de exergía destruida en el sistema de intercambiador de calor de tubos y coraza (2 pasos por los tubos y 1 paso

por la coraza). utilizando como fluidos de servicio nanofluidos de oro y plata, respectivamente. Para ambos casos las irreversibilidades en el sistema se vieron reducidas a mayores flujos volumétricos mostrando el mismo efecto que caso de 1 solo paso por los tubos. Para el caso del nanofluido de oro, el mayor decremento fue del 1.2% con el menor flujo volumétrico trabajado; mientras que para el nanofluido de plata el mayor decremento se observó al menor flujo volumétrico, siendo este de $0.031 \text{ m}^3/\text{s}$, y fue de 1.1%.

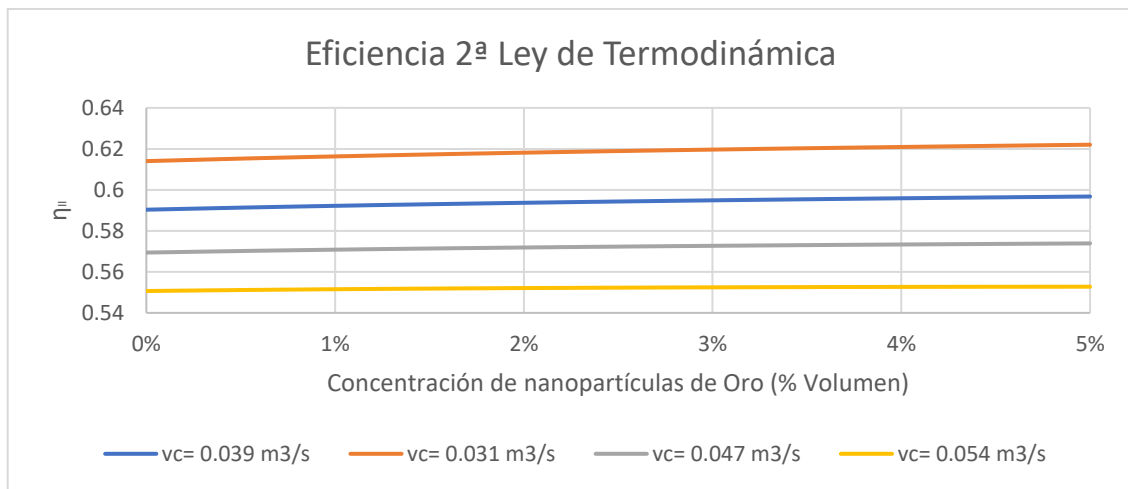


Figura 68. Eficiencia exergética en un intercambiador de calor de tubos y coraza (2 pasos por los tubos y 1 paso por la coraza) al utilizar nanofluidos de oro como fluido de servicio.

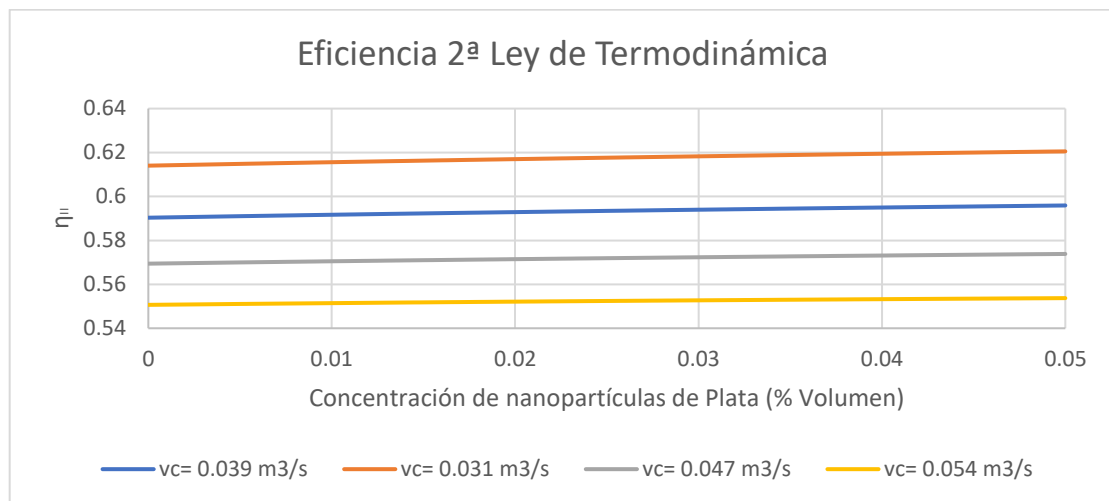


Figura 69. Eficiencia exergética en un intercambiador de calor de tubos y coraza (2 pasos por los tubos y 1 paso por la coraza) al utilizar nanofluidos de plata como fluido de servicio.

La eficiencia exergética siendo la razón de la exergía recuperada por el nanofluido y la exergía perdida por el fluido caliente, agua, se vio incrementada, como se muestra en las figuras 68 y 69. En ambos casos la mayor eficiencia exergética se mostró al menor flujo volumétrico trabajado siendo de 62.20% y 62.05% para los nanofluidos de oro y plata, respectivamente.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Propiedades Termofísicas

En el presente trabajo se determinó el mejoramiento de propiedades termofísicas clave en el desempeño térmico de nanofluidos de oro y plata como fluidos de servicio en sistemas de intercambio de calor con concentraciones de nanopartículas de 0% a 5% en volumen comparados con el fluido base, el agua.

Para el nanofluido de oro la densidad se incrementó en un 92% su capacidad calorífica disminuye hasta un 49% y su conductividad térmica, así como su viscosidad se incrementaron en un 16% y 13%, respectivamente a la mayor concentración de nanopartículas estudiadas.

Para el nanofluido de plata su densidad se vio incrementada en un 47%, mientras que su conductividad térmica y su viscosidad hasta en un 17% y 13%, respectivamente; su capacidad calorífica disminuyó hasta en un 34%, todo para la máxima concentración de nanopartículas estudiadas.

La determinación experimental de la densidad y viscosidad de nanofluidos de plata mostro una desviación promedio del 0.27% y 4.06%, respectivamente de los valores obtenidos con las correlaciones utilizadas.

Estas desviaciones fueron atribuidas, además del error del equipo experimental, a la precipitación rápida de las nanopartículas de plata en la suspensión, por lo cual se necesita una mezcla constante de estas suspensiones al momento de medición de este tipo de propiedades.

6.2 Intercambiador de Calor de Doble Tubo

En este trabajo se demostró que el mejoramiento de las propiedades termofísicas del fluido de servicio mejora el desempeño térmico en sistema de intercambio de calor impactando positivamente al coeficiente global de transferencia de calor (U), y a su vez la efectividad en estos sistemas.

Los mejores resultados se obtuvieron al menor flujo volumétrico trabajado, de 1.8 L/min, y a la mayor concentración de nanopartículas estudiadas. Utilizando nanofluidos de oro la efectividad del intercambiador de calor de doble tubo se incrementó hasta en un 12%, mientras que usando nanofluidos de plata el incremento es de un 8%. Sin embargo, existe un aumento de la potencia de bombeo de un 67% y 37% para el nanofluido de oro y plata, respectivamente.

Con estos resultados se obtienen beneficios energéticos, económicos y ambientales por la utilización de estos nanofluidos comparados con el fluido base. Para el nanofluido de oro existió un beneficio energético de 1097 kWh anuales, reflejado en un beneficio económico de 72 USD y 0.72 ton de CO₂, anualmente. Para el nanofluido de plata existió un beneficio

energético de 713 kWh anuales, reflejado en un beneficio económico de 46 USD y 0.51 ton de CO₂, anualmente.

Analizando la eficiencia exergética de utilizar estos nanofluidos como fluido de servicio en el intercambiador de calor de doble tubo se obtuvo un incremento de hasta en un 6.2% en el rango de concentración de nanopartículas estudiadas para el nanofluido de oro, este aumento fue de 4.3% usando nanofluido de plata, llegando a tener eficiencias exergéticas del 53.11% y 52.15%, respectivamente.

6.3 Intercambiador de Calor de Tubos y Coraza

El mejoramiento del desempeño térmico de estos sistemas se obtuvo con el menor flujo volumétrico trabajado, de 0.031 m³/s, y a la mayor concentración de nanopartículas estudiadas. Con la configuración de 1 paso por los tubos y 1 por la coraza, utilizando nanofluidos de oro la efectividad del intercambiador de calor de doble tubo se incrementó hasta en un 6%, mientras que usando nanofluidos de plata el incremento es de un 4%, para la configuración de 2 pasos por los tubos y 1 por la coraza este incremento fue de 1.2% y 0.6%, respectivamente.

La potencia de bombeo para la primera configuración se incrementó hasta en un 77% para el nanofluido de oro y en un 41% para el nanofluido de plata. Para la segunda configuración este aumento de potencia de bombeo fue de 80% y 43% para el nanofluido de oro y plata, respectivamente.

Con estos resultados se obtienen beneficios energéticos, económicos y ambientales por la utilización de estos nanofluidos comparados con el fluido base. Con la configuración de

1 paso por los tubos y 1 por la coraza, para el nanofluido de oro existió un beneficio energético de 831,635 kWh anuales, reflejado en un beneficio económico de 54,606 USD y 589 ton de CO₂, anualmente. Para el nanofluido de plata existió un beneficio energético de 538,414 kWh anuales, reflejado en un beneficio económico de 35,352 USD y 381 ton de CO₂, anualmente. Para la configuración de 2 pasos por los tubos y 1 por la coraza, con el nanofluido de oro existió un beneficio energético de 165,233 kWh anuales, reflejado en un beneficio económico de 10,849 USD y 117 ton de CO₂, anualmente. Para el nanofluido de plata existió un beneficio energético de 85,611 kWh anuales, reflejado en un beneficio económico de 5,621 USD y 61 ton de CO₂, anualmente.

Analizando la eficiencia exergética de utilizar estos nanofluidos como fluido de servicio en el intercambiador de calor de tubos y coraza (1 paso por los tubos y 1 paso por la coraza) se obtuvo un incremento de hasta en un 4.1% en el rango de concentración de nanopartículas estudiadas para el nanofluido de oro, este aumento fue de 2.9% usando nanofluido de plata, llegando a tener eficiencias exergéticas del 65.71% y 64.98%, respectivamente. Para la segunda configuración se lograron tener eficiencias exergéticas del 62.20% y 62.05% para el nanofluido de oro y plata, respectivamente.

REFERENCIAS

- Ali, N., Teixeira, J. A., & Addali, A. (2018). A Review on Nanofluids: Fabrication, Stability, and Thermophysical Properties. *Journal of Nanomaterials*.
<https://doi.org/10.1155/2018/6978130>
- Awais, M., Najeeb, U., Ahmad, J., Sikandar, F., Ehsan, M. M., Salehin, S., & Bhuiyan, A. A. (2021). Heat transfer and pressure drop performance of Nanofluid: A state-of-the-art review. *International Journal of Thermofluids* (Vol. 9). Elsevier B.V.
<https://doi.org/10.1016/j.ijft.2021.100065>
- Bastús, N. G., Merkoçi, F., Piella, J., & Puentes, V. (2014). Synthesis of highly monodisperse citrate-stabilized silver nanoparticles of up to 200 nm: Kinetic control and catalytic properties. *Chemistry of Materials*, 26(9), 2836–2846. <https://doi.org/10.1021/cm500316k>
- Batchelor, G. K. (1977). The effect of Brownian motion on the bulk stress in a suspension of spherical particles. *J. Fluid Mech* (Vol. 83, Issue 1).
- Bock Choon Pak, Young. I. C. (2013). Hydrodynamic and Heat Transfer Study of Dispersed Fluids With Submicron Metallic Oxide. *Experimental Heat Transfer : A Journal of, Thermal Energy Transport, Storage, and Conversion*, 37–41.
- Cengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2011). *Transferencia de calor y masa: Fundamentos y aplicaciones* (4a ed.). McGraw-Hill.
- Choi, S. U. S., & Eastman, J. A. (1995). Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles. *American Society of Mechanical Engineers, Fluids Engineering Division FED*, 231, 99–105.
- Cox, J., Kanjirakat, A., & Sadr, R. (2013). Application of nanofluids in a shell-and-tube heat exchanger. *ASME 2013 11th International Conference on Nanochannels, Microchannels and Minichannels, ICNMM 2013, June*. <https://doi.org/10.1115/ICNMM2013-73104>
- Das, S. K., Choi, S. U. S., & Patel, H. E. (2007). *Heat Transfer in Nanofluids — A Review*. 7632(2006). <https://doi.org/10.1080/01457630600904593>
- Duangthongsuk, W., & Wongwises, S. (2010). An experimental study on the heat transfer performance and pressure drop of TiO₂-water nanofluids flowing under a turbulent flow regime. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53(1–3), 334–344.
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.09.024>
- Escárcega-González, C. E., Garza-Cervantes, J. A., Vázquez-Rodríguez, A., Montelongo-Peralta, L. Z., Treviño-González, M. T., Díaz Barriga Castro, E., Saucedo-Salazar, E. M., Chávez Morales, R. M., Regalado Soto, D. I., Treviño González, F. M., Carrasco Rosales, J. L., Villalobos Cruz, R., & Morones-Ramírez, J. R. (2018). In vivo antimicrobial activity of silver nanoparticles produced via a green chemistry synthesis using acacia rigidula as a

- reducing and capping agent. *International Journal of Nanomedicine*, 13, 2349–2363. <https://doi.org/10.2147/IJN.S160605>
- Esfahani, N. N., Toghraie, D., & Afrand, M. (2017). A new correlation for predicting the thermal conductivity of ZnO–Ag (50%–50%)/water hybrid nanofluid: An experimental study. *Powder Technology*, 323, 367–373. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.10.025>
- Godson, L., Deepak, K., Enoch, C., Jefferson, B., & Raja, B. (2013). Heat transfer characteristics of silver/water nanofluids in a shell and tube heat exchanger. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 14(3), 489–496. <https://doi.org/10.1016/j.acme.2013.08.002>
- Gupta, M., Vinay, S., Kumar, R., & Said, Z. (2017). A review on thermophysical properties of nanofluids and heat transfer applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 74, pp. 638–670). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.073>
- Hajatzadeh Pordanjani, A., Aghakhani, S., Afrand, M., Mahmoudi, B., Mahian, O., & Wongwises, S. (2019). An updated review on application of nanofluids in heat exchangers for saving energy. *Energy Conversion and Management* (Vol. 198). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.111886>
- Hamilton, R. L., & Crosser, O. K. (1962). Thermal conductivity of heterogeneous two-component systems. *Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals*, 1(3), 187–191. <https://doi.org/10.1021/i160003a005>
- Heydari, A., Shateri, M., & Sanjari, S. (2017). Numerical Analysis of a Small Size Baffled Shell-and-Tube Heat Exchanger Using Different Nano-Fluids. *Heat Transfer Engineering*, 39(2), 141–153. <https://doi.org/10.1080/01457632.2017.1288052>
- Hwang, Y., Park, H. S., Lee, J. K., & Jung, W. H. (2006). Thermal conductivity and lubrication characteristics of nanofluids. *Current Applied Physics*, 6(SUPPL. 1). <https://doi.org/10.1016/j.cap.2006.01.014>
- Iyahraja, S., Selwin Rajadurai, J., Siva Subramanian, B., Siva Subramanian, S., Sivasankar, P., & Subash, S. (2019). Investigation on convective heat transfer and friction factor of silver–water nanofluid under laminar flow – an experimental study. *Heat and Mass Transfer/Waerme- Und Stoffuebertragung*, 55(10), 3029–3039. <https://doi.org/10.1007/s00231-019-02640-y>
- Kang, H. U., Kim, S. H., & Oh, J. M. (2006). Estimation of thermal conductivity of nanofluid using experimental effective particle volume. *Experimental Heat Transfer*, 19(3), 181–191. <https://doi.org/10.1080/08916150600619281>
- Kang Heo, Y., Antoaneta Bratescu, M., Aburaya, D., & Saito, N. (2014). A phonon thermodynamics approach of gold nanofluids synthesized in solution plasma. *Applied Physics Letters*, 104(11). <https://doi.org/10.1063/1.4868872>
- Kayabaşı, U., Kakaç, S., Aradag, S., & Pramuanjaroenkij, A. (2019). Experimental Investigation of Thermal and Hydraulic Performance of a Plate Heat Exchanger Using Nanofluids.

Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 92(3), 783–796.
<https://doi.org/10.1007/s10891-019-01987-7>

- Khan, L., Roheim El-Ghalban, A., Ali Khan, L., Ali El-ghalban, D., & El-Ghalban, A. (2008). *Heat Exchanger Exergetic Lifecycle Cost Optimization using Evolutionary Algorithms Heat Exchanger Exergetic Lifecycle Cost Optimization using Evolutionary Algorithms Exergy destruction rate WSEAS TRANSACTIONS on HEAT and MASS TRANSFER*.
<https://www.researchgate.net/publication/239921815>
- Lu, G., Duan, Y. Y., & Wang, X. D. (2014). Surface tension, viscosity, and rheology of water-based nanofluids: a microscopic interpretation on the molecular level. *Journal of Nanoparticle Research*, 16(9). <https://doi.org/10.1007/s11051-014-2564-2>
- Ma, T., Guo, Z., Lin, M., & Wang, Q. (2021). Recent trends on nanofluid heat transfer machine learning research applied to renewable energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 138. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110494>
- Maré, T., Halefadi, S., Sow, O., Estellé, P., Duret, S., & Bazantay, F. (2011). Comparison of the thermal performances of two nanofluids at low temperature in a plate heat exchanger. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 35(8), 1535–1543.
<https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2011.07.004>
- Masoud Hosseini, S., Safaei, M. R., Estellé, P., & Hadi Jafarnia, S. (2019). Heat transfer of water-based carbon nanotube nanofluids in the shell and tube cooling heat exchangers of the gasoline product of the residue fluid catalytic cracking unit. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 140(1), 351–362. <https://doi.org/10.1007/s10973-019-08813-5>
- Mehta, K. S., Kundan, L., & Mallick, S. S. (2019). A study on heat transfer and pressure drop in a turbulent flow regime of thermally insulated and conducting nanofluids. *Journal of Nanofluids*, 8(3), 490–499. <https://doi.org/10.1166/jon.2019.1602>
- Moldoveanu, G. M., & Minea, A. A. (2019). Specific heat experimental tests of simple and hybrid oxide-water nanofluids: Proposing new correlation. *Journal of Molecular Liquids*, 279, 299–305. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.01.137>
- Moldoveanu, G. M., Minea, A. A., Humnic, G., & Humnic, A. (2019). Al₂O₃/TiO₂ hybrid nanofluids thermal conductivity: An experimental approach. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 137(2), 583–592. <https://doi.org/10.1007/s10973-018-7974-4>
- Moldoveanu, G. M., Minea, A. A., Iacob, M., Ibanescu, C., & Danu, M. (2018). Experimental study on viscosity of stabilized Al₂O₃, TiO₂ nanofluids and their hybrid. *Thermochimica Acta*, 659, 203–212. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2017.12.008>
- Moradi, A., Toghraie, D., Isfahani, A. H. M., & Hosseinian, A. (2019). An experimental study on MWCNT–water nanofluids flow and heat transfer in double-pipe heat exchanger using porous media. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 137(5), 1797–1807.
<https://doi.org/10.1007/s10973-019-08076-0>

- Nazarzade, S., Ghorbani, H. R., & Jafarpourgolroudbary, H. (2019). Synthesis, preparation and the experimental study of silver/water nanofluid to optimize convective heat transfer in a shell and tube heat exchanger. *Inorganic and Nano-Metal Chemistry*, 49(6), 173–176. <https://doi.org/10.1080/24701556.2019.1606827>
- Okonkwo, E. C., Wole-Osho, I., Almanassra, I. W., Abdullatif, Y. M., & Al-Ansari, T. (2021). An updated review of nanofluids in various heat transfer devices. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* (Vol. 145, Issue 6, pp. 2817–2872). Springer Science and Business Media B.V. <https://doi.org/10.1007/s10973-020-09760-2>
- Palanisamy, K., & Mukesh Kumar, P. C. (2019). Experimental investigation on convective heat transfer and pressure drop of cone helically coiled tube heat exchanger using carbon nanotubes/water nanofluids. *Heliyon*, 5(5). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01705>
- Paul, G., Pal, T., & Manna, I. (2010). Thermo-physical property measurement of nano-gold dispersed water based nanofluids prepared by chemical precipitation technique. *Journal of Colloid and Interface Science*, 349(1), 434–437. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2010.05.086>
- Permanasari, A. A., Kuncara, B. S., Puspitasari, P., Sukarni, S., Ginta, T. L., & Irdianto, W. (2019). Convective heat transfer characteristics of TiO₂-EG nanofluid as coolant fluid in heat exchanger. *AIP Conference Proceedings*, 2120. <https://doi.org/10.1063/1.5115691>
- Pourhoseini, S. H., Naghizadeh, N., & Hoseinzadeh, H. (2018). Effect of silver-water nanofluid on heat transfer performance of a plate heat exchanger: An experimental and theoretical study. *Powder Technology*, 332, 279–286. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.03.058>
- Puliti, G., Paolucci, S., & Sen, M. (2012). Thermodynamic properties of gold-water nanofluids using molecular dynamics. *Journal of Nanoparticle Research*, 14(12). <https://doi.org/10.1007/s11051-012-1296-4>
- Rudyak, V. Y., & Minakov, A. v. (2018). Thermophysical properties of nanofluids. *European Physical Journal E*, 41(1), 1–12. <https://doi.org/10.1140/epje/i2018-11616-9>
- Sabir, R., Ramzan, N., Umer, A., & Muryam, H. (2015). *An Experimental Study of Forced Convective Heat Transfer Characteristic of Gold Water Nanofluid in Laminar Flow*. 27(1), 235–241.
- Said, Z., Sajid H, M., Kamyar, A., & Saidur, R. (2013). Experimental investigation on the stability and density of TiO₂, Al₂O₃, SiO₂ and TiSiO₄. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 16(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/16/1/012002>
- Said, Z., Sundar, L. S., Tiwari, A. K., Ali, H. M., Sheikholeslami, M., Bellos, E., & Babar, H. (2022). Recent advances on the fundamental physical phenomena behind stability, dynamic motion, thermophysical properties, heat transport, applications, and challenges of nanofluids. *Physics Reports* (Vol. 946, pp. 1–94). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2021.07.002>

- Sarafraz, M. M., & Hormozi, F. (2015). Intensification of forced convection heat transfer using biological nanofluid in a double-pipe heat exchanger. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 66, 279–289. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2015.03.028>
- Selvam, C., Mohan Lal, D., & Harish, S. (2016). Thermophysical properties of ethylene glycol-water mixture containing silver nanoparticles. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 30(3), 1271–1279. <https://doi.org/10.1007/s12206-016-0231-5>
- Sharma, P., Baek, I. H., Cho, T., Park, S., & Lee, K. B. (2011). Enhancement of thermal conductivity of ethylene glycol based silver nanofluids. *Powder Technology*, 208(1), 7–19. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2010.11.016>
- Singh, S. K., & Sarkar, J. (2018). Energy, exergy and economic assessments of shell and tube condenser using hybrid nanofluid as coolant. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 98, 41–48. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2018.08.005>
- Subramanian, R., Senthil Kumar, A., Vinayagar, K., & Muthusamy, C. (2020). Experimental analyses on heat transfer performance of TiO₂–water nanofluid in double-pipe counter-flow heat exchanger for various flow regimes. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 140(2), 603–612. <https://doi.org/10.1007/s10973-019-08887-1>
- Timofeeva, E. v., Yu, W., France, D. M., Singh, D., & Routbort, J. L. (2011). Nanofluids for heat transfer: An engineering approach. *Nanoscale Research Letters*, 6(1), 1–7. <https://doi.org/10.1186/1556-276X-6-182>
- Tsai, C. Y., Chien, H. T., Ding, P. P., Chan, B., Luh, T. Y., & Chen, P. H. (2004). Effect of structural character of gold nanoparticles in nanofluid on heat pipe thermal performance. *Materials Letters*, 58(9), 1461–1465. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2003.10.009>
- Ullah, M. R., Ishtiaq, T. M., & Mamun, M. A. H. (2019). Heat transfer enhancement in shell and tube heat exchanger by using Al₂O₃/water and TiO₂/water nanofluid. *AIP Conference Proceedings*, 2121. <https://doi.org/10.1063/1.5115925>
- Vallejo, J. P., Prado, J. I., & Lugo, L. (2022). Hybrid or mono nanofluids for convective heat transfer applications. A critical review of experimental research. In *Applied Thermal Engineering* (Vol. 203). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117926>
- Xuan, Y., & Li, Q. (2000). Heat transfer enhancement of nanofluids. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 21(1), 58–64. [https://doi.org/10.1016/S0142-727X\(99\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0142-727X(99)00067-3)
- Xuan, Y., & Roetzel, W. (2000). Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 43(19), 3701–3707. <https://doi.org/10.1016/j.iej.2017.01.005>
- Yu, W., France, D. M., Routbort, J. L., & Choi, S. U. S. (2008). Review and comparison of nanofluid thermal conductivity and heat transfer enhancements. *Heat Transfer Engineering*, 29(5), 432–460. <https://doi.org/10.1080/01457630701850851>