

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**



**ANÁLISIS TÉRMICO E HIDRODINÁMICO DEL FLUJO DE
NANOFLUIDOS CON PROPIEDADES TERMOFÍSICAS
MODIFICADAS FLUYENDO A TRAVÉS DE UNA
TUBERÍA RECTA Y SU EFECTO SOBRE LA
TRANSFERENCIA DE CALOR**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO MECÁNICO**

JOSEPH EDHER RAMIREZ CHAUPIS

PROMOCIÓN 2008 – I

LIMA – PERÚ

2013

DEDICATORIA

*A mis padres, **Rosa Chaupis y Eudosis Ramírez**, por su ejemplo de superación y ser fuente de amor infinito, en todo lugar y momento.*

*A mis hermanos **Aldo, Jefferson y Gaby**, por el apoyo incansable y a mi tía **Josefina**, por la motivación constante.*

Joseph Edher Ramírez Chaupis

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1.1. Micrografías de nanopartículas.....	14
Fig. 2.1. Publicaciones sobre nanofluidos, recopiladas por el grupo de nanofluidos del LEST-UFU.....	19
Fig. 2.2. Comparación de la conductividad térmica de algunas materiales comunes en aplicaciones térmicas.....	21
Fig. 2.3. Clasificación del banco de artículos.....	32
Fig. 2.4. Efecto sobre la conductividad relativa $k = k_{nf}/k_{fb}$ en relación con el espesor de <i>nanocapa</i> y el diámetro de la nanopartícula.....	37
Fig. 2.5. Incremento de la conductividad térmica con la razón de empaquetamiento Φ	39
Fig. 2.6. Comparación de los valores calculados con el modelo de Maxwell y datos experimentales.....	42
Fig. 2.7. Valores de intensificación de la conductividad térmica usando los modelos clásicos de las referencias.....	45
Fig. 2.8. Representación esquemática de la nanocapa interfacial en un arreglo de nanopartículas.....	46
Fig. 2.9. Desarrollo del perfil de velocidades al interior del fluido.....	62
Fig. 2.10. Desarrollo del perfil de temperatura al interior del fluido (enfriamiento).	63
Fig. 2.11. Desarrollo del perfil de temperatura al interior del fluido (calentamiento).....	63
Fig. 2.12. Volumen de control para el balance de energía.....	66
Fig. 2.13. Desarrollo de temperaturas de pared y media del fluido.	68
Fig. 2.14. Resultados obtenidos en soluciones de longitud de entrada para un flujo laminar en un tubo circular.....	72
Fig. 2.15. Esquema de banco de experimentos operando con flujo de calor constante.....	76
Fig. 2.16. Esquema de banco de experimentos operando con temperatura de pared constante.....	76
Fig. 3.1. Representación esquemática de la “preparación” de nanofluidos.....	81
Fig. 3.2. Intensificación de la conductividad térmica de nanofluidos para distintas razones de conductividad de la nanopartícula y el fluido base.....	84
Fig. 3.3. Comparación de los modelos de viscosidad en función de la concentración volumétrica.....	85
Fig. 3.4. Tendencia de la intensificación de la masa específica en nanofluidos variando con la concentración volumétrica.....	86
Fig. 3.5. Tendencia de la variación del calor específico en nanofluidos con $\rho_r = 2$, variando con la concentración volumétrica.....	87
Fig. 3.6. Tendencia de la variación del calor específico en nanofluidos con $\rho_r = 5$, variando con la concentración volumétrica.....	87
Fig. 3.7. Masas específicas relativas a partir los datos de la Tab. 3.1.....	90
Fig. 3.8. Calores específicos relativos a partir de los datos de la Tab. 3.1.....	90
Fig. 3.9. Conductividades térmicas relativas a partir de los datos de la Tab. 3.1.....	91
Fig. 3.10. Esquema del proceso de solución numérica de un problema.....	96
Fig. 3.11. Ejemplo del aislamiento de un elemento objeto de estudio.....	98
Fig. 3.12. Tipos de celdas utilizadas en CFD.....	99
Fig. 3.13. Vista de la ventana principal de Workbench®.....	102
Fig. 3.14. (A) Tipos de análisis disponibles en Workbench®, (B) Componentes individuales..	103
Fig. 3.15. Algunos de los análisis posibles en ANSYS®.....	103
Fig. 3.16. Ejemplo de integración de diferentes tipos de análisis.	104
Fig. 3.17. Bloques componentes para simulación mediante Workbench®.....	105
Fig. 3.18. Sección de interés en bancos experimentales para la determinación de la intensificación de la transferencia de calor, operando bajo un flujo de calor constante.....	105
Fig. 3.19. Esquema del proyecto para un flujo de nanofluidos.	107
Fig. 3.20. Vista esquemática de la geometría del problema.	109

Fig. 3.21. Vista del detalle del refinamiento de malla en la pared del tubo.....	111
Fig. 3.22. Vista de la ventana principal de FLUENT®.....	112
Fig. 3.23. Opciones generales para la definición de la simulación.....	113
Fig. 3.24. Opciones para la definición de modelos empleados en la simulación.....	113
Fig. 3.25. Biblioteca de propiedades de los nanofluidos preparados.	114
Fig. 3.26. Campo de velocidades impuesto en el dominio del fluido.....	116
Fig. 3.27. Campo de temperaturas resultado del flujo de calor a través de la pared.....	117
Fig. 3.28. Gráfico de temperaturas en dos lugares geométricos usando CFD-Post.....	118
Fig. 3.29. Vista esquemática de la posición de las secciones de control.....	119
Fig. 3.30. Ventana de definición de la velocidad de entrada (régimen turbulento).....	121
Fig. 3.31. Definición del flujo de calor constante (régimen turbulento).....	122
Fig. 3.32. Esquema del proyecto para la simulación de los nanofluidos basados en agua, fluyendo en régimen turbulento.	123
Fig. 4.1. Tendencia de las propiedades para los nanofluidos basados en agua, variando con la concentración volumétrica.	126
Fig. 4.2. Destaque de la tendencia de las propiedades para el nanofluido F1N4, variando con la concentración volumétrica.	127
Fig. 4.3. Tendencia de las propiedades para los nanofluidos basados en etileno glicol, variando con la concentración volumétrica.	129
Fig. 4.4. Tendencia de las propiedades para los nanofluidos basados en poli-alfa-olefin, variando con la concentración volumétrica.	129
Fig. 4.5. Variación del Pr para todos los nanofluidos, variando con la concentración volumétrica.....	130
Fig. 4.6. Variación del Pr para los nanofluidos basados en agua, variando con la concentración volumétrica.....	131
Fig. 4.7. Variación del Pr para los nanofluidos basados en etileno glicol, variando con la concentración volumétrica.....	131
Fig. 4.8. Variación del Pr para los nanofluidos basados en poli-alfa-olefin, variando con la concentración volumétrica.....	132
Fig. 4.9. Perfil de velocidad para el nanofluido F1N1 ($Re = 500$).....	134
Fig. 4.10. Perfil de velocidad para el nanofluido F1N4 ($Re = 500$).....	135
Fig. 4.11. Perfil de velocidad para el nanofluido F2N3 ($Re = 500$).....	136
Fig. 4.12. Perfil de velocidad para el nanofluido F2N4 ($Re = 100$).....	136
Fig. 4.13. Perfil de velocidad para el nanofluido F3N3 ($Re = 500$).....	138
Fig. 4.14. Perfil de velocidad para el nanofluido F3N4 ($Re = 500$).....	139
Fig. 4.15. Perfil de velocidad para el nanofluido F1N1 ($Re = 10000$).....	140
Fig. 4.16. Perfil de velocidad para el nanofluido F2N3 ($Re = 10000$).....	140
Fig. 4.17. Perfil de velocidad para el nanofluido F3N3 ($Re = 10000$).....	141
Fig. 4.18. Perfil de velocidad para el nanofluido F1N4 ($Re = 10000$).....	142
Fig. 4.19. Perfil de velocidad para el nanofluido F2N4 ($Re = 10000$).....	142
Fig. 4.20. Perfil de velocidad para el nanofluido F3N4 ($Re = 10000$).....	143
Fig. 4.21. Perfil de temperatura para el nanofluido F1N1 ($Re = 500$).....	146
Fig. 4.22. Perfil de temperatura para el nanofluido F2N3 ($Re = 500$).....	146
Fig. 4.23. Perfil de temperatura para el nanofluido F3N3 ($Re = 500$).....	147
Fig. 4.24. Perfil de temperatura para el nanofluido F1N4 ($Re = 500$).....	148
Fig. 4.25. Perfil de temperatura para el nanofluido F2N4 ($Re = 500$).....	148
Fig. 4.26. Perfil de temperatura para el nanofluido F3N4 ($Re = 500$).....	149
Fig. 4.27. Perfil de temperatura para el nanofluido F1N1 ($Re = 10000$).....	150
Fig. 4.28. Perfil de temperatura para el nanofluido F2N3 ($Re = 10000$).....	150
Fig. 4.29. Perfil de temperatura para el nanofluido F3N3 ($Re = 10000$).....	151
Fig. 4.30. Perfil de temperatura para el nanofluido F1N4 ($Re = 10000$).....	152
Fig. 4.31. Perfil de temperatura para el nanofluido F2N4 ($Re = 10000$).....	152

Fig. 4.32. Perfil de temperatura para el nanofluido F3N4 ($Re = 10000$).....	153
Fig. 4.33. Temperaturas media (T_m) y de pared (T_p) a lo largo de la tubería para el nanofluido F1N1.....	154
Fig. 4.34. Temperaturas media (T_m) y de pared (T_s) a lo largo de la tubería para el nanofluido F2N3.....	155
Fig. 4.35. Temperaturas media (T_m) y de pared (T_s) a lo largo de la tubería para el nanofluido F3N3.....	156
Fig. 4.36. Coeficiente medio de transferencia de calor por convección para los nanofluidos basados en agua.....	158
Fig. 4.37. Coeficiente medio de transferencia de calor por convección para los nanofluidos basados en etileno glicol.....	159
Fig. 4.38. Coeficiente medio de transferencia de calor por convección para los nanofluidos basados en poli-alfa-olefín.....	160
Fig. 4.39. Coeficiente medio de transferencia de calor de los nanofluidos basados en agua para régimen laminar.....	161
Fig. 4.40. Coeficiente medio de transferencia de calor de los nanofluidos basados en etileno glicol para régimen laminar.....	162
Fig. 4.41. Coeficiente medio de transferencia de calor de los nanofluidos basados en poli-alfa-olefín para régimen laminar.....	162
Fig. 4.42. Coeficiente medio de transferencia de calor de los nanofluidos basados en agua para régimen turbulento.....	163
Fig. 4.43. Coeficiente medio de transferencia de calor de los nanofluidos basados en etileno glicol para régimen turbulento.....	164
Fig. 4.44. Coeficiente medio de transferencia de calor de los nanofluidos basados en poli-alfa-olefín para régimen turbulento.....	165
Fig. 4.45. Tendencia de \overline{Nu} para los nanofluidos basados en agua (en régimen laminar)...	166
Fig. 4.46. Tendencia de \overline{Nu} para los nanofluidos basados en etileno glicol (en régimen laminar).....	167
Fig. 4.47. Tendencia de \overline{Nu} para los nanofluidos basados en poli-alfa-olefín (en régimen laminar).....	167
Fig. 4.48. Tendencia de \overline{Nu} para nanofluidos basados en agua (régimen turbulento).....	168
Fig. 4.49. Tendencia de \overline{Nu} para nanofluidos basados en etileno glicol (régimen turbulento).....	169
Fig. 4.50. Tendencia de \overline{Nu} para nanofluidos basados en poli-alfa-olefín (régimen turbulento).....	169
Fig. 4.51. Tendencia de la caída de presión para los nanofluidos basados en agua (régimen laminar)	172
Fig. 4.52. Destaque de la tendencia de la caída de presión para los nanofluidos basados en agua (régimen laminar).....	173
Fig. 4.53. Tendencia de la caída de presión para los nanofluidos basados en etileno glicol (régimen laminar).....	173
Fig. 4.54. Tendencia de la caída de presión para los nanofluidos basados en poli-alfa-olefín (régimen laminar).....	174
Fig. 4.55. Tendencia de la caída de presión para los nanofluidos basados en agua (régimen turbulento).....	175
Fig. 4.56. Destaque de la tendencia de la caída de presión para los nanofluidos basados en agua (régimen turbulento).....	176
Fig. 4.57. Tendencia de la caída de presión para los nanofluidos basados en etileno glicol (régimen turbulento).....	176
Fig. 4.58. Tendencia de la caída de presión para los nanofluidos basados en poli-alfa-olefín (régimen turbulento).....	177

LISTA DE TABLAS

Tab. 2.1. Investigaciones experimentales sobre la intensificación de la conductividad térmica.	26
Tab. 2.2. Modelos Clásicos para el cálculo de la conductividad térmica efectiva de suspensiones sólido/líquido.....	44
Tab. 2.3. Modelos teóricos para la determinación de la viscosidad efectiva.....	53
Tab. 3.1. Propiedades de fluidos base y nanopartículas propuestas.....	82
Tab. 3.2. Masa específica relativa a partir de los datos de la Tab. 3.1.....	88
Tab. 3.3. Calores específicos relativos a partir de los datos de la Tab. 3.1.....	89
Tab. 3.4. Conductividades térmicas relativas a partir de los datos de la Tab. 3.1.....	89
Tab. 3.5. Combinaciones restringidas de nanofluidos.....	92
Tab. 3.6. Identificadores de los nanofluidos a ser utilizados.....	93
Tab. 3.7. Propiedades de los nanofluidos a ser usados en las simulaciones.....	94
Tab. 3.8. División del dominio para la generación de la malla numérica.....	111
Tab. 3.9. Condiciones de contorno sobre el dominio del fluido en régimen laminar.....	114
Tab. 3.10. Condiciones de contorno sobre el dominio del fluido en régimen laminar.....	120
Tab. 4.1. Velocidades de entrada para los nanofluidos que contienen alúmina.....	145
Tab. 4.2. Variaciones de las propiedades de los nanofluidos.....	179
Tab. 4.3. Intensificación del valor de \bar{h} para los nanofluidos basados en agua, agrupados por tipo de nanopartícula utilizada.....	181
Tab. 4.4. Intensificación del valor de \bar{h} para los nanofluidos basados en etileno glicol, agrupados por tipo de nanopartícula utilizada.....	181
Tab. 4.5. Intensificación del valor de \bar{h} para los nanofluidos basados en poli-alfa-oleofín, agrupados por tipo de nanopartícula utilizada.....	182

SIMBOLOGÍA

Letras

A	Área [m ²]
A_c	Área de transferencia de calor [m ²]
C	Parámetro empírico del modelo de Jang y Choi
C_p	Calor específico
d_f	Dimensión fractal del agregado
d_{np}	Diámetro da nanopartícula [nm]
D	Diámetro do tubo [m]
D_p	Constante de difusión particular
f	Factor de fricción
Gz	Número de Graetz
h	Coefficiente de transferencia de calor por convección [W/m ² -K]
I	Intensidad de turbulência (%)
k	Conductividad térmica [W/m-K]
k_B	Constante de Boltzmann [m ² kg/s ² -K]
k_{np}^R	Resistencia de contato de la nanopartícula
l	Longitud de escala de la turbulencia [m]
L	Longitud [m]
L_{ent}	Longitud de entrada en el tubo [m]
L_{teste}	Longitud de pruebas en el tubo [m]
m	Parámetro semi-empírico para el modelo de conductividad térmica de Wiener
M	Parámetro do modelo de Xie
\dot{m}	Flujo másico [m ³ /s]
Nu	Número de Nusselt
Pe	Número de Peclet
Pr	Número de Prandtl
Δp	Pérdida de presión
\dot{Q}	Tasa de transferencia de calor [W]
r	Radio
R	Radio del tubo [m]
Re	Número de Reynolds
t	Tiempo [s]
t_{nc}	Espesor de la nanocapa [nm]
T	Temperatura [K]
ΔT_{ml}	Diferencia de temperatura media logarítmica
u_m	Velocidad axial media [m/s]
u'	Velocidad fluctuante característica de la turbulência [m/s]
\dot{W}	Potencia de bombeamento [W]

Griegas

α	Difusividad térmica [m ² /s]
β	Razón entre el espesor de nanocapa y radio de la nanopartícula en el modelo de Xie
γ	Parámetro del modelo de Leong
ε	Razón entre conductividades
θ	Parámetro del modelo de Xie
μ	Viscosidad dinámica [Pa-s]
ν	Viscosidad cinemática [m ² /s]
ρ	Masa específica [kg/m ³]
τ	Parámetro en el modelo de Xue
τ_D	Escala de tiempo para el desplazamiento de la nanopartícula
τ_H	Escala de tiempo para el transporte de calor
ϕ	Concentración volumétrica (%)
Φ	Razón de empaquetamiento de nanopartículas
ψ	Parámetro de esfericidad en el modelo de Hamilton-Crosser

Subscritos

<i>cl</i>	<i>Cluster</i>
<i>fb</i>	Fluido base
<i>m</i>	Media
<i>np</i>	Nanopartícula
<i>nf</i>	Nanofluido
<i>nc</i>	Nanocapa
<i>p</i>	Pared

Siglas

ADI	Agua deionizada
EG	Etileno glicol
PAO	Poli-alfa-oleofin
EMT	Effective Medium Theory
CVD	Chemical Vapor Deposition
CFD	Computational Fluid Dynamics
LEST	Laboratório de Energia e Sistemas Térmicos

ÍNDICE

DEDICATORIA.....	<i>ii</i>
LISTA DE FIGURAS.....	<i>iii</i>
LISTA DE TABLAS.....	<i>vi</i>
SIMBOLOGÍA.....	<i>vii</i>
ÍNDICE.....	<i>ix</i>
PRÓLOGO.....	<i>xi</i>
CAPÍTULO I – INTRODUCCIÓN.....	12
1.1. MOTIVACIÓN	12
1.2. OBJETIVOS	13
1.3. CONSIDERACIONES INICIALES	13
1.3.1. NANOTECNOLOGÍA	13
1.3.2. NANOFLUIDO	15
CAPÍTULO II – MARCO TEÓRICO	17
2.1. INTRODUCCIÓN	17
2.2. RECOPIACIÓN DE ARTÍCULOS	18
2.3. SÍNTESIS DE NANOFLUIDOS	21
2.3.1. MÉTODOS DE UN PASO	22
2.3.2. MÉTODOS DE DOS PASOS	24
2.3.3. OTROS MÉTODOS	26
2.4. CARACTERIZACIÓN DE LOS NANOFLUIDOS	27
2.5. ESTIMATIVA DE LAS PROPIEDADES INTENSIFICADAS DE LOS NANOFLUIDOS..	31
2.5.1. MECANISMOS DE TRNSPORTE DE CALOR EN NANOFLUIDOS	32
2.5.2. CORRELACIONES TEÓRICAS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE NANOFLUIDOS	40
2.5.3. CORRELACIONES TEÓRICAS PARA DETERMINAR LA VISCOSIDAD DE NANOFLUIDOS	52
2.5.4. CORRELACIONES TEÓRICAS PARA OTRAS PROPIEDADES DE NANOFLUIDOS	54
2.6. CONVECCIÓN FORZADA EN FLUJO INTERNO	54
2.6.1. CONSIDERACIONES HIDRODINÁMICAS Y TÉRMICAS	56
2.6.2. TIPOS DE REGÍMENES DE FLUJO	60
2.6.3. REGIÓN DE ENTRADA	62
2.6.4. LONGITUDES DE ENTRADA	64
2.6.5. ANÁLISIS TÉRMICA PRELIMINAR: DOS CONDICIONES DE CONTORNO..	65

2.6.6.	CORRELACIONES PARA CONVECCIÓN LAMINAR Y TURBULENTA EN DUCTOS	70
2.7.	TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCIÓN DE NANOFLUIDOS	74
2.7.1.	INVESTIGACIONES EXPERIMENTALES	75
2.7.2.	SIMULACIONES NUMÉRICAS	78
CAPÍTULO III – METODOLOGÍA		80
3.1.	INTRODUCCIÓN	80
3.2.	CÁLCULO DE LAS PROPIEDADES DE LOS NANOFLUIDOS	81
3.3.	ALCANCES SOBRE SIMULACIÓN NUMÉRICA	95
3.4.	ENTORNO DE TRABAJO DE WORKBENCH®	102
3.5.	DEFINICIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL PROBLEMA	105
3.5.1.	CREACIÓN DE LA GEOMETRÍA	107
3.5.2.	GENERACIÓN DE LA MALLA NUMÉRICA	110
3.5.3.	CONFIGURACIÓN DEL PROBLEMA FÍSICO EN RÉGIMEN LAMINAR	111
3.5.4.	CONFIGURACIÓN DEL PROBLEMA FÍSICO EN RÉGIMEN TURBULENTO	119
CAPÍTULO IV – RESULTADOS		124
4.1.	INTRODUCCIÓN	124
4.2.	VARIACIÓN DE LAS PROPIEDADES	125
4.2.1.	VARIACIÓN DEL NÚMERO DE PRANDTL	129
4.3.	DESARROLLO DEL FLUJO DE NANOFLUIDO	133
4.3.1.	COMPORTAMIENTO HIDRODINÁMICO	133
4.3.2.	COMPORTAMIENTO TÉRMICO	144
4.4.	INTENSIFICACIÓN DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR	153
4.4.1.	TEMPERATURAS MEDIA Y DE PARED	155
4.4.2.	COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR	155
4.4.3.	NÚMERO DE NUSSELT	165
4.5.	CAÍDA DE PRESIÓN	170
4.6.	RESUMEN DE LOS RESULTADOS.....	178
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		184
BIBLIOGRAFÍA		189

PRÓLOGO

De forma resumida, el presente trabajo se encuentra estructurado de la siguiente manera:

El Capítulo I presenta la motivación y los objetivos del presente trabajo, así como algunos conceptos introductorios relacionados a la nanotecnología y, sobre todo, una definición básica de lo que es un nanofluido.

En el Capítulo II es presentado el marco teórico, producto de la revisión bibliográfica realizada sobre diversas publicaciones que estudiaron las características de los nanofluidos vislumbrando su aplicación en procesos de transferencia de calor que incluye: síntesis, caracterización y estimativa de las propiedades modificadas de los nanofluidos.

En el Capítulo III es descrita la metodología empleada para la creación del grupo de nanofluidos simulados. También fue hecho un breve resumen de las características de los programas utilizados para las simulaciones (WorkBench®, Design Modeler® y Fluent®), así como la definición de las condiciones geométricas y físicas del problema estudiado.

El Capítulo IV presenta, en primer lugar, las tendencias de variación de las propiedades modificadas de los nanofluidos estudiados en relación con la concentración volumétrica. Tales tendencias son ilustradas con la tentativa de visualizar el efecto combinado de estas variaciones en la transferencia de calor. Seguidamente, serán presentados los resultados de las simulaciones numéricas realizadas a las condiciones definidas, procesados de forma conveniente para mostrar el desarrollo hidrodinámico y térmico del flujo de nanofluidos, la intensificación de la transferencia de calor y la caída de presión.

Finalmente, el Capítulo V reúne las conclusiones derivadas de este trabajo, así como también recomendaciones para futuros trabajos en esta línea de investigación.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. Motivación

En la actualidad, la disipación de calor es una de las mayores barreras en innumerables sistemas, que van desde nivel micro (procesadores de computador, componentes electrónicos diversos, etc.) a nivel macro (sistemas de refrigeración industrial, automotriz, entre otros). La cantidad de calor generada por uno de estos procesos se ha incrementado notablemente con el desarrollo de sus capacidades y, con ello, la necesidad de ser enfriados de manera adecuada para conseguir un óptimo desempeño. A partir de ahí, numerosos esfuerzos apuntaron al mejoramiento de los sistemas de transferencia de calor utilizados en la industria. En ese sentido, la búsqueda de nuevos materiales y nuevos fluidos de trabajo con características técnicas favorables son indispensables para, finalmente, aumentar la capacidad de transferencia de calor de esos sistemas.

Con el progreso de la ciencia e ingeniería térmica, el desarrollo de dispositivos y sistemas de escala cada vez menores se tornó en una gran área de interés. Como resultado, es posible obtener una considerable reducción del tamaño

de tales dispositivos e incluso de los sistemas, operando con igual o mayor eficiencia térmica sin variar drásticamente los principios básicos de su funcionamiento. Como ejemplo de los sectores favorecidos con este tipo de investigación tenemos a las industrias de transporte, electrónica, química, aeroespacial, manufactura, entre otros.

Con estas consideraciones, el presente trabajo pretende contribuir en la confirmación de la intensificación de la transferencia de calor con el uso de nanofluidos, vislumbrando su aplicación práctica en sistemas térmicos.

1.2. Objetivos

Son dos los objetivos principales del presente trabajo:

- Calcular los valores intensificados de las principales propiedades termofísicas de los nanofluidos más comúnmente encontrados en investigaciones teóricas y experimentales, con uso de los modelos teóricos desarrollados para tal fin por diferentes autores.
- Observar el comportamiento térmico e hidrodinámico de un flujo de nanofluidos en una tubería horizontal recta de sección circular, tanto en régimen laminar como turbulento.

1.3. Consideraciones iniciales

1.3.1. Nanotecnología

Richard Feynman, en su exposición del año 1959 en el California Institute of Technology, fue el primero en vislumbrar la posibilidad de manipular la materia a

escalas menores que la micrométrica para la obtención de tecnologías que permitan el aprovechamiento de todo el espacio que “existe en el fondo” (Feynman, 1959).

De ahí en adelante, el término nanotecnología (creado por el investigador japonés Norio Taniguchi en 1974 y popularizado por Eric Drexler en la década de 1980) ha sufrido muchas adaptaciones de acuerdo con los campos de aplicación que fueron surgiendo a lo largo del tiempo. Así, la nanotecnología puede ser entendida como la construcción de dispositivos y la fabricación de materiales funcionales mediante el control de la materia en la escala de los nanómetros. De esa manera, y cada vez más lejos de las leyes de la física clásica y más cerca de la física del estado sólido, son esperados nuevos fenómenos e nuevas propiedades de la materia.

En el campo de la producción de materiales, la obtención de partículas de dimensiones en el rango de 1 a 100 nanómetros ($1\text{nm} <> 10^{-9}\text{ m}$) ha permitido un mejor comportamiento de las propiedades inherentes de algunos materiales convencionales. La Fig. 1.1 muestra nanopartículas en micrografías obtenidas mediante un microscopio de transmisión electrónica (TEM, por sus siglas en inglés).

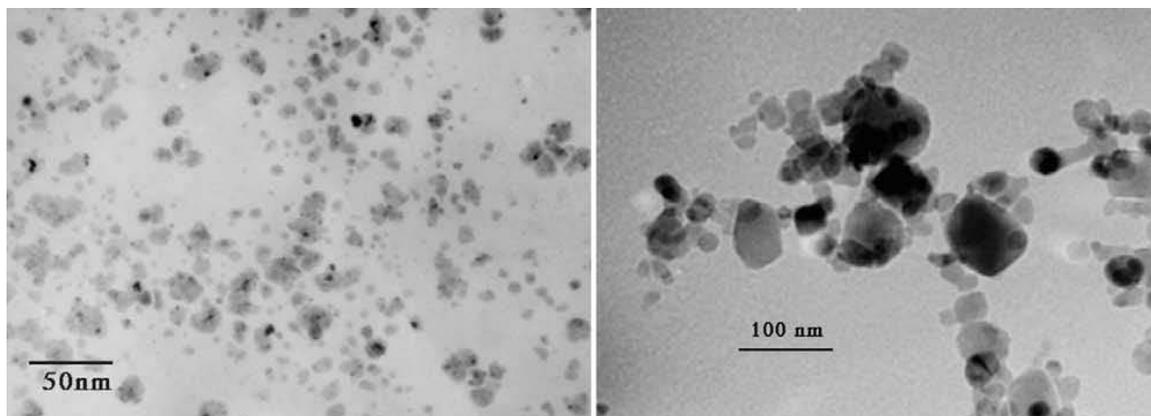


Figura 1.1. Micrografías de nanopartículas. Fuente: Keblinski; Eastman; Cahill, 2005.

Además de esto, la combinación de estas nanopartículas con otros materiales ha proporcionado nuevos compuestos con intensificación de sus propiedades mecánicas, eléctricas, térmicas, magnéticas, etc. En ese sentido, en la literatura especializada, es posible encontrar investigaciones que usan nanopartículas metálicas para incrementar las propiedades mecánicas de resinas (Guo et al., 2007), o usan nanopartículas ferromagnéticas en fluidos para mejorar la manipulación de estos nuevos ferrofluidos (Holm y Weis, 2005).

Particularmente en el área térmica, se tiene el gran desafío de la refrigeración en muchos campos de las más diversas industrias. Así, en la electrónica existe la tendencia a la miniaturización de los dispositivos de disipación de calor (Squires y Quake, 2005; y Eijkel y Berg, 2005), pasando por los sistemas de remoción de calor en motores de combustión interna (Valderrama, 2010), hasta llegar a los sistemas de refrigeración en los reactores de las centrales nucleares (Buongiorno y Hu, 2009). Una forma convencional para incrementar la disipación de calor es aumentar el área disponible para la transferencia de calor con el fluido de trabajo. Sin embargo, un inconveniente de este tipo de abordaje es que, junto con el tamaño del sistema, se complica la gestión de energía del mismo. Surge así la necesidad de mejorar las propiedades de transferencia de calor de los fluidos de trabajo empleados u optar por la producción de nuevos compuestos para tales fines. De la conjunción de ambos factores, y con base en estudios pasados sobre medios heterogéneos, fue previsto el uso de nanopartículas en fluidos refrigerantes convencionales.

1.3.2. Nanofluido

Son denominados nanofluidos aquellos materiales compuestos por nanopartículas o nanofibras, en orden de 1 a 100 nanómetros, suspendidas en

fluidos refrigerantes. Es importante destacar que estos fluidos poseen propiedades térmicas muy bajas en comparación con las de otros materiales como metales. Innumerables investigaciones experimentales han demostrado la intensificación anómala de las propiedades de los nanofluidos, principalmente la conductividad térmica. Tales nanofluidos presentan algunas ventajas en relación con aquellas suspensiones que usaban partículas de mayores dimensiones (tamaños micro y milimétrico); entre ellas: (1) mayor estabilidad, (2) menor impacto abrasivo y (3) mayor facilidad para fluir en microcanales, con menor riesgo de aglomeración. Estas ventajas aumentaron el interés por el estudio de estos compuestos en los últimos 15 años.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Introducción

Este capítulo comienza con una breve descripción del banco de artículos que fue confeccionado a lo largo de dos años por el grupo de nanofluidos del Laboratorio de Energia e Sistemas Térmicos en la Faculdade de Engenharia Mecânica de la Universidade Federal de Uberlândia (LEST – UFU)

Inmediatamente después, son resumidas las principales características de los métodos más comúnmente empleados en la síntesis de nanofluidos, además del papel importante que desempeña la caracterización de dichos nanofluidos para un mejor entendimiento de los fenómenos de intensificación de la conductividad térmica y de la viscosidad, tópicos que son observados en innumerables investigaciones.

Seguidamente, se presenta una pequeña exposición de las principales hipótesis sobre los mecanismos de transporte de calor en nanofluidos, junto con algunas correlaciones para la descripción de la intensificación de las propiedades

termofísicas más relevantes de los nanofluidos. Éstas serán utilizadas posteriormente para calcular las propiedades del banco de nanofluidos a simular.

Finalmente, se expone un resumen de las consideraciones generales de la convección forzada en flujos internos, que servirán de base para, en principio, validar los resultados de las simulaciones realizadas con los fluidos base, y también para el cálculo del principal objeto de estudio del presente trabajo: el coeficiente de transferencia de calor por convección.

2.2. Recopilación de artículos

Las pesquisas iniciales sobre el uso de nanofluidos y su posterior desarrollo tecnológico han demostrado el enorme potencial de estos nuevos fluidos en aplicaciones de transferencia de calor. Potencial que reúne actualmente grandes esfuerzos por parte de la industria y de muchas comunidades académicas a nivel mundial. Ha sido observado también, que la variación de las principales propiedades de los nanofluidos depende fuertemente de la relación entre las propiedades del fluido base y de las nanopartículas.

En los últimos diez años, se observó un rápido incremento en el número de publicaciones en la literatura abierta (esencialmente revistas) que reportan diversas investigaciones experimentales, teóricas o de revisión sobre el estudio de nanofluidos en aplicaciones térmicas. En la Fig. 2.1 es mostrado el aumento de tales investigaciones por año en la década pasada. Gran parte de esta bibliografía en constante crecimiento está enfocada en la descripción completa del fenómeno físico que permite a los nanofluidos intensificar muchas de sus propiedades termofísicas, más allá de los límites esperados para tales compuestos (previstos

por modelos teóricos). Con este objetivo, y dentro del área térmica, la Teoría de Medios Heterogéneos es aplicada en el intento de describir, principalmente, los valores anómalos de la conductividad térmica.

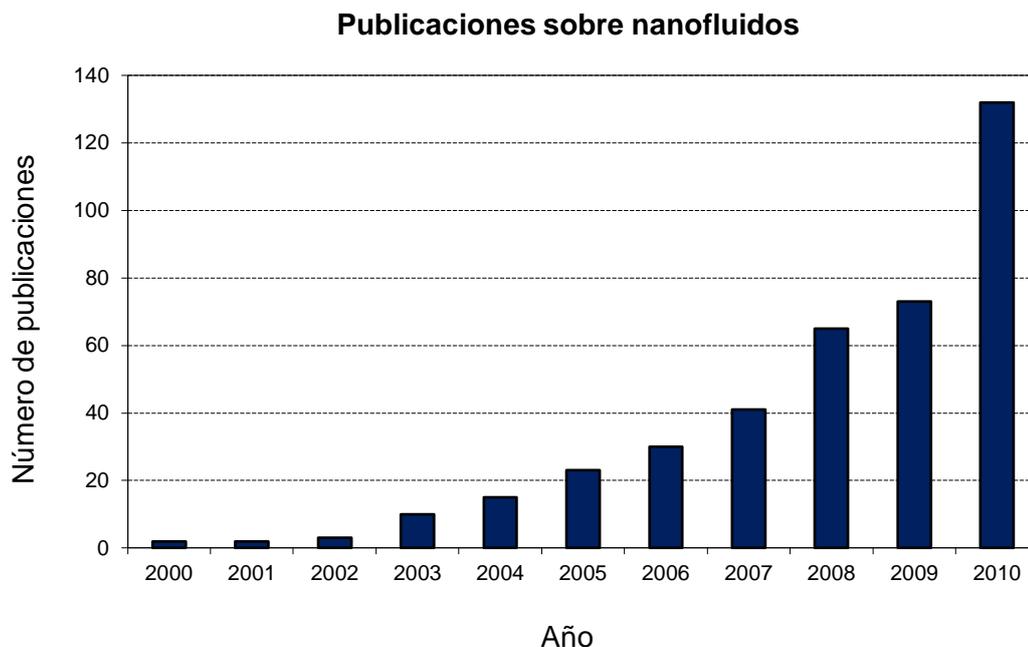


Figura 2.1. Publicaciones sobre nanofluidos, recopiladas por el grupo de nanofluidos del LEST-UFU.

En tanto, la transición del estudio teórico hacia la aplicación industrial requiere un mayor desarrollo de la teoría de nanofluidos y de la superación de algunas barreras tecnológicas para su producción. En ese sentido, es interesante destacar que el acceso a la información sobre nanofluidos no posee aún demasiadas restricciones, a pesar de existir algunas investigaciones de carácter privado.

El banco de artículos publicados, recopilado por el grupo de nanofluidos del LEST – UFU, es específico sobre las investigaciones de nanofluidos en el área térmica, en busca de su aplicación industrial. Hasta diciembre de 2010, contaba

con poco más de trescientos artículos. Las publicaciones fueron inicialmente divididas, según su tratamiento, en las siguientes categorías:

- Experimental: En los cuales predomina la observación de las propiedades de los nanofluidos y la respuesta de estos cuando son sometidos a determinadas condiciones (en la tentativa de describir su comportamiento hidrodinámico y térmico).
- Computacional: Este grupo contiene a aquellos artículos que pretenden estimar algunas de las propiedades de los nanofluidos con base en parámetros definidos y el análisis de los mecanismos físicos envueltos. También, se encuentran aquí artículos sobre simulación numérica de flujos de nanofluidos para diferentes configuraciones físicas.
- Revisión: En este grupo están incluidos los artículos que observan o detallan el desarrollo de uno o varios aspectos del estudio de nanofluidos y resumen las principales investigaciones sobre ellos.

Dentro de cada una de las dos primeras áreas fue hecha una subdivisión que depende del enfoque de cada investigación:

- Caracterización: De las propiedades térmicas y reológicas
- Convección: De flujos monofásicos y multifásicos
- Transferencia de masa
- Otros

En el caso de los artículos de revisión, no existe subdivisión, toda vez que abordan temas diversos que muchas veces incluyen uno o más de los tópicos mencionados anteriormente.

2.3. Síntesis de nanofluidos

Cuando son comparadas, la conductividad térmica de los fluidos utilizados en procesos de transferencia de calor es muchas veces menor que la conductividad de materiales sólidos (inclusive varias órdenes de magnitud en el caso de sólidos metálicos). Las diferencias son mostradas en la Fig. 2.2.

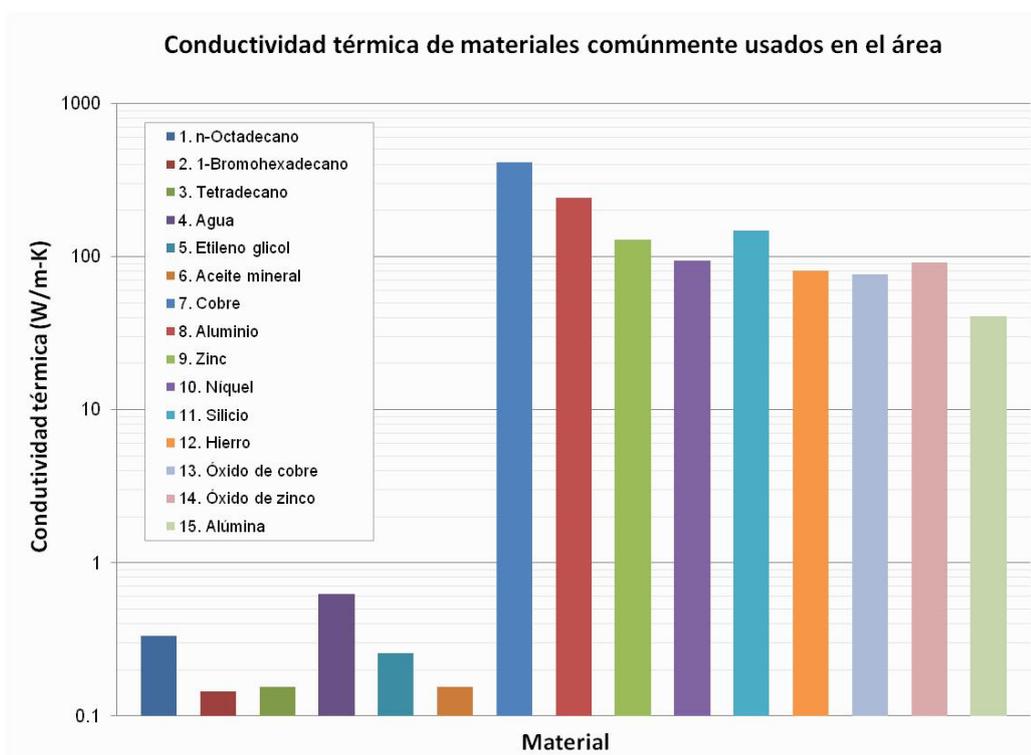


Figura 2.2. Comparación de la conductividad térmica de algunas materiales comunes en aplicaciones térmicas. Fuente: WEN et al., 2009.

La síntesis de nanofluidos es un paso clave para su utilización en aplicaciones prácticas, sobre todo en aspectos como la homogeneidad y estabilidad, en la búsqueda de la optimización de las propiedades intensificadas. Según las exigencias de las futuras aplicaciones, diferentes combinaciones de fluido base y nanopartícula deberán ser empleadas. En ese sentido, es posible obtener dispersiones de nanopartículas de óxidos, nitratos, metales, carburos y no

metales, en fluidos como agua, etileno glicol y diversos tipos de aceites. A pesar de que las pesquisas iniciales no tomaron en cuenta los aspectos de la síntesis de las nanopartículas, en la actualidad es considerada un factor relevante al momento de producir el nanofluido.

Los nanofluidos pueden ser obtenidos mediante dos tipos de proceso bastante diferenciados: el primero, la dispersión de nanopartículas producidas con anterioridad, por medios físicos o químicos, en el fluido base; y el segundo, por la degradación de un material base y su dispersión directa dentro del fluido base. En ambos casos, pueden ser usados aditivos que faciliten la homogeneización y garanticen la estabilidad del nanofluido producido.

Actualmente los métodos más comunes para la obtención de nanofluidos pueden ser clasificados en: i) Métodos de un paso y ii) Métodos de dos pasos. A continuación, es presentada una breve descripción de los métodos más utilizados para la síntesis de nanofluidos de uso experimental, así como las ventajas y desventajas existentes para su aplicación industrial.

2.3.1. Métodos de un paso

Se denominan así a aquellos procesos que combinan la síntesis de las nanopartículas con la preparación de los nanofluidos en un solo paso. Dentro de esta categoría, son comunes los procesos de evaporación directa de materiales sólidos (realizada en condiciones de vacío sobre un flujo de fluido base a baja presión) y los procesos de precipitación química. Estos tipos de técnicas tuvieron éxito al reducir los efectos de la aglomeración de las nanopartículas en general. En particular, son utilizados principalmente para sintetizar nanopartículas de metales sólidos, pues previenen en mayor medida su oxidación debido a las condiciones en las que opera.

Un ejemplo del uso de esta técnica puede ser encontrado en Eastman et al. (2001), donde fue utilizado un método físico de un paso para la preparación de los nanofluidos. En este proceso, vapor de cobre fue directamente condensado en forma de nanopartículas al contacto con un flujo de etileno glicol a baja presión al interior de una cámara de vacío. La mezcla homogénea de nanopartículas de cobre en etileno glicol mostró un incremento en la conductividad térmica de 40% a una concentración volumétrica de 0,3%, significativamente mayor de lo previsto a través de la Teoría del Medio Efectivo.

Otro método físico de un paso es el desarrollado por Tsung et al. (2003), denominado SANSS (Sistema de Síntesis de Nanopartículas por Arco Sumergido). Este método ya fue capaz de producir, con éxito, nanofluidos con nanopartículas de cobre (Lo et al., 2005a), óxido de cobre (Lo et al., 2005b) y óxido de titanio (Chang et al. 2003). Con este método, las nanopartículas son producidas por el calentamiento del material sólido en un electrodo mediante ignición por arco eléctrico e inmediatamente condensadas en un fluido al interior de una cámara de vacío para formar el nanofluido. Una gran desventaja de este tipo de método es la reducida cantidad de nanofluidos obtenida, apenas la necesaria para propósitos de investigación. Esto a causa de la dificultad tecnológica y económica que implica el condicionamiento de la cámara de vacío, que restringe su producción en gran escala.

La desventaja común de ambos métodos, ya sean físicos o químicos es que estos son desarrollados en procesos por lotes, además de tener un control limitado sobre un número de parámetros importantes, incluido el tamaño de las nanopartículas. La posibilidad de realizar la síntesis de manera continua y controlada incrementaría su viabilidad comercial. Otra restricción para el uso de este tipo de procesos, es que el fluido base debe poseer una baja presión de vapor

(de lo contrario, aumentaría el riesgo de aglomeración de nanopartículas). Por todo esto, aún es difícil vislumbrar este tipo de método como el principal proveedor comercial de nanofluidos en un futuro próximo.

2.3.2. *Métodos de dos pasos*

Estudios experimentales iniciales sobre nanofluidos utilizaron procesos de dos pasos, que primero sintetizaban las nanopartículas en forma de un polvo seco ultra fino, en su mayoría obtenida por condensación de un gas inerte (IGC, por sus siglas en inglés). Este método primero vaporiza el material base en una cámara de vacío y luego condensa ese vapor en nanopartículas por colisión con un flujo de gas inerte a presión controlada (siendo esta la principal diferencia con el método de un paso, en el cual el contacto ocurre directamente entre el material vaporizado y el fluido base). Las nanopartículas obtenidas en el primer paso son posteriormente dispersadas en el fluido base mediante procesos físicos de mezcla como sonicación u homogeneización a altas presiones.

Una de las mayores ventajas de este tipo de método es la gran variedad de nanofluidos que pueden ser obtenidos. Prácticamente cualquier material cerámico, metálico o no metálico puede ser reducido a un polvo ultra fino y luego ser dispersado en un fluido base previamente condicionado para tal fin. Se destaca también entre las ventajas el menor costo que representaría para la producción de nanopartículas y nanofluidos en escala industrial.

Sin embargo, los métodos de dos pasos presentan desventajas que son considerados desafíos tecnológicos: la alta probabilidad de aglomeración y la oxidación de las nanopartículas. Estos fenómenos se pueden presentar durante todo el proceso (antes, durante o después de la mezcla). En ese sentido, la aglomeración es un asunto crítico en todo desarrollo tecnológico que involucre la

manipulación de materiales a escala nanométrica, incluyendo los nanofluidos. El problema de aglomeración es resultado de las fuerzas intermoleculares de Van Der Waals entre las nanopartículas, siendo una de las principales barreras para la producción de nanofluidos en grandes cantidades mediante este proceso. Una solución para este inconveniente es la aplicación de un tratamiento químico en la superficie de contacto de las nanopartículas y el fluido base para mejorar la dispersión y reducir los efectos de las fuerzas intermoleculares. Algunas suspensiones de material particulado que están disponibles en el mercado (cerámicos y magnéticos son los más comunes) presentan los mismos problemas de aglomeración y sedimentación.

Por su naturaleza, la concentración de nanopartículas de óxidos metálicos es mayor que la de nanopartículas metálicas (para efectos equivalentes en la conductividad térmica), lo que incrementa la probabilidad de presentar aglomeraciones y deposición con el tiempo. A pesar de ellos, son preferidos los primeros debido a que son menos sensibles a la oxidación.

En la Tab. 2.1 es presentada una lista de algunas investigaciones experimentales desarrolladas hasta el momento. En ella se destacan la variedad de la naturaleza y el tamaño de las nanopartículas.

Tabla 2.1. Investigaciones experimentales sobre la intensificación de la conductividad térmica.

	Autor (año)	Nanofluido	Concentración (%)	Tamaño (nm)
Método de un Paso	Eastman et al. (2001)	Cu (envejecido) + EG	0,56	10
		Cu (nuevo) + EG	0,56	10
		Cu + EG	0,28	10
	Zhu et al. (2007)	Fe ₃ O ₄ + Agua	4,00	10
	Liu et al. (2006)	Cu + Agua	0,10	50-100
		Cu + Agua	0,10	75-100
		Cu + Agua	0,05	100-200
		Cu + Agua	0,10	100-300
		Cu + Agua	0,05	130-200
		Cu + Agua	0,20	130-300
		Cu + Agua	0,20	250
		Cu + Agua	0,20	200-500
Método de dos pasos	Wang et al (1999)	Al ₂ O ₃ + Agua	5,50	28
		CuO + Agua	9,70	23
		Al ₂ O ₃ + EG	8,00	28
		CuO + EG	14,80	23
		Al ₂ O ₃ + Aceite	7,40	28
		Al ₂ O ₃ + Aceite hidr.	7,10	28
	Xuan & Li (2000)	Cu + Agua	7,50	100
		Cu + Aceite	7,50	100
	Patel et al. (2003)	Ag + Tolueno	0,001	60-80
		Au + Tolueno	0,00026	8-20
	Murshed et al. (2005)	TiO ₂ + Agua + Disp.	5,00	15
		TiO ₂ + Agua + Disp.	5,00	10 - 40
Lee et al. (2006)	CuO + Agua	0,30	25	
	CuO + Agua	0,30	25	

2.3.3. Otros métodos

Las técnicas anteriormente descritas son las de mayor utilización, pero no las únicas. Existen otras técnicas disponibles para combinaciones específicas de nanopartículas y fluidos base. Por ejemplo, nanopartículas con determinadas geometría, carga, porosidad, pueden ser fabricadas por electrólisis, deposición metálica, estructuración capa por capa, secado de micro gotas y otras técnicas químicas para coloides.

Entre otros procesos, la técnica de Condensación Química de Vapor (CVD por sus siglas en inglés) parece superar los inconvenientes en el control del tamaño de nanopartícula, facilidad de escala y la posibilidad de producir nuevas estructuras tipo nanopartícula-capas. Este es un proceso químico usado para producir materiales sólidos de alta pureza y rendimiento. Aunque sea más usado en la obtención de películas ultra finas en superconductores. En este proceso, un sustrato es expuesto a un precursor gaseoso rico en carbono, por ejemplo un hidrocarburo, para producir nanotubos de carbono.

Inicialmente, este proceso fue desarrollado por Cheng et al. (1998) para la obtención de nanotubos de carbono de pared simple y posteriormente fue utilizada en muchas otras investigaciones experimentales, como la de Choi et al. (2001) con nanotubos de carbono de pared múltiple dispersos en aceite. Por otro lado, Liu et al. (2006) sintetizaron, por primera vez, nanofluidos de cobre en agua a través de un proceso de reducción química.

Con el objetivo de tener mayor control sobre los aspectos físicos más relevantes de los nanofluidos (forma y tamaño de las nanopartículas, estabilidad, homogeneidad, etc.), nuevos métodos de síntesis están siendo desarrollados, como por ejemplo el empleado por Zhu et al. (2004) para obtener nanopartículas de cobre en etileno glicol mediante reducción de un tipo de sal ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ y $\text{NaH}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) por exposición a microondas.

2.4. Caracterización de los nanofluidos

Como fue mostrado anteriormente, la mayoría de las investigaciones experimentales tuvo como objetivo la determinación de la conductividad térmica de

los nanofluidos. Una revisión del material bibliográfico actual muestra que el incremento de la conductividad térmica de los nanofluidos presenta anomalías. Esa nueva conductividad no puede ser estimada mediante un promedio de la conductividad térmica de los componentes de la mezcla. Para salvar tal inconveniente, múltiples investigaciones han desarrollado diferentes técnicas para medir la conductividad térmica de los nanofluidos y todo indica que cada una aportó solamente al aumento de la controversia. Una de las pocas conclusiones de todas estas pesquisas es que el fenómeno de intensificación de la conductividad térmica dependería de un gran número de parámetros, tales como:

- Concentración volumétrica de nanopartículas
- Material de las nanopartículas
- Tamaño de las nanopartículas
- Forma de las nanopartículas
- Fluido base
- Temperatura del nanofluido
- Aditivos
- Acidez
- Otros

Entretanto, la cuantificación del efecto de cada uno de estos parámetros sobre la intensificación de las propiedades térmicas de los nanofluidos es aún un tema de debate. Con estos precedentes, es necesario llevar a cabo cuidadosamente los experimentos para medir la conductividad térmica con un buen planeamiento experimental que tome en cuenta la diversidad de los parámetros envueltos en el fenómeno. Esto contribuiría a la validación de muchos modelos

teóricos propuestos para la predicción de la conductividad térmica efectiva de los nanofluidos.

La medición de la conductividad térmica de líquidos es un factor importante en el desarrollo de la tecnología para la caracterización de los nanofluidos. El principio básico para la medición de la conductividad térmica es la Ley de Fourier para conducción de calor. En la configuración experimental más simple, es necesario establecer un flujo de calor unidimensional de valor conocido y, de esa forma, midiendo la temperatura en dos lugares diferentes a lo largo de la dirección de la transferencia de calor, estimar la conductividad térmica según la ecuación:

$$k = \frac{q''/A}{\Delta T/L} \quad (2.1)$$

Donde q'' es el flujo de calor, ΔT es la diferencia de temperatura en los extremos a una distancia L y A representa el área de la sección transversal.

En este esquema de medición, la mayor dificultad reside en establecer un campo de temperaturas unidimensional. Aún en el caso de sólidos isotrópicos ya es complicado tener este tipo de configuración. Para el caso de los líquidos, es preciso evitar un gradiente de temperatura en la dirección de la gravedad. De otro lado, las corrientes convectivas son un inconveniente más a superar, pues producen una medida inexacta de la conductividad térmica. En el caso de los nanofluidos, la presencia de las nanopartículas suspendidas, la homogeneidad y la estabilidad de las mismas en el fluido base representan el mayor obstáculo al momento de la medición. Por esto, la conductividad térmica de los nanofluidos (y de los fluidos en general) puede ser medida con precisión si el tiempo de medición fuese lo suficientemente pequeño como para impedir el desarrollo de la convección. Así, en vez de calentar el fluido desde la base, este es convenientemente calentado

desde la parte superior. Todas las consideraciones anteriores fueron tomadas en cuenta para la implementación de los diversos dispositivos de medición de la conductividad térmica. Entre las técnicas de medición más comunes, es posible encontrar las siguientes:

- Método del Hilo Caliente (Transiente hot-wire technique)
- Método de Analizador de constantes térmicas
- Método de la celda cilíndrica
- Método de oscilación de temperatura
- Método 3-Omega

En el sentido de la obtención de una caracterización completa del nanofluido, son importantes los aportes hechos para establecer condiciones y procedimientos patrón con un mínimo de variación entre las mediciones experimentales observadas en la literatura.

Ejemplo de esto es el trabajo de Fonseca (2007), que realiza la medición de la conductividad térmica, viscosidad y masa específica de nanofluidos por diferentes métodos y posteriormente compara sus resultados con las propiedades calculadas mediante modelos teóricos.

En una escala más global, es importante destacar esfuerzos como el INPBE (Ejercicio Internacional para la Evaluación Comparativa de las Propiedades de los Nanofluidos), que muestra las diferencias entre las mediciones de la conductividad térmica y la viscosidad, realizadas en laboratorios de casi 30 instituciones en el mundo entero, a partir de muestras proporcionadas por un proveedor común a fin de disminuir las divergencias derivadas de la síntesis de nanofluidos. Los

resultados de este ejercicio se hallan en el trabajo de Buongiorno et al. (2009) para la conductividad térmica, y en el trabajo de Venerus et al. (2010) para la viscosidad.

2.5. Estimativa de las propiedades intensificadas de los nanofluidos

A lo largo de la revisión bibliográfica fue observado un gran número de investigaciones computacionales y experimentales enfocadas tanto en la determinación experimental de la conductividad térmica como en su determinación por modelos predictivos. Este interés inicial fue motivado por las elevadas intensificaciones obtenidas en esta propiedad, muy superiores a las de las demás propiedades. Posteriormente, y con la sofisticación del estudio del fenómeno en aplicaciones térmicas, se tuvo un incremento de las investigaciones relacionadas a la convección de nanofluidos bajo diferentes condiciones. La diversidad de las pesquisas realizadas puede ser observada en la Fig. 2.3, que muestra la cantidad de artículos relativos a cada objeto de estudio, sea el enfoque computacional o experimental.

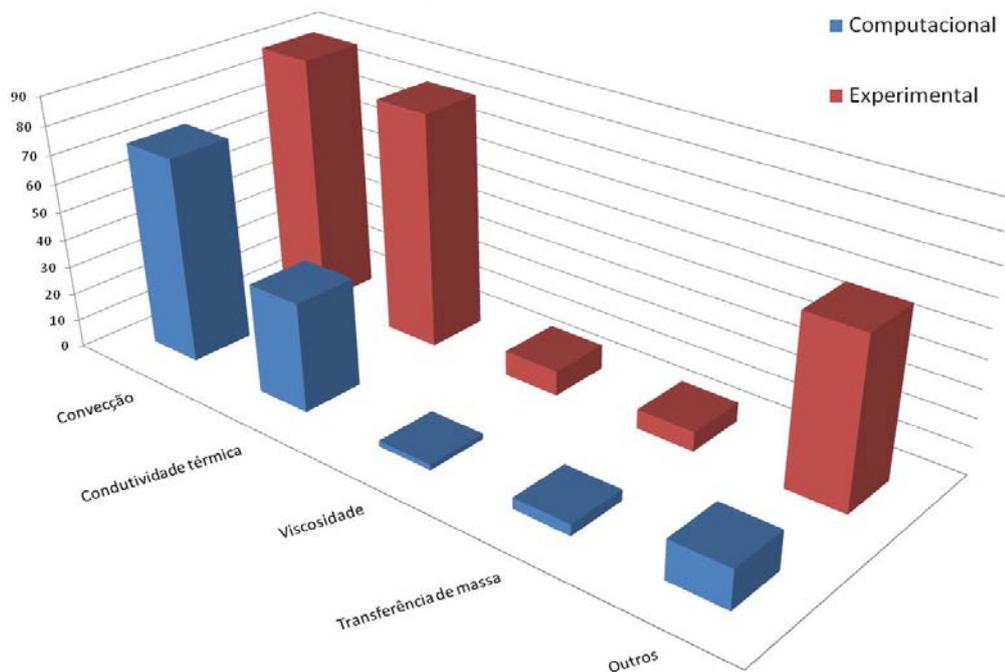


Figura 2.3. Clasificación del banco de artículos.

2.5.1. Mecanismos de transporte de calor en nanofluidos

El conocimiento actual sobre la conductividad térmica efectiva de compuestos multifásicos es derivado de la hipótesis del continuo, que típicamente sólo incorpora la concentración volumétrica y la forma de las nanopartículas como variables y asume el transporte de calor difusivo en ambas fases, líquida y sólida. No son considerados los efectos interfaciales ni el desplazamiento relativo de las nanopartículas. Este enfoque, que consigue resultados aceptables en sistemas milimétricos y micrométricos, falla al momento de intentar describir el fenómeno que ocurre en escala nanométrica.

La base de la teoría macroscópica de la transferencia de calor en compuestos es la ecuación de conducción de calor de Fourier:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T \quad (2.2)$$

Donde α es la difusividad térmica y T representa el campo de temperaturas.

Con el fin de determinar cuáles son los factores y de qué forma estos influyen en el fenómeno del aumento de la transferencia de calor, y en especial de la conductividad térmica, el trabajo de Keblinski et al. (2002) presenta un gran aporte, pues destaca la propuesta de distintos autores sobre la existencia de nuevos mecanismos involucrados en el transporte de la energía térmica en nanofluidos. Estos mecanismos son:

i) Movimiento Browniano

El cual es responsable del desplazamiento de las nanopartículas en suspensión a través del fluido base, con el cual aumenta la probabilidad de colisión entre ellas. Esto posibilitaría el transporte de calor directamente entre las nanopartículas. De la Ec. (2.2) es posible observar que no son tomados en consideración los aspectos dinámicos del movimiento browniano: es decir, es supuesto un fluido estático.

Podemos asociar el movimiento browniano con una constante de difusión particular D_p , dada por la ecuación de Stokes-Einstein, Ec. (2.3):

$$D_p = \frac{k_B T}{3\pi\mu_{fb}d_{np}} \quad (2.3)$$

Donde k_B es la constante de Boltzmann, μ_{fb} es la viscosidad del fluido base y d_{np} el diámetro de la nanopartícula.

Usando esta constante es posible estimar el efecto del movimiento browniano sobre la conductividad térmica. En este punto, son definidos dos

tiempos de respuesta: el primero relaciona el tiempo para desplazar una nanopartícula a una distancia igual a su diámetro:

$$\tau_D = \frac{d_{np}^2}{6D_p} \quad (2.4)$$

El segundo relaciona el tiempo requerido para transporta el calor a través del líquido en una distancia igual a la anterior:

$$\tau_H = \frac{d_{np}^2}{6\alpha} = \frac{d_{np}^2 (c_p \rho)_{fb}}{6k_{fb}} \quad (2.5)$$

En condiciones ambientales, siendo agua el fluido base ($\mu = 0,001$ kg/cm-s, $k_{fb} = 0,4$ W/m-K, $\rho = 1000$ kg/m³, $C_p = 4,2$ kJ/kg-K) y con nanopartículas de $d_{np} = 10$ nm, las Ecs. (2.4) y (2.5) dan como resultado $\tau_D = 2 \times 10^{-7}$ y $\tau_H = 4 \times 10^{-10}$ segundos, respectivamente. La razón en este caso es de 500, y disminuye a un valor de 25 cuando el tamaño de nanopartícula llega a valores atómicos (0,5 nm). Estos valores dan una medida de la desproporción entre la difusión térmica en el fluido base y la difusión provocada por el movimiento browniano, inclusive en nanopartículas extremadamente pequeñas.

Sin embargo, aunque la contribución del movimiento browniano en el desplazamiento de las nanopartículas (y como consecuencia, a la difusión de calor por contacto) pareciese ser reducida, todavía está en estudio la probable contribución al fenómeno de aglomeración de nanopartículas. Cabe destacar que otra de las posibles contribuciones del movimiento Browniano sea la obtención de una mejor mezcla en el fluido, especialmente en las regiones frías y calientes, reduciendo el gradiente local de temperatura en todo el fluido (Koo y Kleinstreuer,

2005). La profundización de las investigaciones en esta materia requiere cálculos basados en un previo conocimiento de *dinámica molecular*.

ii) La naturaleza del transporte de calor

La teoría macroscópica de transferencia de calor asume que esta es realizada por difusión. Sin embargo, en sólidos cristalinos, el calor es transportado mediante fonones. Esto es, por la propagación de las vibraciones reticulares (estructuras moleculares) que son generadas y propagadas aleatoriamente. Cuando el tamaño de las nanopartículas en un nanofluido es menor que el camino libre medio de los fonones, la energía pasa a transportarse balísticamente. Para nanopartículas de alúmina a temperatura ambiente, por ejemplo, el camino libre medio es aproximadamente 35 nm. En este punto, enfoques macroscópicos como el empleado por Maxwell o Hamilton & Crosser no pueden ser aplicados y se hace necesario un tratamiento teórico basado en el transporte balístico de fonones (mayor información en el trabajo de Joshi y Majumdar, 1993).

Por ese motivo, aún es difícil vislumbrar la forma en que el transporte balístico de fonones es más efectivo que el transporte difusivo, y de esa manera explicar las intensificaciones en la conductividad térmica de los nanofluidos. En particular, para ambos transportes difusivo y balístico, la temperatura de las nanopartículas representa una gran influencia, operando como condición de contorno para el flujo de calor en un líquido de baja conductividad.

iii) La formación de una capa interfacial

Han sido encontradas múltiples investigaciones sobre el efecto de la resistencia térmica interfacial, producto del leve contacto entre las fases sólida y líquida del nanofluido (por ejemplo Ni; Gu; Chen, 1997). Esta resistencia,

denominada *resistencia de Kapitza*, aparece como un obstáculo para el flujo de calor en la interface, que tiene sustento en la teoría de conducción de energía mediante fonones. A pesar de eso, el uso de esta resistencia como parámetro para la intensificación de la conductividad térmica lleva a resultados sobrestimados y con tendencias a disminuir con la reducción del tamaño de las nanopartículas, lo que es claramente contrario a la mayoría de los resultados de investigaciones experimentales (Kebinski et al., 2002).

En contraste, se presenta otro fenómeno producido en la interface sólido-líquido: la formación de una capa de fluido alrededor de la nanopartícula, denominada *nanocapa*. Es evidente que la estructura atómica de las nanopartículas es mucho más ordenada que la estructura molecular del fluido base. Justamente en la interface de ambas fases se desarrolla un arreglo de las moléculas del fluido base. El efecto de esta nueva *nanocapa* puede ser dividido en dos aspectos:

- Por un lado, el estado cuasi-sólido de la *nanocapa* (con las moléculas del fluido base detenidas en la superficie de la nanopartícula) lleva a pensar que la conductividad térmica de aquella estará en un rango determinado por las conductividades del fluido base y de la nanopartícula.
- Por otro lado, la formación de la *nanocapa* contribuye en el aumento aparente de la concentración volumétrica de las nanopartículas. De ese modo, sin tomar en cuenta el caso más optimista (que es cuando la *nanocapa* presenta la misma conductividad de la nanopartícula) se tendrá una intensificación sólo por el hecho de haberse formado la *nanocapa*.

Así, por ejemplo, para duplicar el volumen efectivo V_{ef} de una nanopartícula con diámetro $d_{np} = 10\text{nm}$, se requiere un espesor de *nanocapa* igual a $t_{nc} = 2,5\text{nm}$. Cálculos basados en estas consideraciones son mostrados en la Fig. 2.4.

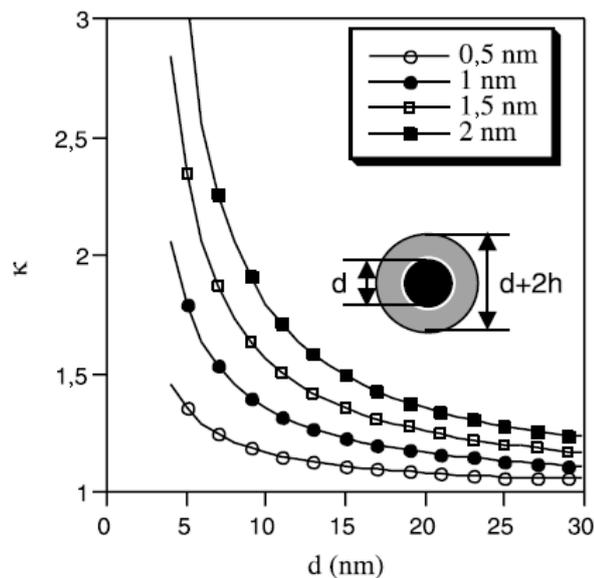


Figura 2.4. Efecto sobre la conductividad relativa $k = k_{nf}/k_{fb}$ en relación con el espesor de *nanocapa* y el diámetro de la nanopartícula. Fuente: Koblinski et al. (2002).

Xue (2003) analizó resultados experimentales para nanofluidos basados en alúmina (Al_2O_3) para obtener valores específicos de espesor y conductividad de la *nanocapa*. Un análisis similar fue desarrollado por Yu y Choi (2003) con resultados similares.

Sin embargo, otros experimentos (Yu et al., 2003) y simulaciones (Henderson. van Swol, 1984) apuntan a que el espesor de la *nanocapa* no supera el valor de unos pocos diámetros atómicos (aproximadamente 1nm). A pesar de tener, aparentemente, una gran influencia en la intensificación de la conductividad, esta no sería el único factor relevante para alcanzar los valores obtenidos experimentalmente.

iv) El efecto de la aglomeración de las nanopartículas

La aglomeración de las nanopartículas, al contrario de la coalescencia, puede representar una ventaja para la transferencia de calor por conducción. Si las nanopartículas pudieran aglomerarse en estructuras identificadas como *redes de percolación* de calor, serían creados caminos de baja resistencia térmica, lo que contribuiría para el aumento de la conductividad térmica efectiva.

Es natural pensar que la aglomeración de nanopartículas será mayor cuanto mayor sea el número de estas. Esto es, el efecto de la formación de aglomeraciones (*cluster* en inglés) será intensificado en altas concentraciones de nanopartículas. Como consecuencia también se tendrá una menor distancia entre los llamados *clusters*, con la tendencia a formar las *redes de percolación* de calor. Como efecto negativo, también es esperado que la formación de estos *clusters* aumente la probabilidad de sedimentación de las nanopartículas.

Según Eastman et al. (2004), es posible encontrar este tipo de estructuras en sistemas dispersos de más de 15% de concentración volumétrica. Por otro lado, la intensificación de la conductividad térmica de los nanofluidos ocurre aun a concentraciones muy bajas (por debajo de 1%). Desde esa perspectiva, parecería que la formación de una estructura del tipo *red de percolación* no ocurre en nanofluidos. Sin embargo, la aglomeración local es posible. El volumen efectivo de un *cluster* puede ser mucho mayor que el volumen total de sus nanopartículas.

En la Fig. 2.5 puede ser visualizado el efecto de la intensificación de la conductividad térmica ocasionada por el incremento efectivo del volumen de la fase más conductiva en función de un parámetro Φ (razón de empaquetamiento: entre el volumen de las nanopartículas dentro del *cluster* y su volumen total efectivo). Con una disminución de la razón de empaquetamiento, el volumen efectivo de los *clusters* se incrementa, y también la conductividad térmica.

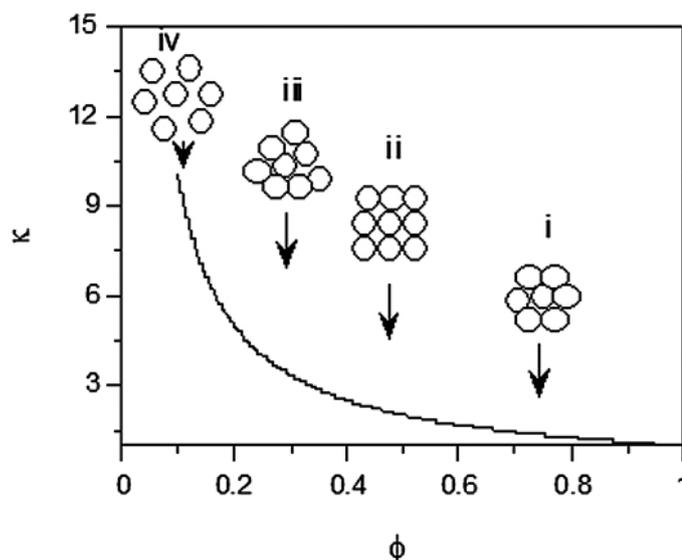


Figura 2.5. Incremento de la conductividad térmica con la razón de empaquetamiento Φ . Los diagramas esquemáticos indican arreglos: i) cúbico de caras centradas (FCC), ii) cúbico simple, iii) estructura irregular espaciada, con contacto de nanopartículas, y iv) espaciado por las capas de fluido. Fuente: Koblinski et al. (2002).

De esa manera, para un *cluster* de nanopartículas esféricas extremadamente próximas, aproximadamente 25% de su volumen es del fluido base entre ellas, lo que eleva el volumen efectivo de la fase más conductiva en casi 30% en relación al sistema disperso más simple (Eastman et al., 2004).

Se observa que no es necesario el contacto directo entre nanopartículas para intensificar el fenómeno de transferencia de calor, apenas una proximidad que permita el aumento de la velocidad del flujo de calor entre aquellas. Esos *clusters* con baja razón de empaquetamiento, y consecuentemente un mayor volumen, son capaces de explicar los incrementos de la conductividad térmica. Inclusive, parecería que la transferencia de calor del tipo balístico persistiese en los *clusters* formados, debido a que el camino libre medio para los fonones es menor en la fase líquida que en la nanopartícula (Eastman et al., 2004).

En relación al modelamiento teórico, Wang et al. (2003) realizaron un análisis más detallado de los efectos de la aglomeración en términos de sus propiedades fractales y concluyeron que tales efectos pueden explicar la

intensificación de las propiedades térmicas en nanofluidos que contiene nanopartículas de óxidos metálicos. A pesar de ello, no consiguen explicar los mayores incrementos observados para nanopartículas metálicas.

No obstante haber desarrollado numerosas investigaciones teóricas y experimentales con la tentativa de validar cada uno de los mecanismos descritos anteriormente, aún existe mucha controversia sobre cuáles de estos factores son los gobernantes en el fenómeno. En la mayoría de los modelos considerados en este trabajo, que serán abordados más adelante, las correlaciones desarrolladas dependen de parámetros que toman en cuenta por lo menos uno de los cuatro mecanismos mencionados, además de otros determinados experimentalmente.

2.5.2. Correlaciones teóricas para determinar la conductividad térmica de nanofluidos

La búsqueda de tecnologías que permitan la aplicación de nanofluidos en procesos industriales ha aumentado en las últimas décadas. Discusiones sobre los mecanismos de transferencia de calor en nanofluidos sirvieron para aumentar el interés de los científicos para desarrollar correlaciones y modelos predictivos para este fenómeno. De ese modo, como ya fue dicho anteriormente, aún es motivo de debate cuáles mecanismos gobiernan el incremento de la conductividad térmica.

La previsión teórica y algunos resultados experimentales muestran que los primeros factores que influyen en el aumento de la conductividad térmica son: el tamaño y la forma de la nanopartícula, la relación longitud-diámetro (llamada *razón de aspecto*), el tiempo de homogenización y la concentración volumétrica de la fase dispersa.

El estudio pionero desarrollado por Maxwell (1873) consideraba el fenómeno de la conducción, bajo el enfoque del transporte de calor macroscópico, para una

suspensión diluida de partículas esféricas y despreciando cualquier interacción entre ellas. La ecuación de Maxwell, obtenida como solución de la ecuación de Laplace para un campo de temperaturas alrededor de la partícula dispersa, es la siguiente:

$$k_{nf} = k_{fb} + 3\phi_{np} \frac{k_{np} - k_{fb}}{2k_{fb} + k_{np} - \phi_{np}(k_{np} - k_{fb})} k_{fb} \quad (2.6)$$

Donde k representa la conductividad térmica; ϕ , concentración volumétrica; y los índices nf , np y fb , representan nanofluido, nanopartícula y fluido base, respectivamente.

El enfoque de la transferencia de calor macroscópica empleado parece ser efectivo para sistemas particulados de escala milimétrica y micrométrica. Sin embargo, en mezclas que usan nanopartículas, tales correlaciones no consiguen calcular los valores de intensificación hallados experimentalmente.

Se observa que la Ec. (2.6) tiene como únicas variables las conductividades de ambas fases del nanofluido y la concentración de las nanopartículas. Inclusive, para valores muy elevados de conductividad térmica de las nanopartículas (esto es: $k_{np} \gg k_{fb}$), la intensificación de la conductividad del nanofluido es apenas función de la concentración volumétrica. Físicamente, este comportamiento es explicado por el hecho que la temperatura a través de la nanopartícula permanece constante, dando como resultado la misma condición de contorno para la ecuación de flujo de calor en el líquido envolvente.

De este pequeño análisis se infiere que la conductividad térmica de los nanofluidos calculada por la ecuación de Maxwell es independiente de la

composición de las nanopartículas, lo cual no es reflejado en gran parte de las investigaciones experimentales desarrolladas.

La Fig. 2.6 muestra la divergencia entre algunos de los resultados experimentales y valores de conductividad calculados con uso del modelo de Maxwell.

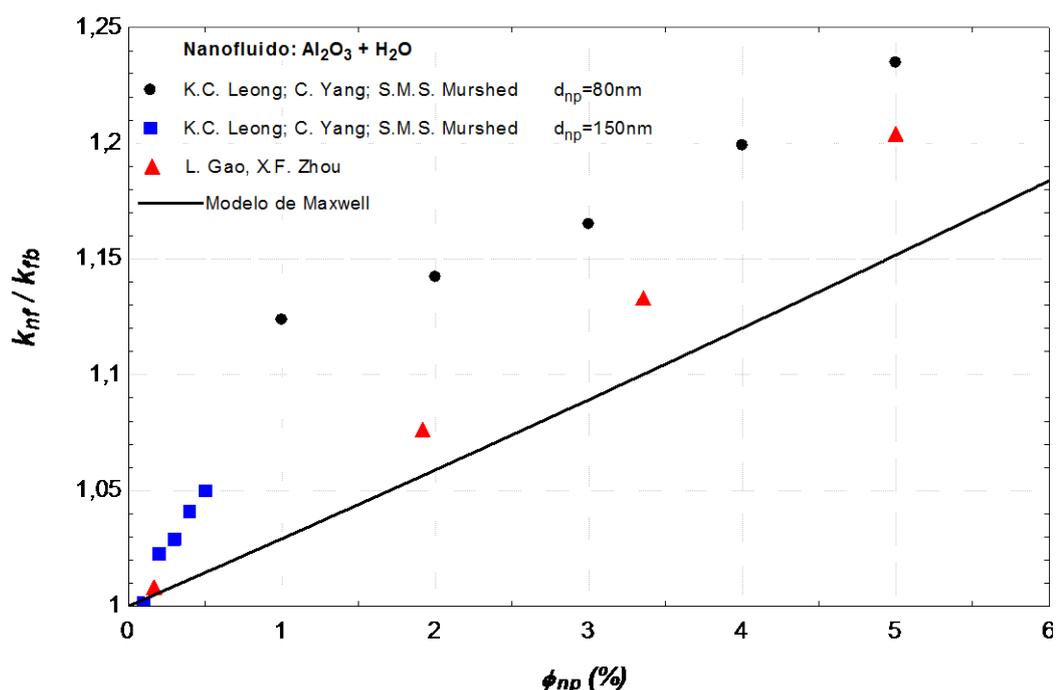


Figura 2.6. Comparación de los valores calculados con el modelo de Maxwell y datos experimentales.

Es conveniente destacar que los datos experimentales mostrados en la Fig. 2.6 son muy conservadores, pues se ha comprobado experimentalmente intensificaciones de la conductividad térmica de hasta 160% con nanofluidos compuestos por nanotubos de carbono suspendidos en aceite (Choi et al., 2001).

La mayoría de los modelos desarrollados posteriormente fue basada en este modelo inicial, apenas con algunas consideraciones más, tales como la forma de la partícula (Fricke, 1924; Hamilton & Crosser, 1962; Granqvist & Hunderi, 1978; Xue, 2000), distribución particular (Wiener, 1912), estructura partícula-capas (Kerner, 1956; Lamb et al. 1978), resistencia de contacto (Benvensite, 1987), entre otros.

Estos modelos pueden ser agrupados como modelos clásicos, cuyas principales referencias son: la Teoría del Medio efectivo, las consideraciones de conductividad anisotrópica en nanopartículas esféricas o no esféricas, distribución de las nanopartículas en el fluido base, entre otras.

Dentro de los modelos clásicos, el modelo de Hamilton-Crosser (1962) ha mostrado una mayor contribución, pues considera un parámetro que evalúa la forma de la nanopartícula. Este modelo es actualmente usado para comparar algunos de los resultados experimentales. Su ecuación viene dada por:

$$k_{nf} = k_{fb} + 3 \psi^{-1} \phi_{np} \frac{k_{np} - k_{fb}}{(3\psi^{-1} - 1)k_{fb} + k_{np} - \phi_{np}(k_{np} - k_{fb})} k_{fb} \quad (2.7)$$

Donde ψ representa el parámetro de esfericidad de la nanopartícula. Para nanopartículas esféricas $\psi = 1$.

En este modelo, el tamaño de la nanopartícula es obviado. Sólo el parámetro de forma y la concentración volumétrica se presentan como factores relevantes. El factor de forma de la Ec. (2.7) de Hamilton-Crosser relaciona el área superficial de la nanopartícula con la misma área para una partícula esférica con igual volumen. La independencia de la conductividad calculada en relación con el tamaño de las nanopartículas es inconsistente con los resultados de investigaciones experimentales. Resumidamente, algunos de los modelos clásicos de mayor destaque son mostrados en la Tab. 2.2.

Tabla 2.2. Modelos Clásicos para el cálculo de la conductividad térmica efectiva de suspensiones sólido/líquido.

Autor (año)	Expresión
Maxwell (1873)	$\frac{k_{ef}}{k_1} = 1 + 3\phi \frac{k_2 - k_1}{2k_1 + k_2 - \phi(k_2 - k_1)}$
Rayleigh (1892)	$\frac{k_{ef}}{k_1} = 1 + 3\phi \frac{k_2 - k_1}{2k_1 + k_2 - \left(1 + 3,939\phi^{\frac{7}{3}} \frac{k_2 - k_1}{4k_1 + 3k_2}\right)(k_2 - k_1)}$
Wiener (1912)	$\frac{k_{ef}}{k_1} = 1 + (m + 1)\phi \frac{k_2 - k_1}{mk_1 + k_2 - \phi(k_2 - k_1)}$
Bruggeman (1935)	$1 - \phi_2 = \frac{k_2 - k_{ef}}{k_2 - k_1} \left(\frac{k_1}{k_2}\right)^{1/3}$
Hamilton & Crosser(1962)	$k_{ef} = k_1 + 3\psi^{-1}\phi \frac{k_2 - k_1}{(3\psi^{-1} - 1)k_1 + k_2 - \phi(k_2 - k_1)} k_1$

Con el objetivo de evaluar la diferencia entre cada modelo clásico referenciado, fueron calculados los valores de conductividad térmica para cada uno de ellos en un rango representativo de valores de concentración volumétrica. El nanofluido considerado fue de nanopartículas de alúmina dispersas en agua ($k_{np} = 42 \text{ W/m-K}$ y $k_{fb} = 0,6 \text{ W/m-K}$). Los resultados son presentados en la Fig. 2.7. Es importante destacar que los resultados obtenidos para los modelos de Maxwell y Rayleigh son prácticamente iguales en el rango establecido (de 0% a 6% de concentración volumétrica). En la figura en destaque, se observa que los resultados de los modelos son muy próximos entre sí a bajas concentraciones volumétricas.

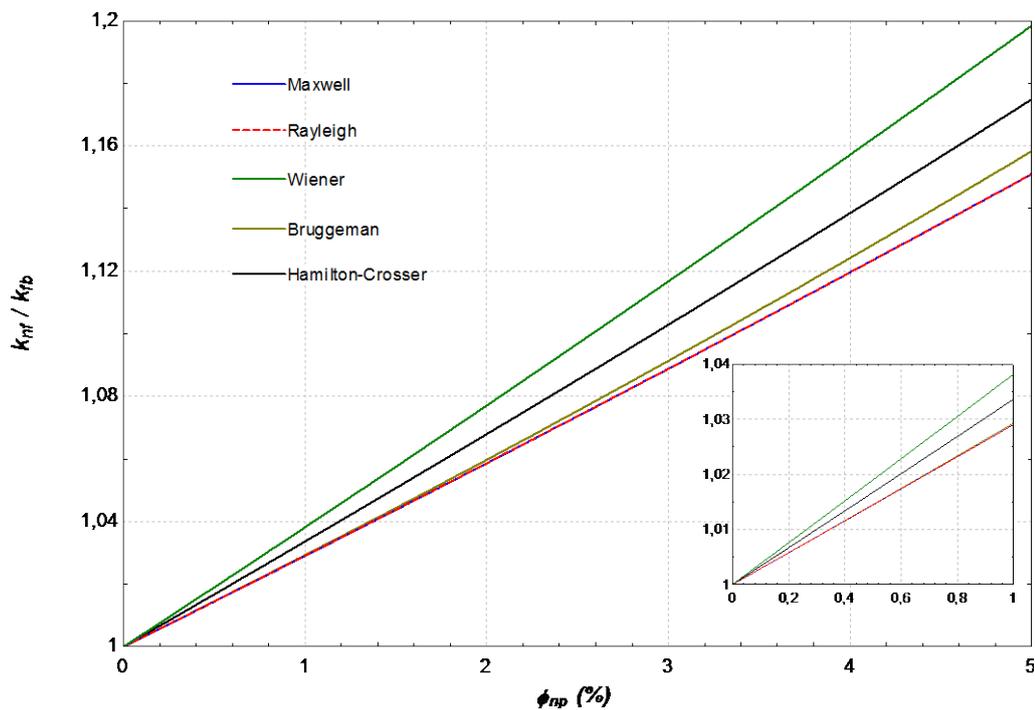


Figura 2.7. Valores de intensificación de la conductividad térmica usando los modelos clásicos de las referencias.

También fueron desarrollados modelos teóricos que consideraban la presencia de la denominada *nanocapa* como factor influyente, no sólo como parte de una partícula compleja, sino también con propiedades diferenciadas de los otros componentes del nanofluido.

En ese sentido, y para considerar la existencia de la *nanocapa* (esquemáticamente representada en la Fig. 2.8), Yu y Choi (2003) asumieron nanopartículas esféricas de radio definido r , envuelta por una *nanocapa* de espesor t_{nc} .

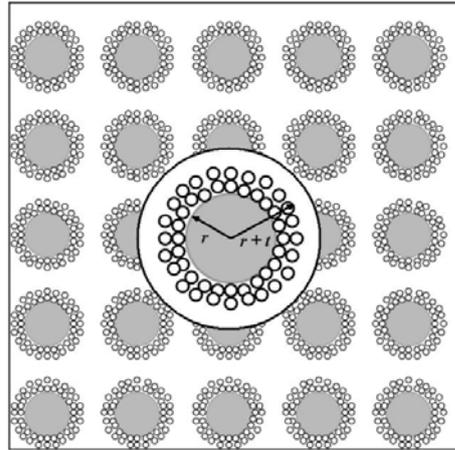


Figura 2.8. Representación esquemática de la nanocapa interfacial en un arreglo de nanopartículas. Fuente: Yu y Choi (2003).

Esta *nanocapa* posee conductividad térmica diferente k_{nc} , mayor que la conductividad del fluido base (k_{fb}) y menor que la de la nanopartícula (k_{np}). De la unión de la *nanocapa* y la nanopartícula es formada una *nanopartícula equivalente*, con conductividad térmica equivalente k_{eq} . Esta conductividad equivalente viene dada por la Ec. (2.8):

$$k_{eq} = \frac{[2(1-\varepsilon)+(1+\beta)^3(1+2\varepsilon)]\varepsilon}{-(1-\varepsilon)+(1+\beta)^3(1+2\varepsilon)} k_{np} \quad (2.8)$$

Donde $\beta = t/r_{np}$, es la razón entre el espesor de la nanocapa y el radio de la nanopartícula; y $\varepsilon = k_{nc}/k_{np}$, es la razón entre las conductividades de la nanocapa y la nanopartícula. El límite superior estará definido para la condición $\varepsilon = 1$, esto es, cuando la conductividad de la nanocapa fuere igual a la conductividad de la nanopartícula.

Finalmente, la conductividad efectiva del nanofluido será dada por la Ec. (2.9):

$$k_{nf} = \frac{k_{eq} + 2k_{fb} + 2\phi_{np}(k_{np} - k_{fb})(1 + \beta)^3}{k_{eq} + 2k_{fb} - \phi_{np}(k_{np} - k_{fb})(1 + \beta)^3} k_{fb} \quad (2.9)$$

La dificultad de la utilización de este modelo radica en que el valor de la conductividad debe ser conocido con anterioridad.

Para ese fin, algunos autores como Xie et al. (2005) presenta una propuesta de cálculo de la conductividad térmica de la *nanocapa* y la conductividad térmica efectiva de la estructura *nanocapa-nanopartícula*. Según los autores, la conductividad térmica de la *nanocapa* es dada por la Ec. (2.10):

$$k_{nc} = \frac{M^2}{(M - \beta) \ln(1 + M) + \beta M} \quad (2.10)$$

Donde: $M = \varepsilon_p(1 + \beta)$, con $\varepsilon_p = k_{np}/k_{fb}$ y $\beta = t/r_{np}$.

Este modelo incluye parámetros como: $\phi_{pc} = \phi_{np}(1 + \beta)^3$; $\varepsilon_{fl} = \frac{k_{fb} - k_{nc}}{k_{fb} + 2k_{nc}}$;

$\varepsilon_{pl} = \frac{k_{np} - k_{nc}}{k_{np} + 2k_{nc}}$; $\varepsilon_{lf} = \frac{k_{nc} - k_{fb}}{k_{nc} + 2k_{fb}}$. Estos parámetros son combinados en: $\theta =$

$$\varepsilon_{lf} \left[\frac{(1 + \beta)^3 - \frac{\varepsilon_{pl}}{\varepsilon_{fl}}}{(1 + \beta)^3 + 2\varepsilon_{lf}\varepsilon_{pl}} \right].$$

La forma del modelo de Xie, relacionando todos los parámetros descritos anteriormente, está dada en la Ec. (2.11):

$$k_{nf} = 1 + 3\theta\phi_{pc} + 3\theta^2 \left[\frac{\phi_{pc}^2}{1 - \theta\phi_{pc}} \right] \quad (2.11)$$

El trabajo de Xue y Xu (2005) también desarrolla una correlación, mostrada en la Ec. (2.12), relacionando la geometría de la nueva estructura *nanocapa-nanopartícula* y las propiedades de cada componente.

$$\left[1 - \frac{\phi_{np}}{\tau}\right] \left[\frac{k_{nf}-k_{fb}}{2k_{nf}+k_{fb}}\right] + \frac{\phi_{np}}{\tau} \left[\frac{(k_{nf}-k_{nc})(2k_{nc}-k_{np})-\tau(k_{np}-k_{nc})(2k_{nc}-k_{nf})}{(2k_{nf}+k_{nc})(2k_{nc}+k_{np})+2\tau(k_{np}-k_{nc})(2k_{nc}-k_{nf})}\right] = 0 \quad (2.12)$$

$$\text{Donde } \tau = \left(\frac{r_{np}}{r_{np}+t}\right)^3$$

Leong et al. (2006) propusieron otro modelo teórico para la determinación de la conductividad, mostrado en la Ec. (2.13):

$$k_{nf} = \frac{\phi_{np}k_{nc}(k_{np}-k_{nc})(2\gamma_1^3-\gamma^3+1)+\gamma_1^3(k_{np}+2k_{nc})[\phi_{np}\gamma^3(k_{nc}-k_{fb})+k_{fb}]}{\gamma_1^3(k_{np}+2k_{nc})-\phi_{np}(k_{np}-k_{nc})(\gamma_1^3+\gamma^3-1)} \quad (2.13)$$

Donde $\gamma = 1 + \beta$; $\gamma_1 = 1 + \frac{\beta}{2}$; en este caso, el valor de la conductividad de la nanocapa es establecido por $k_{nc} = 3k_{fb}$.

Es importante destacar que los modelos presentados hasta este punto toman en cuenta consideraciones sobre los componentes del nanofluido, la presencia de la nanocapa y las propiedades de todos ellos. Esto es, siempre manteniendo el enfoque en los aspectos morfológicos y composición de los nanofluidos.

Diversos autores consideraron el efecto de las aglomeraciones (o formación de *clusters*) para el cálculo de la intensificación de la conductividad térmica. Así, Wang et al. (2003) definieron una función de distribución del radio de *clusters*, $n(r)$, estimado a partir de una distribución normal, de la forma mostrada en la Ec. (2.14).

$$n(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}(Ln\sigma)r} e^{-\left[\frac{Ln\left(\frac{r}{r_{np}}\right)}{\sqrt{2\pi}(Ln\sigma)}\right]^2} \quad (2.14)$$

Con desviación estándar $\sigma = 1,5$.

Finalmente, el modelo de Wang es dado por la Ec. (2.15):

$$k_{nf} = \frac{(1-\phi_{np}) + 3\phi_{np} \int_0^{\infty} \frac{k_{cl}(r)}{k_{cl}(r) + 2k_{fb}} n(r) dr}{\int_0^{\infty} \frac{k_{fb}(r)}{k_{cl}(r) + 2k_{fb}} dr} k_{fb} \quad (2.15)$$

En un trabajo posterior, Prasher et al. (2006a) presentan la correlación mostrada en la Ec. (2.16), que considera la aglomeración de las nanopartículas como principal mecanismo para el incremento de la conductividad térmica.

$$k_{nf} = k_{fb} + 3 \left(\frac{r_{cl}}{r_{np}} \right)^{3d_f} \phi_{np} \frac{k_{cl} - k_{fb}}{2k_{fb} + k_{cl} - \left(\frac{r_{cl}}{r_{np}} \right)^{3d_f} \phi_{np} k_{cl} - k_{fb}} k_{fb} \quad (2.16)$$

Donde la conductividad del *cluster* k_{cl} es determinada por la relación mostrada en la Ec. (2.17):

$$\left[1 - \left(\frac{r_{cl}}{r_{np}} \right)^{3d_f} \right] \frac{k_{fb} - k_{cl}}{2k_{cl} - k_{fb}} + \left(\frac{r_{cl}}{r_{np}} \right)^{3d_f} \frac{k_{np} - k_{cl}}{2k_{cl} - k_{np}} = 0 \quad (2.17)$$

Donde d_f representa la dimensión fractal Del agregado, que se encuentra en el rango de $1,75 \leq d_f \leq 2,5$.

Otro de los mecanismos propuestos que podrían influenciar el aumento de la conductividad térmica, y sobre el cual se han desarrollado gran número de investigaciones, es el movimiento Browniano. En ese sentido, Xuan; Li; Hu (2003) propusieron que la intensificación de la conductividad debida al movimiento Browniano viene dada por la Ec. (2.18).

$$k_{nf,MB} = \frac{1}{2} \rho_p (C_p)_{np} \phi_{np} \sqrt{\frac{k_B T}{3\pi \mu_{fb} r_{cl}}} \quad (2.18)$$

Donde r_{cl} representa el radio de giro del *cluster*, que es determinado experimentalmente.

Por otro lado, Jang y Choi (2004) desarrollaron también un modelo que incluye el efecto de la convección provocada por una única nanopartícula. El modelo, mostrado en la Ec. (2.19) puede ser considerado una ampliación de la regla de las mezclas. Mayores detalles pueden ser encontrados en Zhou et al. (2010).

$$k_{nf} = (1 - \phi_{np})k_{fb} + \phi_{np}k_{np} + 3C \left(\frac{r_{fb}}{r_{np}} \right) \phi_{np} \left(\frac{k_B T}{3\pi\mu_{fb}v_{fb}l_{fb}} \right)^2 Pr k_{fb} \quad (2.19)$$

Donde l_{fb} representa el camino medio libre de las moléculas del fluido base; y C , un parámetro empírico.

Sin embargo, algunos autores (entre ellos, Prasher) criticaron este modelo por la inconsistencia de las unidades del término dinámico, sin desmerecer la consideración de factores estáticos y dinámicos sobre la conductividad térmica efectiva del nanofluido.

Por su parte, Koo y Kleinstreuer (2005) propusieron la Ec. (2.20) para modelar la conductividad térmica que es producto de la influencia del movimiento Browniano. La introducción de este término es considerada como complemento al modelo de Maxwell.

$$k_{nf,MB} = 5 \cdot 10^4 \beta \rho_{fb} (C_p)_{fb} \phi_{np} \sqrt{\frac{k_B T}{2\rho_{np}r_{np}}} [(-134,63 + 1722,3\phi_{np}) + (0,4705 - 6,04\phi_{np})T] \quad (2.20)$$

$$\text{Con } \beta = \begin{cases} 0,0137(100\phi_{np})^{-0,8229}; & \phi_{np} > 0,01 \\ 0,0011(100\phi_{np})^{-0,7272}; & \phi_{np} < 0,01 \end{cases}$$

La propuesta de Prasher et al. (2006b) sobre la contribución del movimiento Browniano es mostrada en la Ec. (2.21). Este modelo es una modificación del modelo de Maxwell y toma en cuenta el efecto de la resistencia de contacto k_{np}^R .

$$k_{nf} = \left[1 + C \phi_{np} \left(\frac{9k_B T}{\pi \rho_{np} \phi_{fb}^2 r_{np}} \right)^m Pr^{0,333} \right] \left[k_{fb} + 3 \phi_{np} \frac{k_{np}^R}{2k_{fb} + k_{np}^R - \phi_{np}(k_{np}^R - k_{fb})} \right] \quad (2.21)$$

Donde C y m son parámetros determinados empíricamente.

Como ya fue mencionado en la descripción de los nuevos mecanismos que Keblinski et al. (2002) consideraron relevantes para la intensificación de la conductividad térmica en nanofluidos, todo parece apuntar a que el movimiento Browniano no sería el único factor gobernante en el fenómeno, sino una combinación (en mayor o menor grado) de cada uno de los mecanismos presentados.

Esa perspectiva fue adoptada en el trabajo de Murshed; Leong; Yang (2008), que consideran que la conductividad térmica intensificada de los nanofluidos puede dividirse en dos componentes diferenciados, denominados conductividad térmica estática y conductividad térmica dinámica. La forma de la Ec. (2.22) es recurrente en muchas de las investigaciones que consideran la interacción entre nanopartículas y su movimiento:

$$k_{nf} = k_{nf,estática} + k_{nf,dinâmica} \quad (2.22)$$

El primer componente considera el nanofluido en estado estacionario y normalmente es representada por los modelos clásicos basados en la Teoría del

Medio Efectivo y otros factores más, como: la presencia de la nanocapa, distribución de las nanopartículas, etc.

El segundo componente toma en cuenta aspectos de desplazamiento de las nanopartículas, principalmente el movimiento Browniano. En este aspecto, se mantiene la controversia sobre la real magnitud de la contribución del movimiento Browniano a la intensificación de la conductividad térmica. Existen autores como Wang (2003); Xue (2003); y Keblinski et al. (2002) que intentan mostrar su poca influencia en el transporte de energía térmica. Por otro lado, investigadores como Li y Peterson (2007) o Kumar et al. (2004) afirman que el movimiento Browniano es muy importante para la intensificación de la conductividad térmica.

2.5.3. *Correlaciones teóricas para determinar la viscosidad de nanofluidos*

Otra de las propiedades importantes para la aplicación práctica de los nanofluidos es la viscosidad, que debido a la presencia de las nanopartículas sufre una alteración con relación a la viscosidad del fluido base. Un nanofluido más viscoso requerirá una mayor potencia de bombeo para fluir, bajo las mismas condiciones de operación que un fluido de trabajo convencional.

Einstein (1906) fue el primero en desarrollar una correlación sobre el aumento de la viscosidad de suspensiones, que es representada por la Ec. (2.23):

$$\mu_{nf} = \mu_{fb}(1 + 2,5\phi_{np}) \quad (2.23)$$

Donde μ representa la viscosidad y los índices se mantienen.

El modelo de Einstein sirvió como base para modelos posteriores como los de Bruijn (1942), Vand (1948), Brinkmann (1952), mostrados en la Tab. 2.3.

Tabla 2.3. Modelos teóricos para la determinación de la viscosidad efectiva.

Autor (año)	Modelo
Einstein (1906)	$\mu_{ef} = \mu_1(1 + 2,5\phi)$
Brujijin (1942)	$\mu_{ef} = \frac{\mu_1}{1 - 2,5\phi + 1,552\phi^2}$
Vand (1948)	$\mu_{ef} = \mu_1(1 + 2,5\phi + 7,349\phi^2)$
Brinkman (1952)	$\mu_{ef} = \frac{\mu_1}{(1 + \phi)^{2,5}}$
Batchelor (1977)	$\mu_{ef} = \mu_1(1 + 2,5\phi + 6,5\phi^2)$

Entre ellos, destaca el modelo de Batchelor (1977), Ec. (2.24):

$$\mu_{nf} = \mu_{fb}(1 + 2,5\phi_{np} + 6,5\phi_{np}^2) \quad (2.24)$$

Entre tanto, utilizando este modelo ocurre lo mismo que con la conductividad térmica: los resultados experimentales sobrepasan grandemente los valores estimados. Así fue evidenciado por Chevallier; Tillement; Ayela (2007), que midieron la viscosidad de nanofluidos de óxido de silicio (SiO_2) en etanol. Ellos midieron viscosidades de casi el doble del valor original para concentraciones relativamente bajas. Por otro lado, el trabajo desarrollado por Phuoc y Massoudi (2008), dio como resultado valores de viscosidad relativa en el mismo orden para nanofluidos de óxido de hierro en agua.

A pesar de los muchos modelos desarrollados para la conductividad térmica y la viscosidad, de la comparación con datos experimentales aún no es posible concluir cuál de ellos describe realmente los fenómenos térmico e hidrodinámico de

los nanofluidos. Es importante destacar que el modelo de Batchelor es el más referenciado entre los modelos convencionales para la viscosidad de nanofluidos.

2.5.4. Correlaciones teóricas para otras propiedades de los nanofluidos

Generalmente, el procesamiento de los datos experimentales para convección forzada de nanofluidos comienza con el conocimiento de las propiedades modificadas de los nanofluidos y la aplicación de algunas correlaciones conocidas para transferencia de calor en flujo interno. Las Ecs. (2.25) y (2.26) determinan las propiedades específicas para sustancias con múltiples componentes y son basados en el principio físico de la regla de mezclas (mayores detalles sobre estos aspectos, en el trabajo de Zhou et al., 2010).

$$\rho_{nf} = (1 - \phi_{np})\rho_{fb} + \phi_{np}\rho_{np} \quad (2.25)$$

$$\rho_{nf}(C_p)_{nf} = (1 - \phi_{np})\rho_{fb}(C_p)_{fb} + \phi_{np}\rho_{np}(C_p)_{np} \quad (2.26)$$

Donde ρ es la masa específica, C_p es el calor específico de la sustancia, ϕ es la concentración volumétrica, y los índices nf , np y fb representan nanofluido, nanopartícula y fluido base, respectivamente.

2.6. Convección forzada en flujos internos

La transferencia de calor por convección hace referencia a la transferencia de energía entre una superficie y un fluido en movimiento sobre esa superficie. Dentro del fenómeno convectivo están incluidos los efectos del movimiento global

del fluido (advección) y del movimiento aleatorio de las moléculas del fluido (conducción o difusión).

Los fluidos (líquidos o gases) utilizados en aplicaciones de refrigeración son generalmente forzados a fluir mediante un ventilador o una bomba a través de una tubería que sea lo suficientemente larga para conseguir la transferencia de calor deseada. En un flujo interno, el fluido está completamente confinado por las superficies internas del tubo, lo que constituye un límite para el crecimiento de la capa límite.

La mayoría de los líquidos en procesos térmicos es transportada en tubos (cuya sección transversal es circular) para obtener una menor pérdida de carga y la mejor transferencia de calor en la superficie. Mientras que para los gases es preferible el uso de ductos de sección no circular, en los cuales la pérdida de carga no es tan pronunciada.

A pesar de existir una amplia teoría sobre el flujo de fluidos, soluciones teóricas son obtenidas apenas para un reducido número de casos simples, como el flujo totalmente desarrollado en una tubería recta de sección circular. Por tanto, son necesarios resultados experimentales para el mayor número de flujos posibles y así, obtener correlaciones empíricas en sustitución de las soluciones analíticas. Sin embargo, siendo estos experimentos realizados en condiciones controladas y por el hecho que dos experimentos nunca son exactamente iguales, es común obtener un error del orden del 10% para cálculos de coeficiente de fricción o convección (ver Incropera, 2008).

Es importante mencionar que la fricción entre las capas del fluido puede causar un incremento en la temperatura del mismo. Aunque tal incremento es mínimo y puede ser obviado en aplicaciones de intercambio de calor. La principal consecuencia de la fricción es, en tal sentido, la pérdida de carga.

En la mayor parte de las aplicaciones prácticas, el flujo dentro de un ducto o tubería puede ser considerado unidimensional. Como resultado, todas las propiedades son consideradas uniformes en cualquier sección transversal normal a la dirección del flujo, cuando son asumidas para valores volumétricos medios. Si el régimen fuere permanente, estas propiedades serán también constantes en el tiempo.

2.6.1. Consideraciones hidrodinámicas y térmicas

Por la geometría del problema (un flujo de fluido a través de una tubería recta de sección circular), la velocidad del fluido varía desde cero (en la zona próxima a las paredes), hasta un valor máximo (localizado en el centro del tubo). De ahí que sea conveniente trabajar con una velocidad media que permanezca constante para un fluido incompresible y un tubo de sección transversal constante. La determinación del valor de la velocidad media u_m en una tubería está basada en el principio de conservación de la masa, que viene dado por la Ec. (2.27).

$$\dot{m} = \rho u_m A_C = \int_{A_C} \rho u_{(r,x)} dA_C \quad (2.27)$$

Donde \dot{m} representa El flujo másico; ρ , la masa específica del fluido; A_C , el área de la sección transversal y $u_{(r,x)}$, el perfil de velocidad.

Para un flujo incompresible dentro de un tubo de sección circular de radio R, la velocidad media viene dada por la Ec. (2.28):

$$u_m = \frac{\int_{A_C} \rho u_{(r,x)} dA_C}{\rho A_C} = \frac{\int_0^R \rho u_{(r,x)} 2\pi r dr}{\rho \pi R^2} = \frac{2}{R^2} \int_0^R u_{(r,x)} r dr \quad (2.28)$$

Entonces, conociendo el perfil de velocidad o el flujo másico, se puede determinar la velocidad media del fluido en movimiento. Este perfil es determinado mediante la resolución de la ecuación de conservación del momento lineal en un elemento diferencial e integrando en el dominio entero del fluido con las condiciones de contorno establecidas. A partir de estos, son obtenidas las Ecs. (2.29) y (2.30).

$$u_m = -\frac{R^2}{8\mu} \frac{dp}{dx} \quad (2.29)$$

$$\frac{u(r)}{u_m} = 2 \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] \quad (2.30)$$

Para determinar la caída de presión, es conveniente trabajar con el factor de fricción de Moody, dado por la Ec. (2.31)

$$f = \frac{-(dp/dx)D}{\rho u_m^2/2} \quad (2.31)$$

Tras las operaciones correspondientes, el factor de fricción f para un flujo laminar totalmente desarrollado, es dado por la Ec. (2.32).

$$f = \frac{64}{Re_D} \quad (2.32)$$

Para un flujo turbulento, cuyo análisis es más complejo, es preciso obtener correlaciones basadas en resultados experimentales. El factor de fricción f no es dependiente únicamente del número de Reynolds, sino también de las condiciones

de superficie del tubo objeto de estudio. El valor f parte de un mínimo (para tubos de superficies lisas) y va en aumento con el incremento de la rugosidad de la superficie. Para condiciones de pared lisa, el factor de rozamiento puede ser calculado mediante las correlaciones dadas en las Ecs. (2.33) y (2.34) con razonable precisión.

$$f = 0,316Re_D^{-1/4}, \quad \text{para } Re_D \lesssim 2 \times 10^4 \quad (2.33)$$

$$f = 0,184Re_D^{-1/5}, \quad \text{para } Re_D \gtrsim 2 \times 10^4 \quad (2.34)$$

Por otro lado, Pethukov (1970) desarrolló una única correlación para un amplio rango de número de Reynolds, como muestra la Ec. (2.35):

$$f = [0,790 \ln(Re_D) - 1,64]^{-2}, \quad \text{para } 3000 \lesssim Re_D \lesssim 5 \times 10^6 \quad (2.35)$$

Retomando la Ec. (2.31), y con el valor calculado del factor de rozamiento f , puede ser determinada la caída de presión para una longitud dada. Integrando en el total de la longitud L del tubo, es obtenida la Ec. (2.36):

$$\Delta p = f \frac{L}{D} \frac{\rho u_m^2}{2} \quad (2.36)$$

Con este valor, es calculada la potencia requerida para las condiciones hidrodinámicas del flujo con uso de la Ec. (2.37):

$$\dot{W} = \frac{\dot{m} \Delta p}{\rho} \quad (2.37)$$

Cuando el fluido es calentado o enfriado desde el exterior mientras es forzado a fluir dentro de un tubo, su temperatura varía desde T_p en la superficie interior del tubo (pared), hasta un valor mínimo (si calentáramos el fluido) o máximo (si enfriáramos el fluido). La temperatura media T_m es definida como la temperatura que permanece uniforme en una sección transversal. Esta temperatura media es determinada a través del uso del principio de conservación de la energía, mostrado en la Ec. (2.38):

$$\dot{E}_{\text{fluido}} = \dot{m}C_p T_m = \int_{\dot{m}} C_p T \delta \dot{m} = \int_{A_c} \rho C_p T u dA_c \quad (2.38)$$

Donde C_p es el calor específico del fluido. El producto $\dot{m}C_p T_m$ en cualquier sección transversal a lo largo de la tubería representa el flujo de energía de esa sección.

Finalmente, para un fluido con masa específica y calor específico constantes fluyendo a través de un tubo recto de sección circular con radio R , la temperatura media es dada por la Ec. (2.39).

$$T_m = \frac{2}{u_m R^2} \int_0^R \rho T_{(r,x)} V_{(r,x)} r dr \quad (2.39)$$

Es importante notar que la temperatura media T_m del fluido varía durante un proceso de calentamiento o enfriamiento. Por ello, las propiedades del flujo interno son evaluadas usualmente a la temperatura media volumétrica del fluido, que es aproximada inicialmente como la media aritmética de las temperaturas medias en las secciones de entrada y salida del tubo.

2.6.2. Tipos de regímenes de flujo

Un flujo interno puede ser definido como laminar, en transición o turbulento según las condiciones a las cuales esté sometido. El número adimensional usado para establecer cuál es el régimen del flujo es el número de Reynolds, definido mediante la Ec. (2.40).

$$Re_D = \frac{\rho u_m D}{\mu} = \frac{u_m D}{\nu} \quad (2.40)$$

Donde μ e ν , son la viscosidad dinámica y cinemática, respectivamente.

Bajo condiciones prácticas y para los rangos establecidos a continuación, el régimen del flujo puede ser considerado:

<i>Laminar</i>	$Re_D < 2300$
<i>Transicional</i>	$2300 < Re_D < 10000$
<i>Turbulento</i>	$Re_D > 10000$

En un flujo en transición, este varía de laminar para turbulento aleatoriamente. Es bueno recordar que el flujo puede ser considerado laminar a altos valores de Reynolds (por encima de 10000) en tuberías extremadamente lisas, evitando siempre perturbaciones en el flujo y vibraciones en la tubería (Incropera, 2008).

Otro número adimensional bastante utilizado para la caracterización del flujo es el número de Prandtl, que relaciona las difusividades de momento y térmica, según la Ec. (2.41).

$$Pr = \frac{c_p \mu}{k} = \frac{\nu}{\alpha} \quad (2.41)$$

Donde α es la difusividad térmica del fluido.

El número de Peclet relaciona las tasas de advección y difusión de un determinado fenómeno físico. Es calculado mediante la Ec. (2.42).

$$Pe_D = \frac{uD}{\alpha} = Re_D Pr \quad (2.42)$$

En fenómenos de convección, el número de Nusselt es importante porque relaciona la transferencia de calor convectiva y la transferencia de calor solamente por conducción, según la Ec. (2.43).

$$Nu = \frac{hD}{k} \quad (2.43)$$

Donde h es el coeficiente de transferencia de calor convectiva, D es la magnitud característica (en este caso, el diámetro).

Haciendo una analogía, el número de Nusselt representa para la capa-límite térmica lo que el coeficiente de fricción representa para la capa-límite hidrodinámica. Además de eso, el número de Nusselt puede ser definido en función de los otros números adimensionales como Reynolds o Prandtl, relativo a una posición determinada de la geometría del problema. En este caso, el número de Nusselt local puede ser definido como una función de la siguiente forma: $Nu_x = f(x/L, Re_D, Pr)$. De ese modo, con el conocimiento del número de Nusselt es posible describir el desarrollo del coeficiente de calor convectivo (h) para cada posición arbitraria x .

2.6.3. Región de entrada

Cuando el fluido ingresa a la tubería circular a una velocidad uniforme, las moléculas de la capa en contacto con la superficie interior del tubo son completamente detenidas. Del mismo modo, el efecto de la fricción entre capas reduce gradualmente la velocidad de las capas adyacentes. El resultado es el desarrollo de una capa-límite de velocidades a lo largo del tubo. El espesor de esta capa-límite se incrementa en la dirección del flujo hasta llegar al centro del tubo, como es mostrado en la Fig. 2.9.

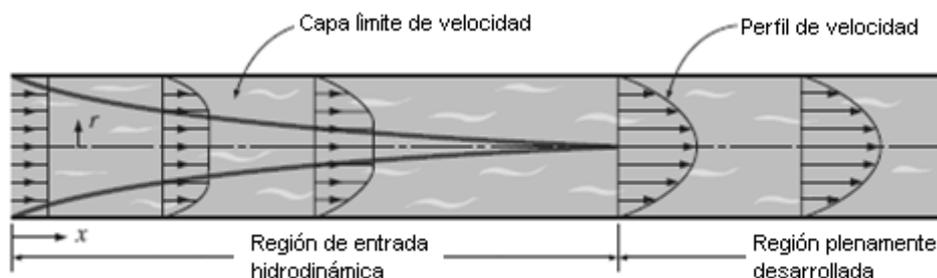


Figura 2.9. Desarrollo del perfil de velocidades al interior del fluido. Fuente: Incropera, 2008.

La región desde la entrada de la tubería al punto de conjunción de las capas-límite es denominada *entrada hidrodinámica*, de longitud característica L_h . En esta región, se considera que el flujo está en desarrollo. Después de ella, el perfil de velocidad en cada sección transversal permanece constante y el flujo pasa a ser considerado como totalmente desarrollado.

En el caso de la temperatura, si en la entrada fuere uniforme y la temperatura de la tubería se mantuviere en un valor diferente (mayor o menor), las moléculas del fluido en esta zona estarían a la misma temperatura (por conducción) variando también en el sentido radial hasta el centro de la tubería (por convección). También en este caso, existe una denominada región de entrada térmica de longitud L_t , después de la cual el flujo puede ser considerado térmicamente

desarrollado. Las Figs. 2.10 y 2.11 muestran la forma del perfil de temperaturas para una temperatura de pared menor y mayor, respectivamente.

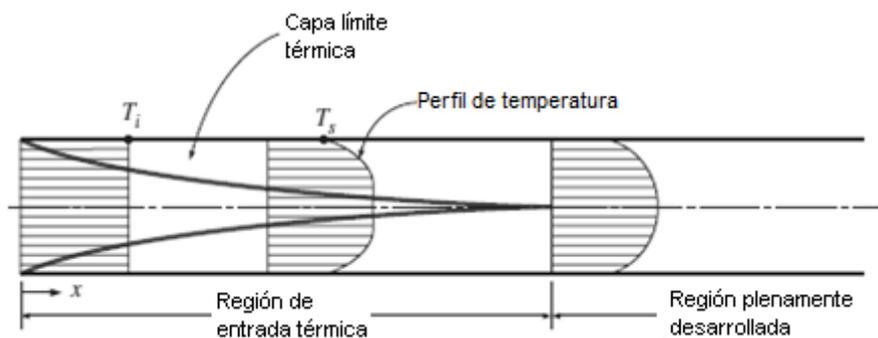


Figura 2.10. Desarrollo del perfil de temperatura al interior del fluido (enfriamiento). Fuente: Çengel, 2009.

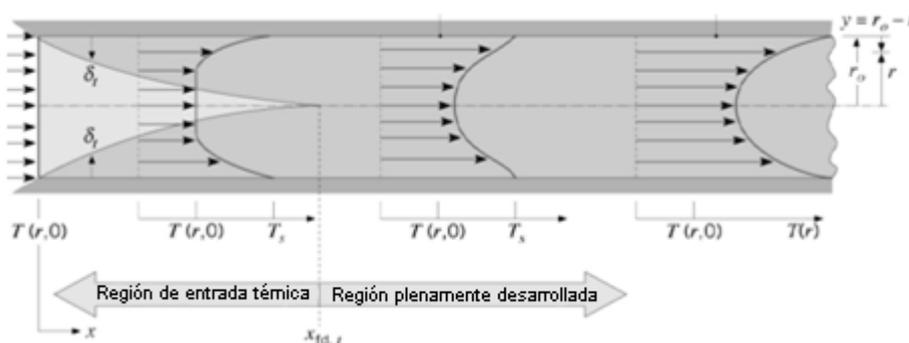


Figura 2.11. Desarrollo del perfil de temperatura al interior del fluido (calentamiento). Fuente: Incropera, 2008.

Para que el flujo pueda ser considerado totalmente desarrollado, debería desarrollarse tanto hidrodinámicamente como térmicamente. Para ello, debe satisfacer las condiciones dadas por las Ecs. (2.44) y (2.45)

$$\frac{\partial u_{(r,x)}}{\partial x} = 0 \quad \rightarrow \quad u = u_{(r)} \quad (2.44)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{T_p(x) - T(r,x)}{T_p(x) - T_m(r,x)} \right] = 0 \quad (2.45)$$

En aquella parte del fluido próxima a la pared de la tubería, por estar en una condición casi-estática, puede determinarse la transferencia de calor mediante la ley de Fourier para esa posición, usando la Ec. (2.46):

$$q_s'' = -k_f \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=0} \quad (2.46)$$

Para el fluido en las capas adyacentes, la transferencia de calor es determinada por la definición del coeficiente de transferencia de calor por convección, según la correlación de enfriamiento de Newton, conforme es mostrada en la Ec. (2.47).

$$q_s'' = h(T_p - T_m) \quad (2.47)$$

Donde T_p es la temperatura de la pared y T_m es la temperatura media del fluido en una posición axial de interés. El signo de la diferencia entre paréntesis definirá la dirección del flujo de calor: positivo para un proceso de calentamiento o negativo para enfriamiento.

Combinando las Ecs. (2.46) y (2.47) obtenemos una correlación para el cálculo del coeficiente de transferencia de calor por convección.

$$h = -k_f \frac{\partial T / \partial y|_{y=0}}{T_p - T_m} \quad (2.48)$$

2.6.4. Longitudes de entrada

En régimen laminar, las longitudes de entrada hidrodinámica y térmica pueden ser aproximadas con las correlaciones mostradas en las Ecs. (2.49) y (2.50).

$$L_{h,laminar} \approx 0,05 Re_D D \quad (2.49)$$

$$L_{t,laminar} \approx 0,05 Re_D Pr D = Pr L_{h,laminar} \quad (2.50)$$

Para un flujo turbulento, las fluctuaciones aleatorias superan los efectos de difusión de la cantidad de movimiento o de calor. Por tanto, las longitudes de entrada térmica e hidrodinámica son de valores similares, independientemente del número de Prandtl. Una correlación empleada para flujo turbulento es la de Bhatti y Shah (1987), mostrado en la Ec. (2.51).

$$L_{h,turbulento} = 1,359 Re^{1/4} \quad (2.51)$$

La entrada hidrodinámica es mucho menor en régimen turbulento y también la influencia del número de Reynolds sobre él. En la práctica, es de uso general considerar que los efectos de entrada están confinados a una longitud aproximadamente igual a 10 veces el diámetro:

$$L_{h,turbulento} \approx L_{t,turbulento} \approx 10D \quad (2.52)$$

2.6.5. Análisis térmico preliminar: Dos condiciones de contorno

Para hacer el balance de energía definimos el volumen de control mostrado en la Fig. (2.12).

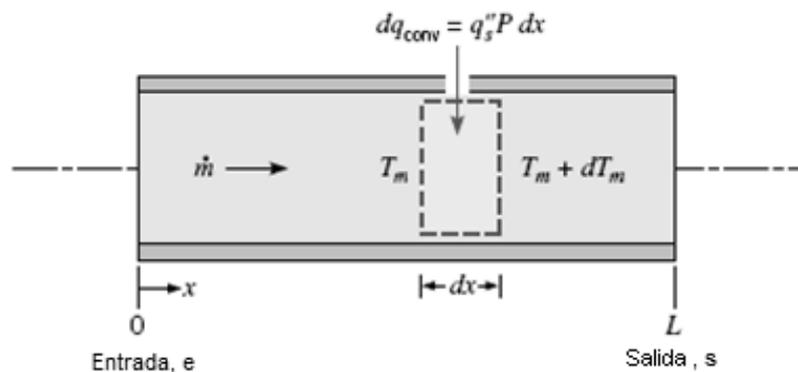


Figura 2.12. Volumen de control para el balance de energía. Fuente: Incropera, 2008.

Aplicando el principio de conservación de energía para un fluido en régimen permanente dentro de un tubo se obtiene la Ec. (2.53).

$$\dot{Q} = \dot{m}C_p(T_{m,s} - T_{m,e}) \quad (2.53)$$

Donde $T_{m,e}$ e $T_{m,s}$ son las temperaturas medias del fluido en la entrada y la salida, respectivamente, y \dot{Q} es la tasa de transferencia de calor hacia el fluido o desde el fluido.

Recordando la Ec. (2.47), es notorio que la temperatura media del fluido varía durante el proceso de calentamiento o enfriamiento. Manteniendo constante el coeficiente de transferencia de calor por convección (h), la temperatura de la pared del tubo deberá cambiar si el flujo de calor permaneciere constante. De manera inversa, el flujo de calor variará si la temperatura de la pared permaneciere constante a lo largo del tubo.

Con base en aplicaciones prácticas, se puede aproximar las condiciones superficiales de transferencia de energía en una tubería a los siguientes casos:

a. Flujo de calor constante

Partiendo de un balance de energía en el volumen de control, Ec. (2.54):

$$\dot{Q} = q_s'' A_s = \dot{m} C_p (T_{m,s} - T_{m,e}) \quad (2.54)$$

Podemos determinar la temperatura media del fluido a la salida de una tubería, usando la Ec. (2.55):

$$T_{m,s} = T_{m,e} + \frac{\dot{q}_s A_s}{\dot{m} C_p} \quad (2.55)$$

Más específicamente, con el desarrollo del área de transferencia de calor (es decir, la pared lateral del tubo), es posible determinar una correlación para el cálculo de la temperatura media del fluido en una determinada posición x , conforme a la Ec. (2.56).

$$T_m(x) = T_{m,e} + \frac{\dot{q}_s \pi D}{\dot{m} C_p} x \quad (2.56)$$

Según esta correlación, el valor de la temperatura media es linealmente dependiente de la posición axial cuando el flujo de calor a través de la pared del tubo es constante. La temperatura de la pared puede ser calculada a partir de un arreglo de la Ec. (2.47):

$$T_p = T_m + \frac{q_s''}{h} \quad (2.57)$$

En la región completamente desarrollada, la temperatura superficial T_p también aumenta linealmente siempre que el flujo de calor y el coeficiente de calor convectivo permanezcan constantes. La tendencia es fácilmente observable en la Fig. (2.13), que muestra que la pendiente de las temperaturas media del fluido y de la pared en relación con la posición axial en el tubo, es constante mientras sean constantes el flujo de calor superficial y el coeficiente convectivo de calor (esto es, en condiciones de flujo completamente desarrollado). En la misma figura se observa también que la diferencia entre las temperaturas media del fluido (T_m) y de pared (T_p) en cualquier posición axial del flujo desarrollado permanece constante.

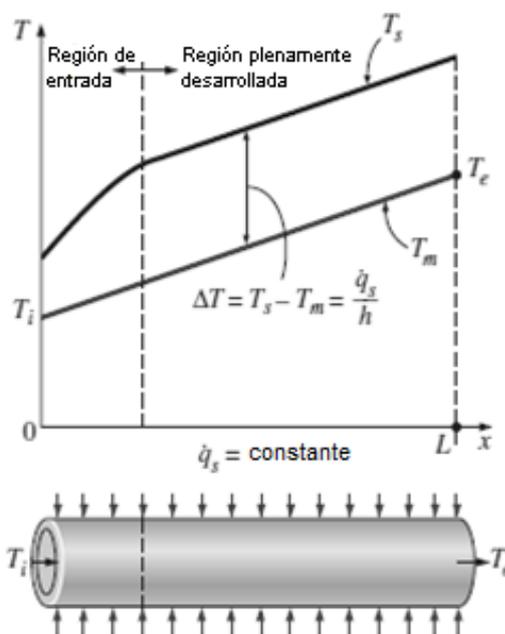


Figura 2.13. Desarrollo de temperaturas de pared y media del fluido. Fuente: Incropera, 2008.

b. Temperatura de pared constante.

Partiendo nuevamente de la correlación de Newton, Ec. (2.47), la tasa de transferencia de calor puede ser expresada por la Ec. (2.58).

$$\dot{Q} = hA_s(T_p - T_m)_{\text{media}} = hA_s\Delta T_{\text{media}} \quad (2.58)$$

El valor de h es el valor medio del coeficiente convectivo de transferencia de calor, A_s es el área de la superficie para la transferencia de calor, y ΔT_{media} es una media conveniente que representa la diferencia de temperaturas entre la superficie y el fluido. Del balance de energía en un volumen de control diferencial se tiene la Ec. (2.59).

$$\dot{m}C_p dT_m = h(T_p - T_m)dA_s \quad (2.59)$$

El área superficial del elemento diferencial es $dA_s = \pi D dx$, donde T_p fue asumida como constante a lo largo de la tubería. Se tiene que $dT_m = -d(T_p - T_m)$. Sustituyendo esta forma en la Ec. (2.59), se obtiene la Ec. (2.60):

$$\frac{d(T_p - T_m)}{T_p - T_m} = -\frac{h\pi D}{\dot{m}C_p} dx \quad (2.60)$$

Integrando ambos lados de la Ec. (2.60) entre $x = 0$ (donde $T_m = T_{m,e}$) y $x = L$ (donde $T_m = T_{m,s}$), resulta la Ec. (2.61).

$$\ln \left(\frac{T_p - T_{m,s}}{T_p - T_{m,e}} \right) = -\frac{h\pi DL}{\dot{m}C_p} \quad (2.61)$$

Aislando la temperatura media para una posición x cualquiera, se obtiene la Ec. (2.62) para la determinación de la temperatura media en una sección cualquiera del tubo circular.

$$T_{m,x} = T_p - (T_p - T_{m,e}) e^{\left(\frac{h\pi Dx}{\dot{m}C_p} \right)} \quad (2.62)$$

Despejando el término $\dot{m}C_p$, es obtenida la Ec. (2.63):

$$\dot{m}C_p = - \frac{h\pi DL}{\text{Ln}[(T_p - T_{m,e}) / (T_p - T_{m,s})]} \quad (2.63)$$

Sustituyendo esta forma en la Ec. (2.54) e igualando a la Ec. (2.58), es definida en la Ec. (2.64) la media logarítmica de las diferencias de temperatura.

$$\Delta T_{ml} = \frac{T_{m,e} - T_{m,s}}{\text{Ln}[(T_p - T_{m,s}) / (T_p - T_{m,e})]} = \frac{\Delta T_{m,s} - \Delta T_{m,e}}{\text{Ln}(\Delta T_{m,s} / \Delta T_{m,e})} \quad (2.64)$$

La forma $\dot{Q} = hA_s \Delta T_{ml}$ es la más adecuada para la condición de contorno de temperatura de pared constante.

2.6.6. Correlaciones para convección laminar y turbulenta en ductos

a. Régimen laminar

Tomando en cuenta las consideraciones anteriores y según las dos condiciones de contorno adoptadas, el problema físico de transferencia de calor en una tubería recta horizontal puede ser resuelto analíticamente para la región completamente desarrollada del flujo.

Para un flujo laminar, la resolución de las ecuaciones de conservación para la condición de flujo constante de calor en la pared, se tiene la Ec. (2.65).

$$T_m(x) - T_s(x) = \frac{11}{48} \frac{q_s'' D}{k} \quad (2.65)$$

Combinando la Ec. (2.65) con la correlación de Newton, Ec. (2.47), es obtenido el conocido valor del número de Nusselt para la región plenamente

desarrollada de un flujo laminar con condición de flujo de calor constante en la pared, dada por la Ec. (2.66):

$$Nu_D = \frac{hD}{k} = 4,36 \quad (2.66)$$

De modo semejante, la resolución de las ecuaciones de conservación para el flujo laminar con temperatura de pared constante como condición de contorno da como resultado otro valor constante para el número de Nusselt, Ec. (2.67).

$$Nu_D = 3,66 \quad (2.67)$$

Para la región de entrada, la resolución de las ecuaciones de conservación es más compleja, pues no pueden ser obviados tanto el término de advección radial, ni la velocidad y temperatura dependientes de x y r . Para determinar el desarrollo térmico del flujo, es usual considerara que las condiciones térmicas comienzan a desarrollarse en la presencia de un perfil de velocidades totalmente desarrollado. En el caso del uso de fluidos de elevado número de Prandtl, como los aceites, esta hipótesis no es necesaria. Este enfoque, denominado problema de la longitud de entrada térmica, contrasta con la otra hipótesis que asume que ambos perfiles térmico e hidrodinámico se desarrollan al mismo tiempo (que es llamado problema de longitud de entrada combinada).

Las tendencias de las soluciones de ambos enfoques son mostradas en la Fig. 2.14. El número de Nusselt local se desarrollado a lo largo de la tubería: disminuye desde un valor 'infinito' para un valor constante, dependiendo de las condiciones de contorno establecidas.

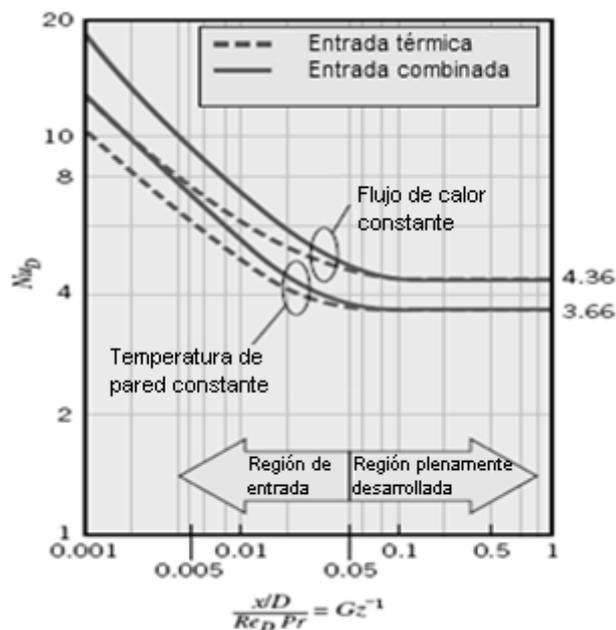


Figura 2.14. Resultados obtenidos en soluciones de longitud de entrada para un flujo laminar en un tubo circular. Fuente: Incropera, 2008.

El número adimensional de Graetz, mostrado en la Ec. (2.68), caracteriza el flujo laminar en un conducto y es empleada (su inversa) para una mejor visualización de las longitudes de entrada.

$$Gz_D = (D/x)Re_D Pr \quad (2.68)$$

De la Fig. 2.14, se observa que la forma en que Nu_D varía con Gz_D^{-1} es independiente del valor de Pr para el problema de la longitud de entrada térmica.

Si la condición de contorno fuere de temperatura de pared constante (sea el enfoque de longitud de entrada térmica o de entrada combinada para $Pr \gtrsim 5$), el valor del número de Nusselt medio es dado por la Ec. (2.69), propuesta por Hausen:

$$\overline{Nu}_D = 3,66 + 0,0668(D/L)Re_D Pr / \{1 + 0,04[(D/L)Re_D Pr]^{2/3}\} \quad (2.69)$$

Para la longitud de entrada combinada, Sieder y Tate (1936) propusieron la Ec. (2.70) con valores de Pr dentro del rango establecido.

$$\overline{Nu}_D = 1,86(Re_D Pr D/L)^{1/3} (\mu/\mu_s)^{0,14} \text{ Para } 0,60 \lesssim Pr \lesssim 5 \text{ e } 0,0044 \lesssim \mu/\mu_s \lesssim 9,75 \quad (2.70)$$

b. Régimen turbulento

Siendo que el análisis de las condiciones en flujos turbulentos es mucho más complicado, las correlaciones para la descripción de estos están basadas en resultados experimentales. Una de estas correlaciones clásicas para el cálculo del número de Nusselt local en flujo turbulentos totalmente desarrollados (hidrodinámica y térmicamente) a través de tubos circulares lisos es la de Colburn (1933), Ec. (2.71).

$$Nu_D = 0,023 Re_D^{4/5} Pr^{1/3} \quad (2.71)$$

La correlación de Dittus-Boelter (1930) es ligeramente diferente y es la que posee mayor preferencia, siendo dada por la Ec. (2.72):

$$Nu_D = 0,023 Re_D^{4/5} Pr^n \quad (2.72)$$

Donde $n = 0,4$ para calentamiento (donde $T_p > T_m$) y $n = 0,3$ para enfriamiento ($T_m > T_p$), en el siguiente rango de condiciones: $0,70 \lesssim Pr \lesssim 160$, $Re_D \gtrsim 10000$ y $L/D \gtrsim 10$. Las ecuaciones pueden ser usadas en diferencias de temperaturas pequeñas a moderadas $T_p > T_m$, con propiedades estimadas a T_m .

En flujos con grandes variaciones de propiedades, es recomendable la utilización de la Ec. (2.73), propuesta por Sieder y Tate:

$$Nu_D = 0,027 Re_D^{4/5} Pr^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_s} \right)^{0,14} \quad (2.73)$$

Para las condiciones: $0,70 \lesssim Pr \lesssim 16700$, $Re_D \gtrsim 10000$ y $L/D \gtrsim 10$, todas las propiedades son estimadas a T_m ; a excepción de μ_s , que es calculada a la temperatura de pared.

El inconveniente de la aplicación de las ecuaciones anteriores está en la gran incertidumbre admisible, de hasta 25% en comparación con los resultados esperados. Correlaciones más recientes han demostrado mayor precisión en el cálculo (con variaciones menores, próximas a 10%), como la de Gnielinski, Ec. (2.74).

$$Nu_D = \frac{(f/8)(Re_D - 1000)Pr}{1 + 12,7(f/8)^{1/2}(Pr^{2/3} - 1)} \quad (2.74)$$

El factor de rozamiento puede ser obtenido de las correlaciones presentadas anteriormente o del diagrama de Moody. La correlación es válida para $0,50 \lesssim Pr \lesssim 2000$ e $3000 \lesssim Re \lesssim 5 \times 10^6$ (Incropera, 2008).

2.7. Transferencia de calor por convección de nanofluidos

El estudio de la transferencia de calor por convección con el uso de nanofluidos se ha dividido en dos grandes áreas: la experimental y la computacional. Estas serán descritas brevemente a continuación.

2.7.1. Investigaciones experimentales

La mayoría de las investigaciones experimentales sobre la transferencia de calor por convección verifica que el uso de nanofluidos la intensifica en gran medida, aunque no exista una explicación contundente para ese fenómeno. Tal incremento sobrepasa los valores esperados inclusive con el uso de las propiedades intensificadas de los nanofluidos (como ocurre con la conductividad térmica, viscosidad, etc.).

Para determinar el valor del coeficiente de la transferencia de calor por convección son construidos bancos de experimentos que permitan la adquisición de datos de la temperatura y del régimen hidrodinámico en una determinada configuración física y bajo condiciones de contorno establecidas. El problema de la transferencia de calor en flujos internos, presentada en la sección anterior, es un punto de referencia común para muchas de las investigaciones relacionadas con este tópico. Con el fin de comparar los resultados del cálculo del comportamiento térmico e hidrodinámico del flujo de nanofluidos, y según la condición de contorno dada, el banco de experimentos puede adoptar el esquema de la Fig. 2.15 para la condición de flujo de calor constante; o el esquema de la Fig. 2.16, para la condición de temperatura de pared constante.

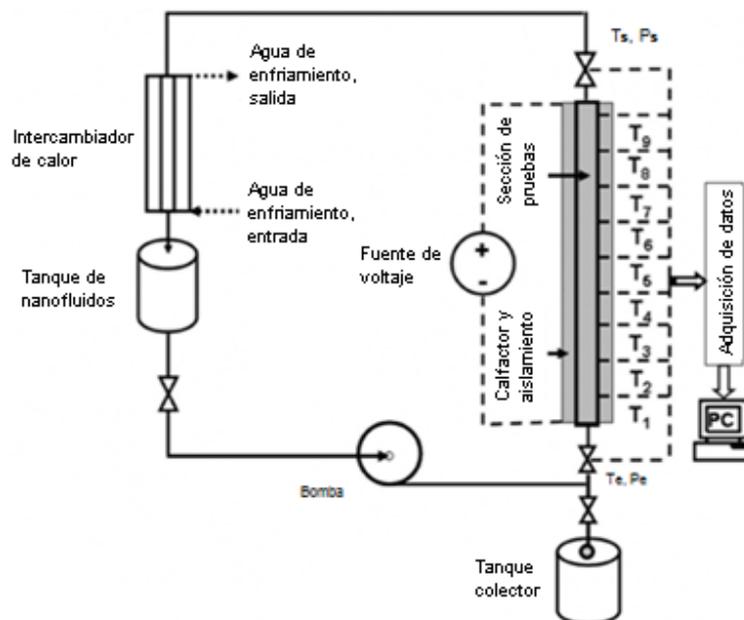


Figura 2.15. Esquema de banco de experimentos operando con flujo de calor constante. Fuente: Chen *et al.* (2008).

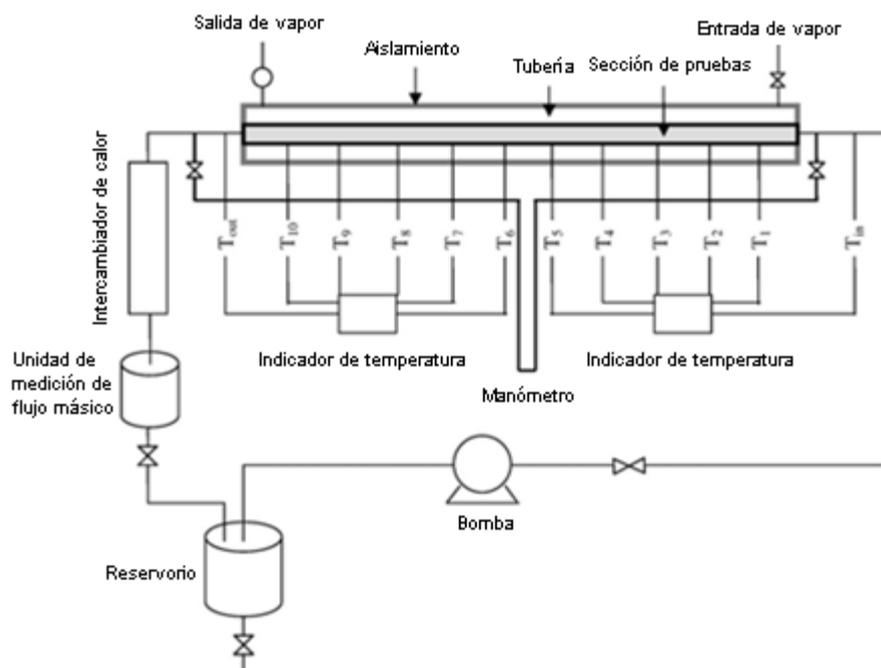


Figura 2.16. Esquema de banco de experimentos operando con temperatura de pared constante. Fuente: Fotukian *et al.* (2010).

Xuan y Li (2000) midieron el valor del coeficiente convectivo para nanopartículas de cobre en agua (de concentración volumétrica menor que 2%)

fluyendo en régimen turbulento (con número de Reynolds en el rango de 10000 a 25000), verificando también una intensificación máxima de casi 40%.

Heris et al. (2009) también reportaron resultados para nanofluidos de alúmina en agua, con intensificaciones de 15% para la conductividad térmica y 40% para la transferencia de calor por convección.

Resultados de Rea et al. (2008) indican que, en régimen turbulento, la transferencia de calor es intensificada en 27% para nanofluidos de alúmina en agua (con 6% de concentración volumétrica). Una de las conclusiones de ese trabajo fue que, según la comparación de los datos experimentales con modelos teóricos, los nanofluidos pueden ser considerados como mezclas homogéneas, de modo que la intensificación de la transferencia de calor es debida apenas a las propiedades mejoradas por la inclusión de nanopartículas en el fluido base.

Entre tanto, en el caso de un flujo de nanofluido deben ser considerados otros factores que intensifican la transferencia de calor convectiva más allá de los valores esperados. Como fue observado anteriormente, tal intensificación dependerá no sólo de la conductividad térmica efectiva del nanofluido y de las condiciones del régimen estudiado, sino también de las características geométricas de las nanopartículas y su concentración. Según esto, Roetzel y Xuan (2000) propusieron la siguiente forma general para el número de Nusselt:

$$Nu_{nf} = f \left[Re, Pr, \frac{k_{np} (\rho C_p)_{np}}{k_{fb} (\rho C_p)_{fb}}, \phi_{np}, \text{forma de la partícula} \right] \quad (2.75)$$

Desde esta perspectiva, algunos autores ya habían dado propuestas de correlaciones empíricas, como fue el caso de Pak y Cho (1998) con la determinación del número de Nusselt mediante la Ec. (2.76):

$$Nu_{nf} = 0,021Re^{0,8}Pr^{0,5} \quad (2.76)$$

La investigación de Xuan y Li (2000) vino con la propuesta de correlaciones empíricas basadas en sus datos experimentales, los cuales son mostrados en la Ec. (2.77) y (2.78), para el cálculo del número de Nusselt en régimen laminar y turbulento, respectivamente.

$$Nu_{nf} = \frac{h_{nf}d}{k_{nf}} = 0,0059(1,0 + 7,6286\phi_{np}^{0,6886}Pe_{np}^{0,001})Re_{nf}^{0,9238}Pr_{nf}^{0,4} \quad (2.77)$$

$$Nu_{nf} = \frac{h_{nf}d}{k_{nf}} = 0,4328(1,0 + 11,285\phi_{np}^{0,754}Pe_{np}^{0,218})Re_{nf}^{0,333}Pr_{nf}^{0,4} \quad (2.78)$$

En ambas, Pe_{np} representa el número de Peclet para una nanopartícula, que describe el efecto de la dispersión térmica causada por la microconvección y microdifusión de las nanopartículas suspendidas.

2.7.2. Simulaciones numéricas

Aunque los resultados de las aproximaciones teóricas para las propiedades físicas de los nanofluidos no sean concluyentes, fueron realizadas simulaciones numéricas que toman en cuenta los efectos dinámicos que modelos anteriores obviaron.

Un nanofluido es, por la naturaleza de su producción, una sustancia con múltiples componentes. De ahí que la mayoría de las investigaciones en la literatura sobre convección forzada los considera como una mezcla bifásica homogénea, sin deslizamiento entre las nanopartículas y el fluido base. En

convección forzada el flujo es caracterizado en función de ambos números adimensionales: Reynolds y Prandtl.

El estudio numérico de este tipo de flujo en varios regímenes es dividido en dos aproximaciones:

Primera aproximación:

La hipótesis del nanofluido como un medio continuo es aún válida, incluso con las nanopartículas suspendidas y considerando la condición de no-deslizamiento entre ambos componentes del nanofluido. Esto significa que el flujo puede ser considerado como monofásico, apenas con las propiedades físicas modificadas.

Segunda aproximación:

Considera el nanofluido como un compuesto bifásico para una mejor descripción del comportamiento de las fases líquida y sólida. Esta es una manera más aproximada para el estudio del fenómeno, ya que asume una velocidad de deslizamiento diferente de cero debido a diversos factores como la gravedad, rozamiento entre las moléculas del fluido base y las nanopartículas, difusión Browniana, sedimentación, dispersión, entre otras. Esta aproximación aplica un enfoque dinámico para cada fase, euleriano para el fluido base y lagrangiano para las nanopartículas (para de esa forma capturar sus trayectorias individuales).

En este trabajo, será adoptada la primera aproximación, que considera un flujo monofásico de nanofluidos con propiedades térmicas y reológicas modificadas.

CAPITULO III

METODOLOGÍA

3.1. Introducción

El presente capítulo inicia con un análisis preliminar de los modelos convencionales para la determinación de algunas propiedades físicas de los nanofluidos. Esto, con el objetivo de establecer algún criterio para la selección de los nanofluidos a ser simulados y obtener mayor diversidad de resultados. Con los nanofluidos y modelos de cálculo seleccionados fueron calculadas las propiedades modificadas necesarias para la simulación numérica.

En seguida, serán presentadas algunas definiciones básicas de la dinámica de fluidos computacional, y también un breve resumen de las características más relevantes de los programas utilizados para la simulación numérica.

Finalmente, y con base en las características mencionadas, son definidas la configuración geométrica y física del problema para la obtención de la solución numérica.

3.2. Cálculo de las propiedades de nanofluidos

Así como para la determinación experimental del comportamiento térmico del uso de nanofluidos, el primer paso antes de simular un flujo de nanofluidos es la obtención del propio nanofluido. La Fig. 3.1 muestra, esquemáticamente, que el objetivo de la preparación de los nanofluidos es obtener los valores de las propiedades intensificadas por el efecto de la inclusión de nanopartículas en el fluido base.

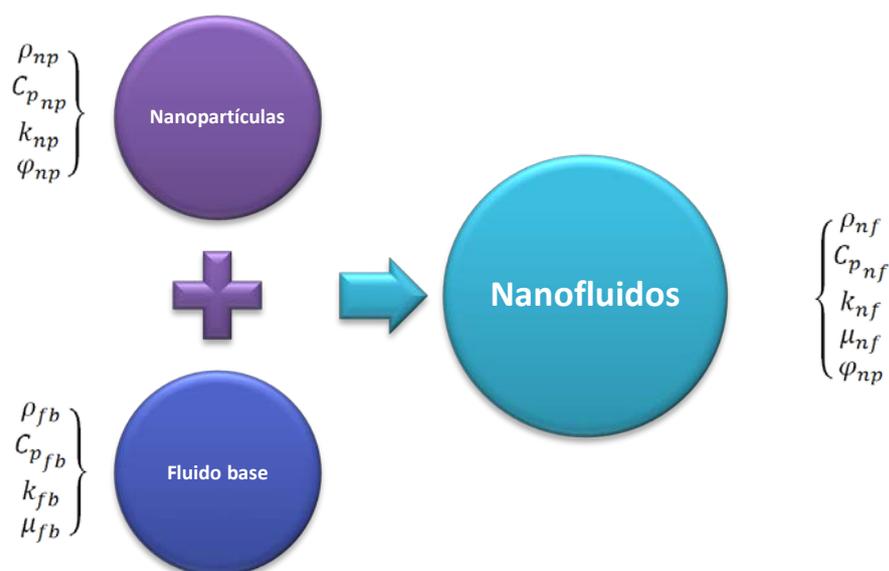


Figura 3.1. Representación esquemática de la “preparación” de nanofluidos.

A pesar de ser la síntesis de nanofluidos una de las principales barreras para su aplicación, sobre todo en términos de experimentación, es grande la variedad de mezclas encontradas en la literatura. Una de las dificultades encontradas en la revisión bibliográfica fue la caracterización parcial y, en algunos casos, deficiente de los fluidos base y de las nanopartículas. De ese modo, con la información incompleta de los nanofluidos se hace muy difícil reproducir los cálculos

realizados mediante las correlaciones determinadas para las propiedades. Inclusive, no existe una única fuente que proporcione todos los valores correctos de las propiedades de cada componente del nanofluido.

Es importante destacar que, en la literatura de libre acceso, las propiedades de los componentes de los nanofluidos referencian las propiedades de los materiales a escala macro. Las propiedades de los nanofluidos en este trabajo serán calculadas a partir de los datos mostrados en la Tab. 3.1, cuyas principales fuentes fueron: el banco de artículos colectados por el grupo de nanofluidos del LEST – UFU, el banco de datos del programa EES® y datos colectados a través de búsquedas realizadas en Internet, en ese orden de relevancia.

Tabla 3.1. Propiedades de fluidos base y nanopartículas propuestas.

PROPIEDADES DE LOS MATERIALES				
Fluidos Base				
	ρ (kg/m ³)	C_p (J/kg-K)	k (W/m-K)	μ (Pa-s)
<i>Agua</i>	997,10	4183,10	0,5948	$8,91 \times 10^{-4}$
<i>Etileno glicol</i>	1112,10	2408,60	0,2530	$1,72 \times 10^{-2}$
<i>Poli-alfa-oleofin</i>	789,80	2208,99	0,1561	$3,02 \times 10^{-2}$
Nanopartículas				
	ρ (kg/m ³)	C_p (J/kg-K)	k (W/m-K)	
<i>Plata</i>	10490	235	429,14	
<i>Cobre</i>	8920	390	401,80	
<i>Hierro</i>	7874	440	79,84	
<i>Alúmina (Al₂O₃)</i>	3860	850	40,00	
<i>Óxido cúprico (CuO)</i>	6310	532	76,00	
<i>Óxido de Titanio (TiO₂)</i>	4260	689	11,70	
<i>Sílice (SiO₂)</i>	2200	720	1,50	

Como fue observado en la sección 2.4, la determinación de propiedades como la conductividad térmica y la viscosidad todavía generan mucha controversia en ambas áreas de investigación: teórica y experimental. Por otro lado, el cálculo

de la masa específica y del calor específico son tópicos menos controvertidos. En ese sentido, se notó que, a partir de la selección de un modelo teórico para el cálculo de las propiedades, también puede ser establecido un criterio para la elección de los nanofluidos a ser utilizados. Siendo que los modelos teóricos convencionales más conocidos (esto es, Maxwell para conductividad térmica, Einstein para viscosidad) no toman en consideración otros factores además de los valores de las propiedades estudiadas para cada componente y la concentración volumétrica de las nanopartículas, fue considerado que la razón entre las propiedades de la nanopartícula y del fluido base es un parámetro importante para describir las intensificaciones de manera más general.

Así, denotamos k_r a la razón entre las conductividades térmica de la nanopartícula y el fluido base, como es mostrado en la Ec. (3.1).

$$k_r = \frac{k_{np}}{k_{fb}} \quad (3.1)$$

Aislando este término de la Ec. (2.6) es obtenida la Ec. (3.2), que representa la intensificación calculada por el modelo de Maxwell en función del parámetro k_r y la concentración volumétrica ϕ_{np} , como sigue:

$$k_{int-Max} = \frac{2+k_r+2\phi_{np}(k_r-1)}{2+k_r-\phi_{np}(k_r-1)} \quad (3.2)$$

La Fig. 3.2 muestra la tendencia de la intensificación de la conductividad térmica k_{int} , en relación con la razón de conductividades de ambas fases, líquida y sólida del nanofluido k_r , para distintos valores de concentración volumétrica de nanopartículas.

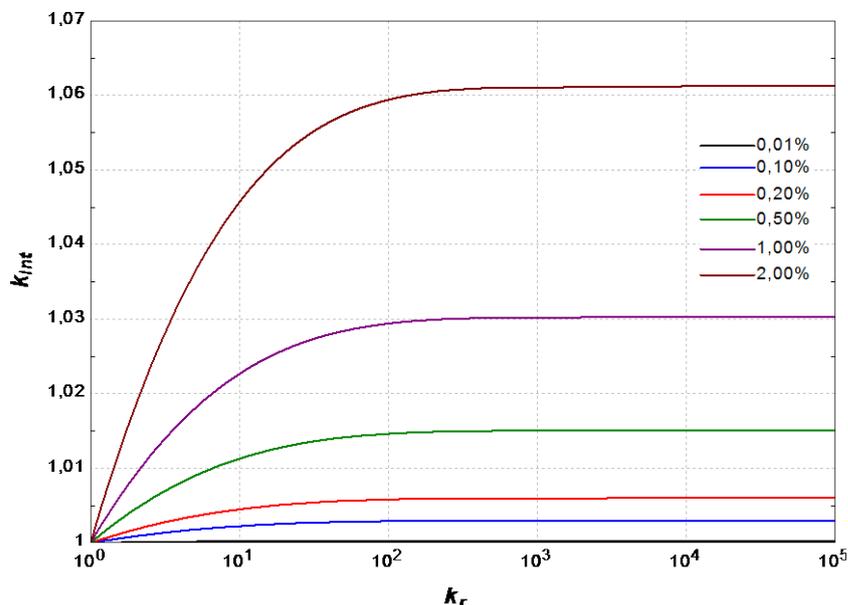


Figura 3.2. Intensificación de la conductividad térmica de nanofluidos para distintas razones de conductividad de la nanopartícula y el fluido base.

Nótese que la escala del gráfico es logarítmica para k_r . El rango mostrado puede parecer exagerado, pues valores de conductividad térmica por encima de diez mil son irreales. Sin embargo, lo exagerado del rango contribuye para la visualización de la tendencia. Es interesante observar que, para aquellos nanofluidos con nanopartículas de altísima conductividad en fluidos base de muy baja conductividad (esto es, para altos valores de k_r), los valores de intensificación de la conductividad térmica alcanzan un valor máximo a partir de un punto crítico. En el caso mostrado en la Fig. 3.2 (según el modelo de Maxwell), para mezclas de conductividad relativa k_r en el rango de 100 a 1000, se observa que el incremento de esta razón no tiene una influencia significativa para la intensificación, especialmente en bajas concentraciones. Para valores de conductividad relativa superiores a 1000, la intensificación alcanza un valor máximo e independiente del parámetro k_r , para todas las concentraciones mostradas.

Para el caso de la viscosidad, el análisis es prácticamente directo, pues aislando el término de viscosidad relativa de las correlaciones convencionales presentadas en la sub sección 2.4.3, son obtenidas funciones dependientes apenas de la concentración volumétrica con las tendencias mostradas en la Fig. 3.3.

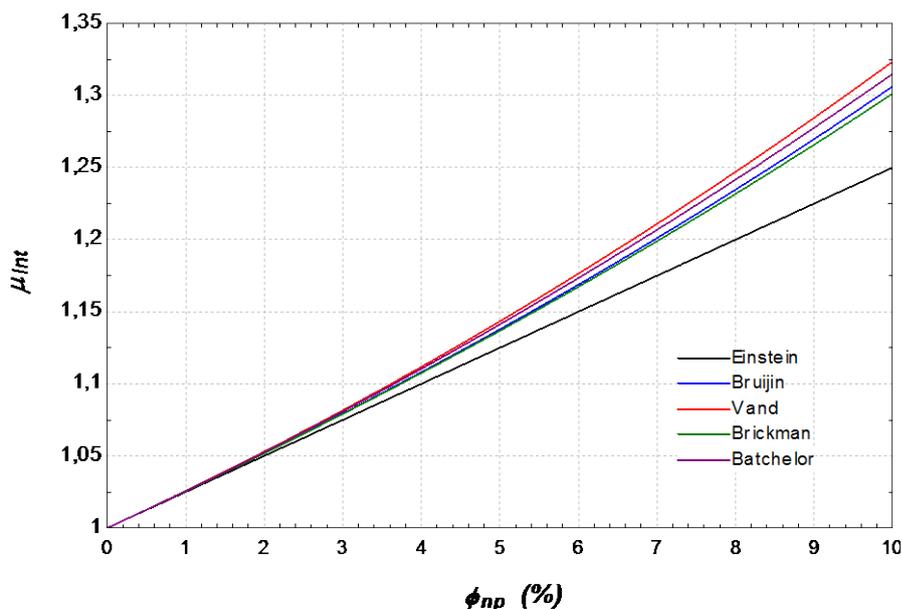


Figura 3.3. Comparación de los modelos de viscosidad en función de la concentración volumétrica.

Para el caso de las demás propiedades, como la masa específica y el calor específico, fueron definidas las siguientes propiedades relativas:

$$\rho_r = \frac{\rho_{np}}{\rho_{fb}} \quad (3.3)$$

$$(C_p)_r = \frac{(C_p)_{np}}{(C_p)_{fb}} \quad (3.4)$$

Escribiendo los términos ρ_{int} y $(C_p)_{int}$ en función de las propiedades relativas, se obtuvo como resultado las Ecs. (3.5) y (3.6).

$$\rho_{int} = (1 - \phi_{np}) + \phi_{np}\rho_r \quad (3.5)$$

$$(C_p)_{int} = \frac{(1-\phi_{np}) + \phi_{np}\rho_r(C_p)_r}{(1-\phi_{np}) + \phi_{np}\rho_r} \quad (3.6)$$

Analizando la correlación dada por la Ec. (3.5), para las mismas concentraciones utilizadas en el caso de la conductividad térmica, es obtenida la Fig. 3.4 para las intensificaciones de la masa específica que verifica la tendencia esperada: lineal y creciente con la concentración volumétrica de las nanopartículas.

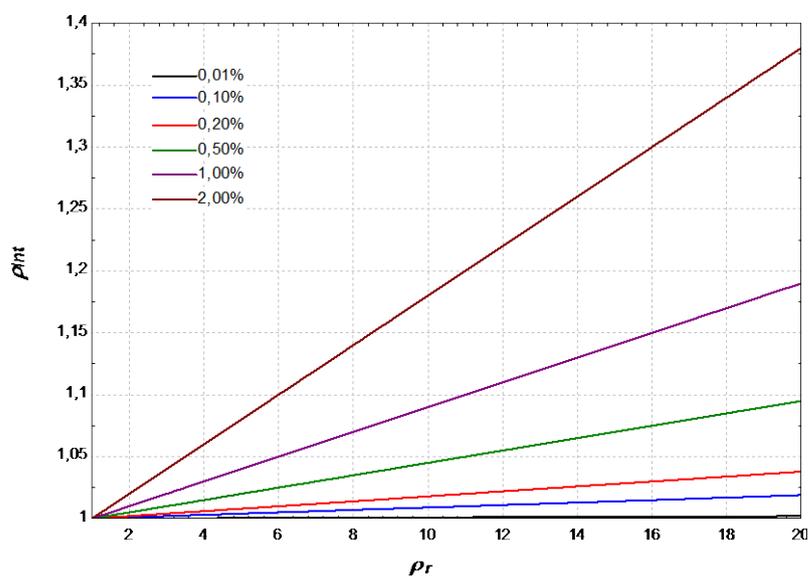


Figura 3.4. Tendencia de la intensificación de la masa específica en nanofluidos variando con la concentración volumétrica.

Para el caso de la intensificación del calor específico, es preciso establecer previamente el valor de la masa específica relativa. Por tal motivo, fueron calculados los valores de variación del calor específico $(C_p)_{int}$, con uso de la Ec. (3.6), primero para $\rho_r = 2$, y después para $\rho_r = 5$, mostrados en las Figs. 3.5 y 3.6, respectivamente, con el fin de observar mejor el comportamiento.

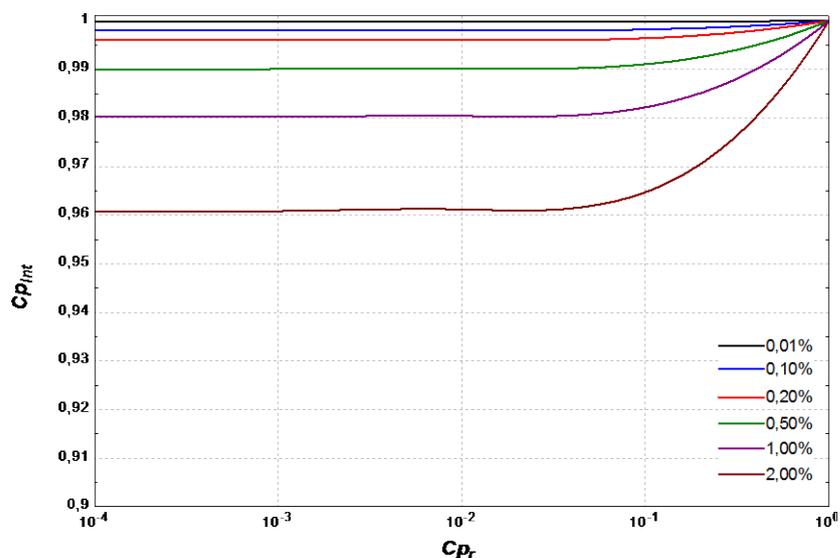


Figura 3.5. Tendencia de la variación del calor específico en nanofluidos con $\rho_r = 2$, variando con la concentración volumétrica.

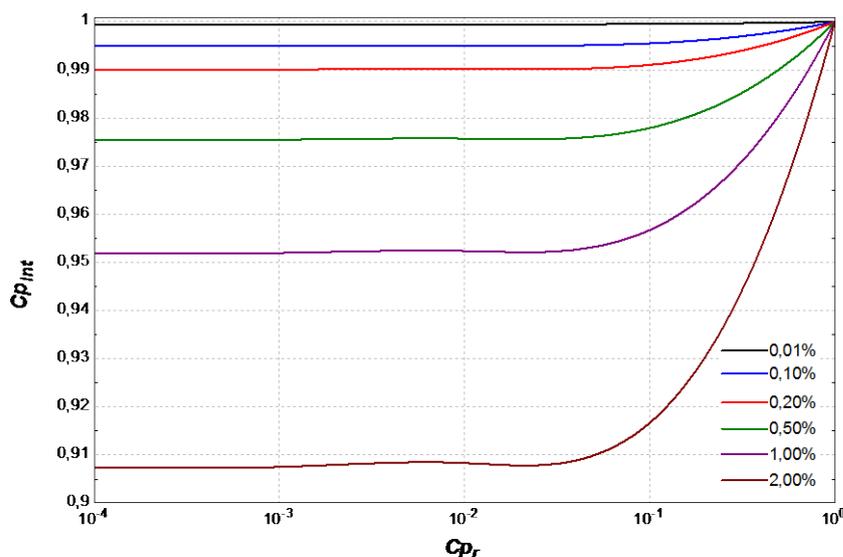


Figura 3.6. Tendencia de la variación del calor específico en nanofluidos con $\rho_r = 5$, variando con la concentración volumétrica.

Es interesante observar que un mayor valor de la masa específica relativa de la nanopartículas en relación al fluido base, influencia negativamente en el calor específico del nanofluido (conforme lo observado en la Tab. 3.1, los valores de esta propiedad son muchas veces mayores en los fluidos base que en las nanopartículas). También en este caso se obtuvo una tendencia similar a la de la

conductividad térmica, esto es, con un efecto de saturación en la variación de la propiedad a partir de un valor de calor específico relativo.

Hasta este punto, cada propiedad fue calculada con base en las correlaciones convencionales mencionadas anteriormente. Sin embargo, para determinar la aplicabilidad de cada modelo teórico y escoger los materiales a ser utilizados para la preparación de los nanofluidos, es necesario determinar un rango de propiedades relativas coherente con la realidad. En tal sentido, y partir de las propiedades mostradas en la Tab. 3.1, fueron calculadas las propiedades relativas para cada binomio nanopartícula y fluido base (agua, etileno glicol, aceite poli-alfa-oleofin). Los resultados de estos cálculos son presentados en las Tabs. 3.2, 3.3 y 3.4, para la masa específica, calor específico y conductividad térmica, respectivamente.

Tabla 3.2. Masa específica relativa a partir de los datos de la Tab. 3.1.

RAZÓN DE MASAS ESPECÍFICAS			
	<i>Agua</i>	<i>Etileno Glicol</i>	<i>Poli-alfa-oleofín</i>
<i>Ag</i>	10,52	9,43	13,28
<i>Cu</i>	8,95	8,02	11,29
<i>Fe</i>	7,90	7,08	9,97
<i>CuO</i>	6,33	5,67	7,99
<i>Al₂O₃</i>	3,87	3,47	4,89
<i>TiO₂</i>	4,27	3,83	5,39
<i>SiO₂</i>	2,21	1,98	2,79

Tabla 3.3. Calores específicos relativos a partir de los datos de la Tab. 3.1.

RAZÓN DE CALORES ESPECÍFICOS			
	<i>Agua</i>	<i>Etileno Glicol</i>	<i>Poli-alfa-oleofin</i>
Ag	0,06	0,10	0,11
Cu	0,09	0,16	0,18
Fe	0,11	0,18	0,20
CuO	0,13	0,22	0,24
Al₂O₃	0,20	0,35	0,38
TiO₂	0,16	0,29	0,31
SiO₂	0,17	0,30	0,33

Tabla 3.4. Conductividades térmicas relativas a partir de los datos de la Tab. 3.1.

RAZÓN DE CONDUCTIVIDADES TÉRMICAS			
	<i>Agua</i>	<i>Etileno Glicol</i>	<i>Poli-alfa-oleofin</i>
Ag	721,49	1696,21	2749,14
Cu	675,52	1588,14	2573,99
Fe	134,23	315,57	511,47
CuO	127,77	300,40	486,87
Al₂O₃	67,25	158,10	256,25
TiO₂	19,67	46,25	74,95
SiO₂	2,52	5,93	9,61

Estos valores relativos fueron de utilidad en el momento de establecer cuáles nanofluidos tendrían los más significativos efectos de intensificación o modificación de las propiedades necesarias para simular el flujo. Una forma más directa de visualizar estas relaciones es presentada en las Figs. 3.7, 3.8 y 3.9.

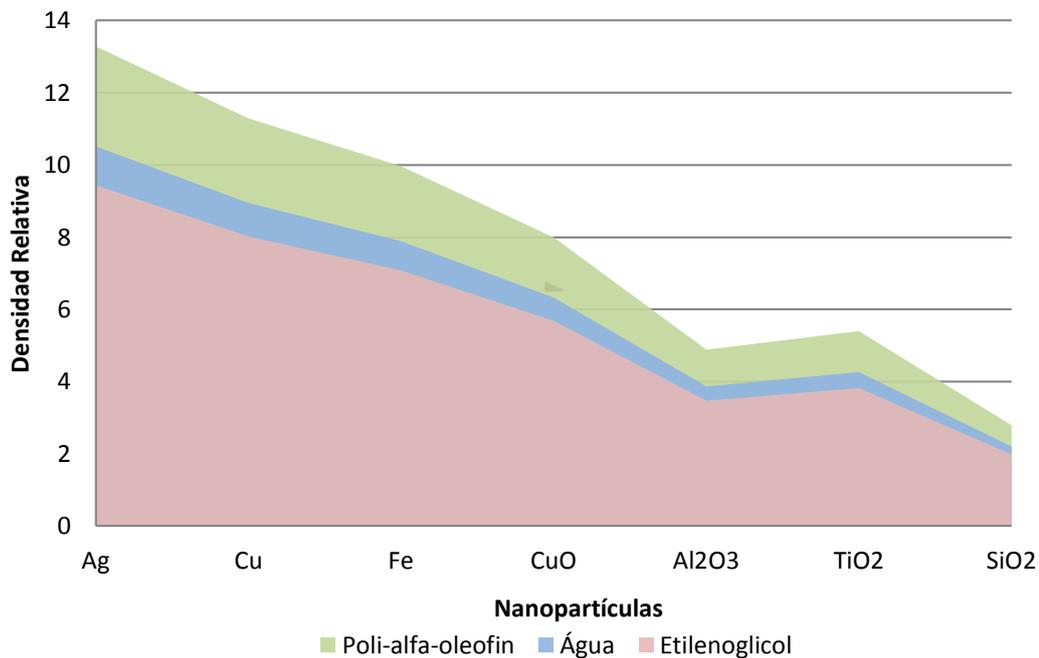


Figura 3.7. Masas específicas relativas a partir los datos de la Tab. 3.1.

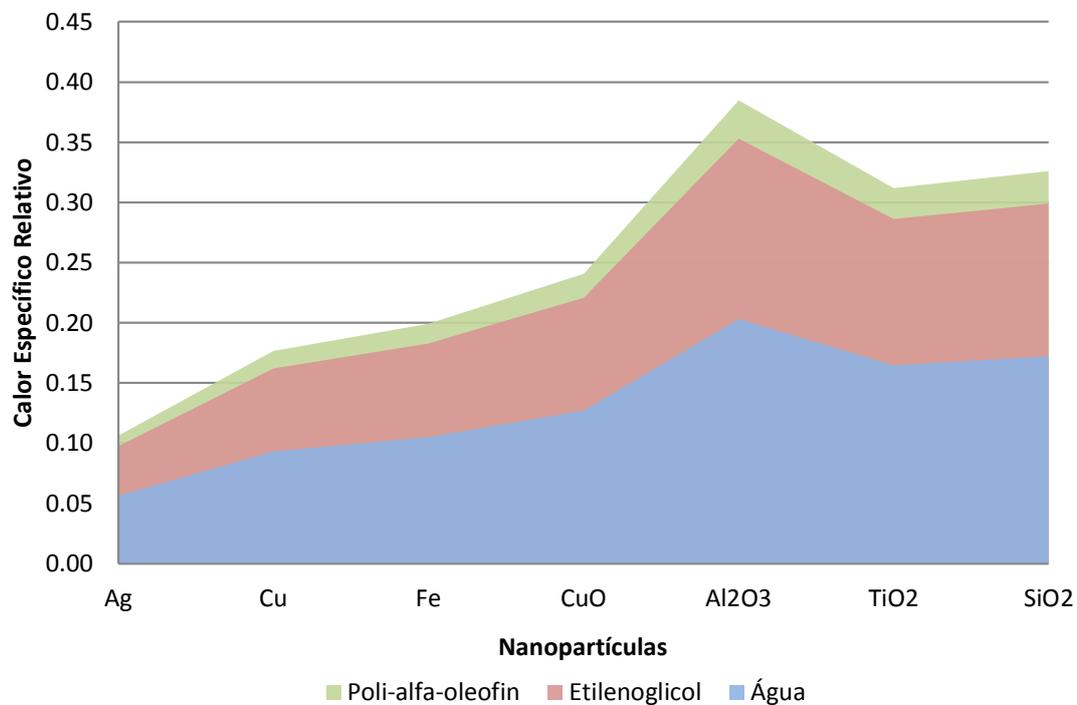


Figura 3.8. Calores específicos relativos a partir de los datos de la Tab. 3.1.

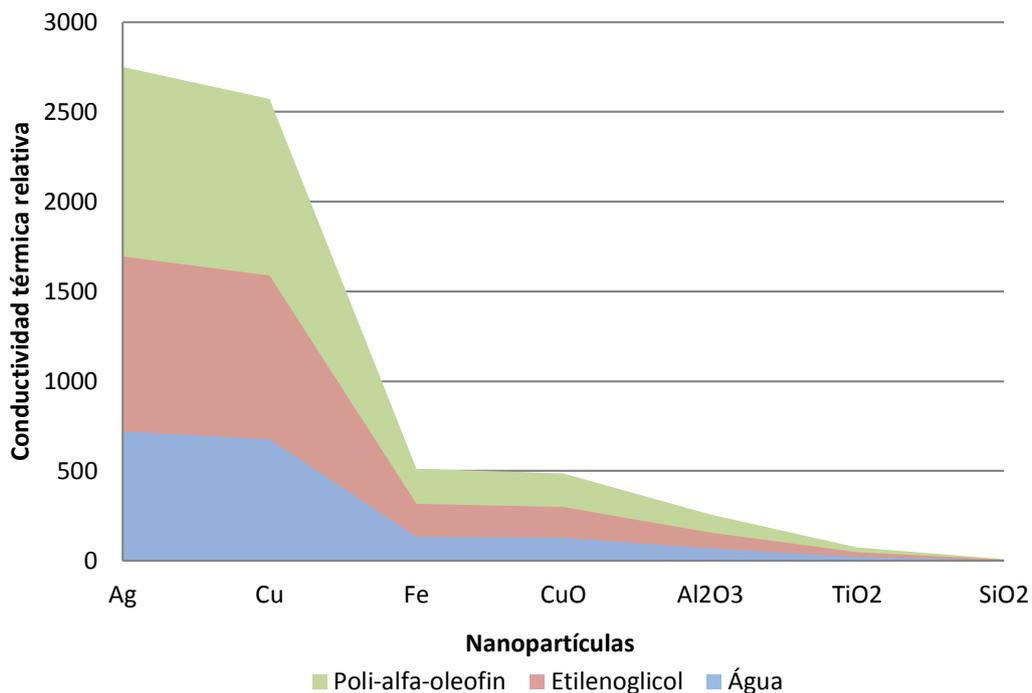


Figura 3.9. Conductividades térmicas relativas a partir de los datos de la Tab. 3.1.

En la Fig. 3.9 se consigue visualizar mejor la previsión de cuáles combinaciones de nanopartículas y fluidos base presentarán una mayor intensificación de la conductividad térmica, en concordancia con uno de los objetivos del presente trabajo, que es la determinación del comportamiento térmico e hidrodinámico de un flujo de nanofluido con propiedades modificadas.

Como ya fue mencionado, con base en las correlaciones convencionales empleadas, se observó que en los nanofluidos preparados con componentes cuya relación de conductividades térmicas fuese superior a 1000 (en el rango de 1% a 5% de concentración volumétrica), la intensificación de la conductividad térmica se tornaba constante (conforme a lo mostrado en la Fig. 3.2). De ese modo, y retomando los valores de la Tab. 3.4, pueden descartarse algunos materiales inicialmente propuestos para la preparación de los nanofluidos, tomando como referencia un rango de valor de k_r entre 100 y 1000. Los valores retirados fueron marcados con rojo en la Tab. 3.5.

Tabla 3.5. Combinaciones restringidas de nanofluidos.

RAZÓN DE LAS CONDUCTIVIDADES TÉRMICAS			
	<i>Agua</i>	<i>Etileno Glicol</i>	<i>PAO</i>
Ag	721,49	1696,21	2749,14
Cu	675,52	1588,14	2573,99
Fe	134,23	315,57	511,47
CuO	127,77	300,40	486,87
Al₂O₃	67,25	158,10	256,25
TiO₂	19,67	46,25	74,95
SiO₂	2,52	5,93	9,64

Se observa en la Tab. 3.5, que los nanofluidos que contienen nanopartículas de sílice (SiO₂) y titania (TiO₂) no conseguirán una intensificación significativa, incluso para concentraciones elevadas (conforme lo observado en la Fig. 3.2), y fueron removidos por ese motivo. Solamente en el caso de las nanopartículas de alúmina dispersas en agua será hecha una excepción, considerando las múltiples investigaciones teóricas y experimentales encontradas que podrán servir para posteriores comparaciones en futuros trabajos.

En este punto, también fue necesario definir el rango de concentraciones de los nanofluidos que serán simulados. Un rango razonable y coherente con muchas investigaciones teóricas y experimentales, que fue adoptada en el presente trabajo, es el siguiente: 2%, 4% y 6%. Con todo esto se consiguió restringir la cantidad de simulaciones a ser realizadas a los nanofluidos mostrados en la Tab. 3.6, que serán identificados mediante una secuencia alfanumérica para facilitar las referencias.

Tabla 3.6. Identificadores de los nanofluidos a ser utilizados.

NANOFLUIDOS			
	Agua (F1)	Etileno Glicol (F2)	Poli-alfa-olefín (F3)
Ag	F1N1		
Cu	F1N2		
Fe	F1N3	F2N3	F3N3
Al₂O₃	F1N4	F2N4	F3N4
CuO	F1N5	F2N5	F3N5

Así, el identificador del nanofluido viene dado por la secuencia: F#N#C#; donde el primer número hace referencia al fluido base utilizado, siendo (1) para agua, (2) para etileno glicol y (3) para aceite poli-alfa-oleofin; el segundo dígito referencia a la nanopartícula: (1) para plata, (2) para cobre, (3) para hierro, (4) para alúmina y (5) para óxido de cobre; y el último dígito, se refiere a la concentración volumétrica, siendo (1) para 2%, (2) para 4% y (3) para 6%.

Es importante definir cuáles serán las correlaciones empleadas en el cálculo de las propiedades modificadas de los nanofluidos. Para ese fin, fue considerado que el caso menos favorable para la transferencia de calor ocurre a la menor intensificación de la conductividad térmica. Por otro lado, es claro que una gran intensificación de la viscosidad reduce la aplicabilidad del nanofluido debido al correspondiente incremento de la potencia de bombeo. Por tal motivo, fueron seleccionados para el cálculo de las intensificaciones de la conductividad térmica y viscosidad el modelo de Maxwell y el de Batchelor, respectivamente. La masa específica y el calor específico de los nanofluidos serán calculados utilizando las correlaciones únicas, dadas por las Ecs. (2.25) y (2.26), respectivamente.

De ese modo, con base en los nombres de las combinaciones propuestas en la Tab. 3.6, pueden ser calculadas las propiedades de los nanofluidos a ser

utilizados en la simulación numérica. Los resultados son presentados en la Tab.

3.7.

Tabla 3.7. Propiedades de los nanofluidos a ser usados en las simulaciones.

BANCO DE PROPIEDADES						
FB	NP	CO	DE	CP	CT	V
F1	N1	2%	1186,96	3485,26	0,6311	9,37E-04
		4%	1376,82	2979,87	0,6688	9,89E-04
		6%	1566,67	2596,98	0,7082	1,04E-03
	N2	2%	1155,56	3597,50	0,6311	9,37E-04
		4%	1314,02	3153,14	0,6688	9,89E-04
		6%	1472,47	2804,42	0,7082	1,04E-03
	N3	2%	1134,64	3663,58	0,6304	9,37E-04
		4%	1272,18	3256,40	0,6674	9,89E-04
		6%	1409,71	2928,67	0,7060	1,04E-03
	N4	2%	1054,36	3939,05	0,6296	9,37E-04
		4%	1111,62	3720,14	0,6658	9,89E-04
		6%	1168,87	3522,68	0,7035	1,04E-03
	N5	2%	1103,36	3765,49	0,6304	9,37E-04
		4%	1209,62	3421,26	0,6674	9,89E-04
		6%	1315,87	3132,61	0,7059	1,04E-03
F2	N3	2%	1247,34	2160,06	0,2683	1,81E-02
		4%	1382,58	1960,14	0,2843	1,91E-02
		6%	1517,81	1795,85	0,3010	2,02E-02
	N4	2%	1167,06	2305,50	0,2682	1,81E-02
		4%	1222,02	2211,67	0,2840	1,91E-02
		6%	1276,97	2125,92	0,3005	2,02E-02
	N5	2%	1216,06	2213,85	0,2683	1,81E-02
		4%	1320,02	2049,78	0,2843	1,91E-02
		6%	1423,97	1909,66	0,3009	2,02E-02
F3	N3	2%	931,48	1909,92	0,1656	3,18E-02
		4%	1073,17	1689,82	0,1755	3,35E-02
		6%	1214,85	1521,05	0,1858	3,54E-02
	N4	2%	851,20	2085,74	0,1655	3,18E-02
		4%	912,61	1979,07	0,1754	3,35E-02
		6%	974,01	1885,85	0,1856	3,54E-02
	N5	2%	900,20	1973,89	0,1656	3,18E-02
		4%	1010,61	1790,16	0,1755	3,35E-02
		6%	1121,01	1642,62	0,1858	3,54E-02

3.3. Alcances sobre simulación numérica

La fluidodinámica computacional (CFD por sus siglas en inglés) es la parte de la ciencia que estima el flujo de un fluido, la transferencia de calor y masa, las reacciones químicas envueltas y otros fenómenos relacionados mediante la solución numérica de las ecuaciones que los gobiernan, generalmente cuando la solución analítica no es posible.

Para la estimativa del comportamiento térmico e hidrodinámico, las ecuaciones gobernantes empleadas son:

- Conservación de la masa:

$$\frac{\partial \rho_{nf}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_{nf} \mathbf{V}_{nf}) = 0 \quad (3.7)$$

- Conservación de la cantidad de movimiento lineal:

$$\frac{\partial \rho_{nf} \mathbf{V}_{nf}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_{nf} \mathbf{V}_{nf} \mathbf{V}_{nf}) = -\nabla p + \nabla \cdot \mathbf{T}_{nf} - \mathbf{S}_p + \rho_{nf} \mathbf{g} \quad (3.8)$$

- Conservación de la energía:

$$\left[\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{V}_{nf} \cdot \nabla T \right] = \nabla \cdot [k \nabla T] \quad (3.9)$$

Se denomina *solver* al programa que soluciona numéricamente las ecuaciones de conservación anteriormente mostradas. Los *solvers* utilizados por los paquetes de CFD incluidos en ANSYS® están basados en el método de volúmenes finitos. Esto es, dividir la región del fluido en un número finito de volúmenes de control, sobre las cuales son resueltas las ecuaciones de conservación (de masa, de cantidad de momento lineal, energía, especies, etc.).

Estas ecuaciones diferenciales parciales, Ecs. (3.7), (3.8) y (3.9), son discretizadas en un sistema de ecuaciones lineales, que pueden ser resueltas utilizando diversos métodos numéricos.

Comúnmente, los resultados obtenidos del análisis usando CFD son relevantes en estudios conceptuales, desarrollo detallado de un producto nuevo, estudios de casos y en el rediseño de los mismos. Es también usado como complemento de experimentación, pues contribuye a la reducción de los costos requeridos en la construcción de bancos de experimentos y también proporciona estimativas para la variación de diversos parámetros.

La solución de un problema vía simulación numérica implica un proceso que sigue determinados pasos, que son mostrados en la Fig. 3.10 y descritos brevemente a continuación.



Figura 3.10. Esquema del proceso de solución numérica de un problema.

1. Definición de objetivos

En este punto, es necesario determinar cuáles son los parámetros que se desea medir (por ejemplo: pérdida de carga, flujo másico, campo de temperaturas, etc.). Son comunes preguntas iniciales como:

- ¿Cuáles modelos físicos será necesario incluir en el análisis (turbulencia, compresibilidad, radiación, etc.)?
- ¿Cuáles serán las hipótesis para la simplificación del modelo estudiado?
- ¿Serán necesarias condiciones específicas de modelamiento para el problema?
- ¿Cuál es el grado de precisión requerido?
- ¿Cuál es el tiempo disponible para la obtención de los resultados?

2. Definición del dominio

El objetivo principal de la determinación del dominio es el aislamiento de la parte del sistema que se pretende analizar. Esta determinación incluye la definición de los límites físicos y de los tipos de condiciones de contorno según las informaciones disponibles (y si estas precisan ser adaptadas), como el ejemplo mostrado en la Fig. 3.11. A veces es necesario modificar el dominio hasta un punto en el cual los datos del problema puedan ser de utilidad. Muchas veces, también, un problema tridimensional puede ser simplificado a un problema bidimensional o axisimétrico.

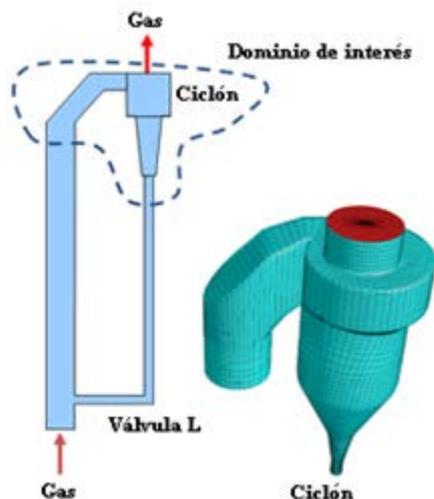


Figura 3.11. Ejemplo del aislamiento de un elemento objeto de estudio.

3. Geometría del problema

La geometría del problema es obtenida a través de diferentes herramientas CAD o por otros medios de adquisición directa (por ejemplo, escáner tridimensional) para definir la región que representa el dominio. Es importante verificar algunas consideraciones como: si es posible simplificar el dominio, si existe algún tipo de simetría o si es necesario dividirlo para establecer las condiciones de contorno.

4. Malla numérica

Se denomina creación de la malla a la división de la región que representa el fluido en un número finito de volúmenes de control para la solución de las ecuaciones de conservación. La selección de la forma y tamaño de estos volúmenes de control dependerá de la complejidad de la geometría a analizar. Ambos parámetros, forma y tamaño de los volúmenes de control, determinan la *resolución* de la malla.

Volviendo a la geometría, si esta fuese simple, es preferible una malla estructurada uniforme. Esto es, cuando las denominadas celdas

obedecen a una regla de construcción y presentan siempre igual número de celdas adyacentes. El inconveniente de este tipo de malla es que no se consigue describir con precisión las formas complejas. Para geometrías complejas son empleadas las mallas no-estructuradas, con la desventaja de que es necesario construir una matriz de conectividad entre los nodos de la malla. En la Fig. 3.12, son mostradas algunas de las formas de celdas que pueden ser adoptadas.

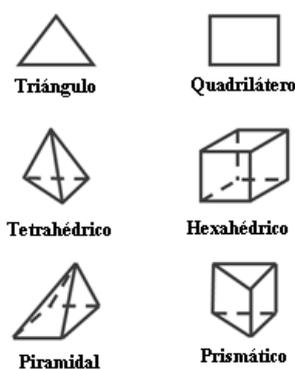


Figura 3.12. Tipos de celdas utilizadas en CFD.

Las características de la malla tienen influencia en la precisión de los resultados y en el tiempo de cálculo. Generalmente, una malla más fina podrá captar con mayor precisión el fenómeno analizado. En contraste, un refinamiento de este tipo aumenta el número de elementos a ser calculados y, consecuentemente, el tiempo de cálculo. En ese sentido, es importante definir cuál es la óptima resolución de malla para cada región del dominio, de forma que esta pueda envolver la mayoría de los aspectos geométricos de interés y consiga capturar todos los gradientes de las variables requeridas, con un razonable costo computacional. Para esto, también es importante tener una previsión, por lo menos aproximada, de la solución del problema e identificar las regiones que necesitan mayor atención (regiones

en las cuáles se tiene la “intuición” de que puedan presentar altos gradientes, por ejemplo).

Siendo esta una etapa crítica es necesario definir una estrategia para la creación de la malla, a partir de las consideraciones anteriores, que sea conveniente con la complejidad de la geometría del problema estudiado y se encuentre dentro de la capacidad de cálculo disponible.

5. Condiciones físicas

Dentro de las condiciones físicas a considerar se tiene a las propiedades del dominio, según el alcance del análisis a realizar (físicas, químicas, térmicas, eléctricas, etc.). De ese modo, también se debe seleccionar los modelos físicos apropiados (turbulencia, combustión, entre otros), las condiciones ambientales del entorno donde se desarrolla la simulación y las condiciones de contorno del dominio.

6. Condiciones computacionales

Para comenzar la simulación son necesarios los valores iniciales dentro del dominio, que pueden ser impuestos o recogidos de soluciones previas del problema. Parámetros de control y monitoreo para las variables deben ser definidos para la convergencia de la solución numérica.

7. Cálculo de la solución

Las ecuaciones de conservación discretizadas son solucionadas mediante un proceso iterativo, que puede variar de acuerdo con el método de solución (*solver*) escogido, hasta un criterio de convergencia previamente definido. La convergencia puede ser alcanzada cuando: i) las variaciones

en las variables de solución entre iteraciones lleguen a un valor definido como despreciable, ii) las magnitudes de interés alcancen valores permanentes, o iii) el número de iteraciones sobrepasen un número definido. La precisión de la solución convergente dependerá de los modelos físicos apropiados y precisos, de la resolución de malla y de los errores numéricos inherentes a los métodos numéricos utilizados.

8. Análisis de los resultados

Los resultados obtenidos son revisados para extraer aquellos datos que sean relevantes. Para esto son utilizadas herramientas de visualización que ayudarán a verificar si el dominio tuvo la respuesta esperada (si hubiere) o se describe un nuevo comportamiento. A partir de estos resultados, se puede obtener valores de fuerzas y momentos, coeficientes medios de transferencia de calor o balances de flujo, etc.

9. Actualización del modelo

Inclusive cuando los resultados presenten las características y tendencias esperadas, es deseable hacerse las siguientes preguntas: ¿Los modelos físicos adoptados son los más apropiados? ¿Las condiciones de contorno definidas son correctas? ¿Es adecuada la malla? La redefinición de algunas de las características anteriormente descritas podrá reflejarse en una mayor precisión de los resultados o en un ahorro del costo computacional.

3.4. Entorno de trabajo de Workbench®

A continuación, será presentada una breve descripción del ambiente del programa *Workbench®*, utilizado en este trabajo. Es un ambiente integrado que permite la utilización de módulos para diferentes tipos de análisis. La ventana principal del entorno de trabajo de *Workbench®* es mostrado en la Fig. 3.13.

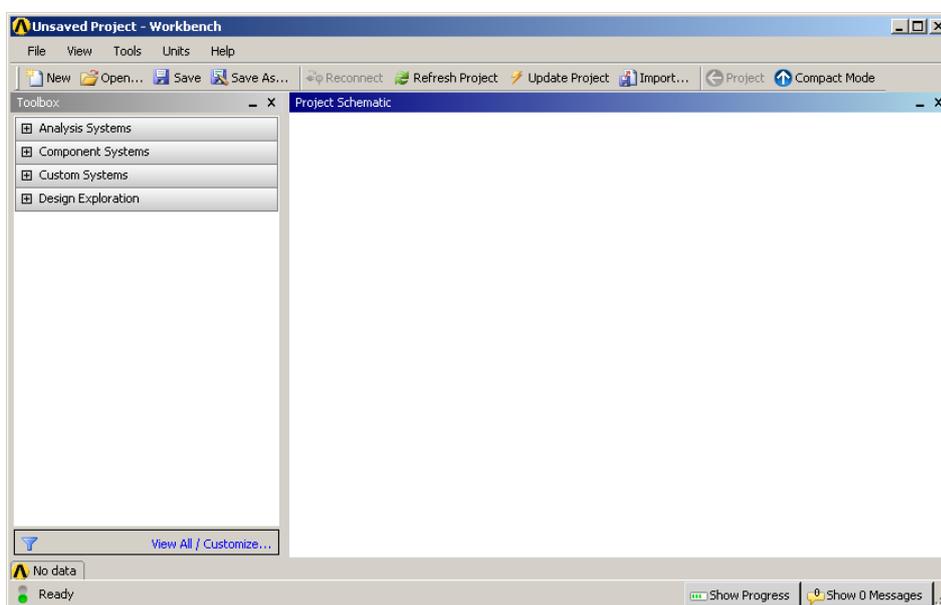


Figura 3.13. Vista de la ventana principal de *Workbench®*

Explorando los ítems del campo *Analysis Systems* (Sistemas de Análisis) y *Component Systems* (Sistemas Componentes), se aprecian las opciones mostradas en la Fig. 3.14.

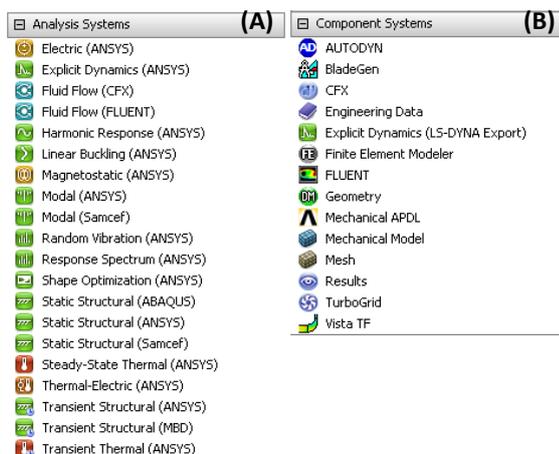


Figura 3.14. (A) Tipos de análisis disponibles en *Workbench*®, (B) Componentes individuales.

Dentro de los sistemas de análisis, se observan los diferentes tipos de análisis que pueden ser realizados en bloques compactos. Estos bloques contienen integrados los procesos de construcción de la geometría, generación de la malla, definición de propiedades, etc. La Fig. 3.15 muestra algunos tipos de análisis posibles de realizar con los paquetes integrados en ANSYS®.

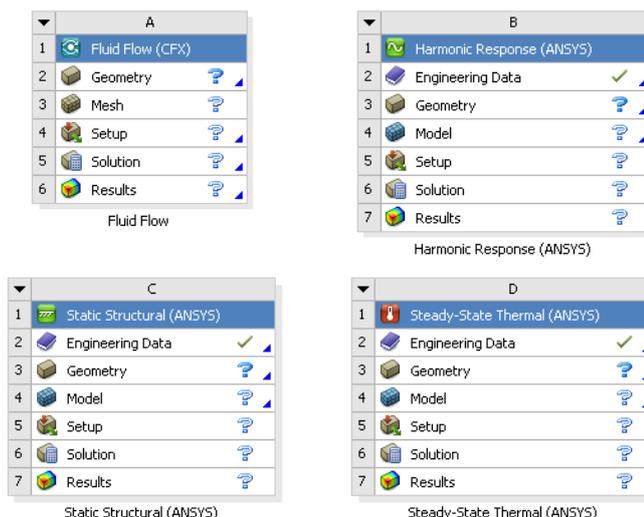


Figura 3.15. Algunos de los análisis posibles en ANSYS®. (A) Flujo de fluidos, (B) Respuesta armónica, (C) Estructuras estáticas, (D) Térmica en régimen permanente.

Una de las mayores ventajas del uso del *Workbench*® es la posibilidad de integrar diferentes tipos de análisis para determinar todas las respuestas en un sistema que incluya múltiples fenómenos ocurriendo simultáneamente. Como ejemplo, la Fig. 3.16 muestra un análisis de sistemas integrados que recoge datos y respuestas en cada bloque individual de estudio para ser usados en el bloque siguiente.

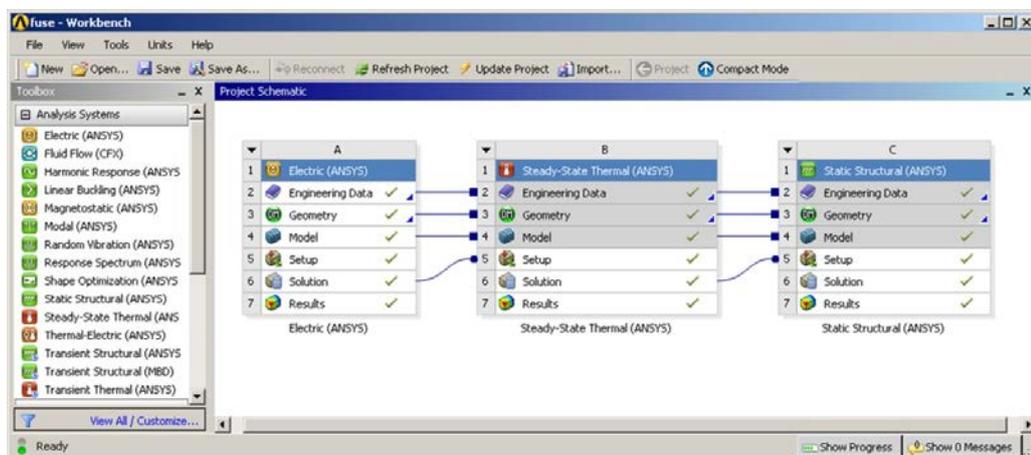


Figura 3.16. Ejemplo de integración de diferentes tipos de análisis.

Volviendo al análisis del fluido, el programa *ANSYS*® v.12.0, incluye paquetes especializados para cada etapa de formulación de un problema a solucionar. Programas patrón como *DesignModeler*® para el diseño de la geometría o *Meshing*® para la creación de la malla numérica, pueden ser sustituidos por otros fuera del entorno de *ANSYS*® y posteriormente importados a este. En este trabajo fueron utilizados ambos programas patrón conforme será descrito más adelante.

Para la solución de un problema de fluidodinámica computacional, el software *ANSYS*® presenta dos solucionadores (*solvers*) para las ecuaciones gobernantes: *FLUENT*® y *CFX*® desarrollados en paralelo por compañías diferentes. En la Fig. 3.17 se observa que los bloques de solución de ambos programas son equivalentes en todos los ítems. Inclusive, la geometría y la

creación de la malla pueden tener un origen común en ambos casos. Las diferencias en este aspecto se basan en la configuración del problema (*SETUP*) y en el método de solución empleado por cada programa (*SOLUTION*).



Figura 3.17. Bloques componentes para simulación mediante *Workbench*®. (A) *CFX* y (B) *FLUENT*®.

3.5. Definición de las características del problema

De lo explicado en las secciones 2.5 y 2.6 del capítulo anterior, muchas de las investigaciones experimentales iniciales fueron basadas en el análisis de una configuración física y geométrica análogas, esto es: un flujo confinado en una tubería recta, sometido a diferentes condiciones de contorno, como las mencionadas en la sección precedente. En la Fig. 3.18 es mostrada en destaque la configuración típica de la sección de interés en algunos estudios experimentales, aislada del resto del banco de experimentos. Esta configuración, como se aprecia, considera un flujo de calor constante a través de la pared.

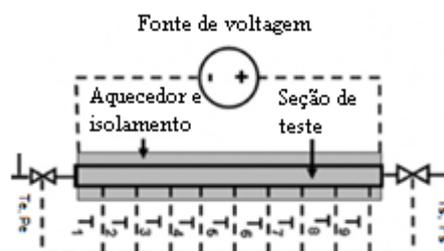


Figura 3.18. Sección de interés en bancos experimentales para la determinación de la intensificación de la transferencia de calor, operando bajo un flujo de calor constante.

Siendo que la principal motivación es la determinación de la intensificación de la transferencia de calor en un flujo de nanofluidos, el problema a resolver en el presente trabajo tendrá las siguientes características:

- Se considera al flujo de nanofluidos como un flujo monofásico con propiedades termofísicas intensificadas de acuerdo con los modelos teóricos presentados anteriormente.
- Para la definición de la geometría del problema, el flujo de nanofluido será confinado en una tubería recta de pared lisa en posición horizontal.
- La condición de entrada responsable de la convección forzada del nanofluido será un perfil parabólico de velocidad a temperatura constante (25°C), con la velocidad máxima calculada a partir del número de Reynolds, según sea el flujo laminar (con $Re = \{500, 1000, 1500\}$) o turbulento (con $Re = \{10000, 20000\}$).
- El flujo estará sometido a la condición de contorno más comúnmente utilizada en investigaciones experimentales: flujo de calor constante en la pared. En este caso, serán establecidos límites convenientes que garanticen la permanencia de la fase del nanofluido.
- Será considerado el enfoque de entrada térmica, ya que el análisis del comportamiento térmico será realizado con el flujo totalmente desarrollado en su perfil de velocidades.

Tomando en cuenta estas consideraciones, será mostrada cada una de las etapas que constituyen la solución del problema: creación de la geometría, creación de la malla numérica, configuración del problema físico, solución numérica y visualización de los resultados. El esquema inicial del proyecto en *Workbench®* es

mostrado en la Fig. 3.19, con bloques definidos separadamente. Esta ventaja de modularidad será útil más adelante.

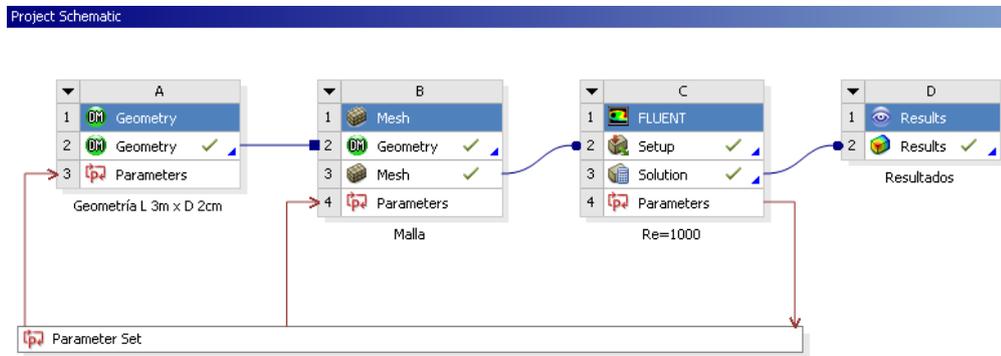


Figura 3.19. Esquema del proyecto para un flujo de nanofluidos.

Este proceso individual deberá ser reproducido para cada nanofluido, solucionando el problema bajo las mismas condiciones, solamente con las propiedades termofísicas e hidrodinámicas modificadas.

3.5.1. Creación de la geometría

Siendo la geometría del problema una tubería recta de 0,02 m de diámetro (valor referencial tomado de investigaciones similares), una primera aproximación se logra a través de la simplificación del análisis a una sección bidimensional del tubo con condición de axisimetría. Por tal motivo, es importante destacar una de las diferencias más saltante entre *FLUENT*® y *CFX*®: mientras el primero permite realizar análisis en geometrías bidimensionales directamente, el segundo necesita una geometría tridimensional de, por lo menos, espesor unitario. Teniendo en cuenta este aspecto del software, se vio por conveniente realizar todas las simulaciones utilizando *FLUENT*®, dada la notable reducción del número de elementos sobre los que se realizará el cálculo.

Como fue mencionado anteriormente, y dada su baja complejidad, la geometría del problema será considerada como una sección bidimensional de la

mitad de la tubería, que luego podrá ser replicada por la condición de axisimetría a lo largo de la línea central. Para ello fueron empleados los paquetes *DesignModeler*® y *Meshing*® del software *ANSYS*®, para el diseño y mallado de la geometría, respectivamente.

Con el fin de simplificar el cálculo, la tubería será representada por su sección transversal, transformando el problema tridimensional en uno bidimensional con condición de axisimetría. Asimismo, para un mejor condicionamiento del problema y un análisis más ordenado, serán definidas tres zonas en su geometría.

La primera zona fue establecida como una región de entrada para el desarrollo del flujo. Tomando en consideración lo explicado en la sub sección 2.6.4 se realizó una estimativa de las longitudes de entrada hidrodinámica para las simulaciones realizadas en régimen laminar con base en la Ec. (2.49). Así, para un flujo con $Re = 2000$, cuya condición de entrada es una velocidad uniforme, sería necesaria una longitud de entrada de 2,24 m hasta conseguir estabilizarlo hidrodinámicamente. La creación de esta zona implica el aumento del tiempo de cálculo para la simulación. Por ello, se vio por conveniente el cambio de la velocidad de entrada uniforme a una de forma parabólica, (esto será abordado más adelante, en el condicionamiento del problema). A pesar de esta simplificación, se hizo necesario establecer una longitud de entrada mínima, con el fin de evitar distorsiones en el cálculo de las celdas numéricas a la entrada de la tubería y sometidas a la condición de contorno térmica. De otro lado, para las simulaciones realizadas en régimen turbulento se tomó en cuenta la consideración práctica expresada por la Ec. (2.52), siendo en todos los casos, menor a 20 cm. Por lo mencionado, fue considerada una longitud de entrada de 30 cm para garantizar la estabilidad en el cálculo de las simulaciones y el desarrollo del flujo en régimen turbulento.

La segunda zona es la denominada región de prueba. Esta región, hidrodinámicamente estable, será sometida a la condición de contorno térmica a través de la frontera correspondiente a la pared de la tubería. Al ser realizados los cálculos previos para determinar la longitud de desarrollo térmico del flujo en régimen laminar, con uso de la Ec. (2.50), fue evidente la necesidad de una gran longitud de esta región de pruebas. Sin embargo, por tratarse de un estudio inicial y con miras a poder ser realizado experimentalmente, se optó por definir una longitud de 3 m.

Finalmente, fue definida una tercera zona, denominada región de salida. Como en el caso de la región de entrada, esta apenas es requerida para dar estabilidad al cálculo de las celdas ubicadas en la sección final de la región de pruebas, evitando inconsistencias en las ecuaciones de conservación de la masa y energía, por lo cual fue adoptada la misma longitud: 30 cm. La Fig. 3.20 muestra, esquemáticamente, las consideraciones tomadas hasta aquí para la definición de la geometría.

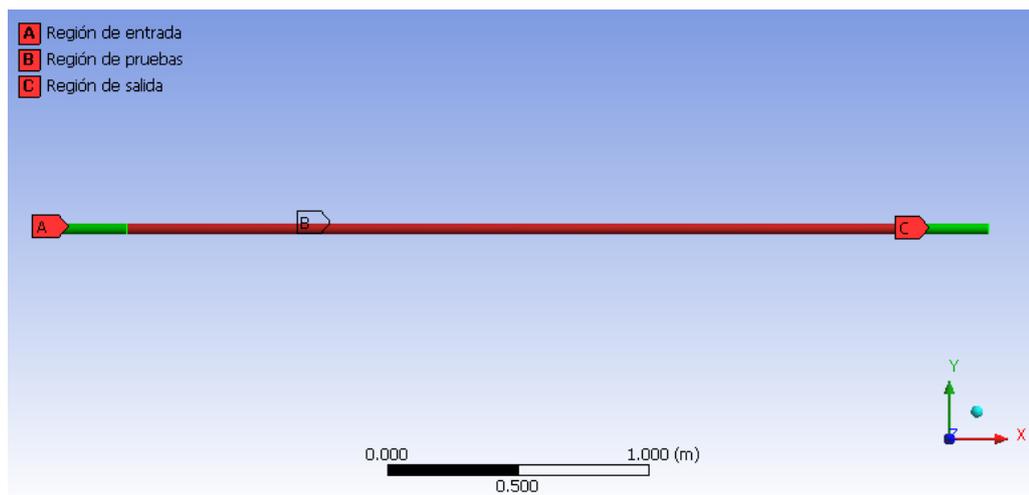


Figura 3.20. Vista esquemática de la geometría del problema.

Usando el programa *DesignModeler*®, parte del paquete de *ANSYS 12*®, fue dibujado un rectángulo de las dimensiones descritas anteriormente: 3,6 m de longitud y 0,01 m de ancho. Cabe recordar que este rectángulo representa media sección transversal del total de la tubería, que luego será reflejada por la condición de axisimetría. En este mismo programa, se deberá dividir el rectángulo creado en las tres zonas previamente definidas. *DesignModeler*® permite seleccionar y dar nombres a geometrías específicas para identificarlas (puntos, aristas, caras, etc.) como pudo ser observado en la Fig. 3.20.

3.5.2. Generación de la malla numérica

Con la geometría lista, el paso siguiente fue crear la malla numérica. Por sus características, la geometría del problema permite adoptar una malla de tipo estructurada, con celdas uniformes en el sentido axial, cuando menos.

Para la generación de la malla, fue usada la herramienta *Meshing*® del propio *ANSYS*®. Dada la axisimetría del problema, la malla sugerida fue considerada uniforme en el sentido longitudinal y con un refinamiento de celdas en el sentido radial (ver Maïga et al., 2004; Bianco et al., 2009). Estas consideraciones se hicieron con base en la naturaleza del fenómeno estudiado. Las regiones de entrada y salida poseen, en el sentido axial, un menor número de celdas que la región de pruebas debido a que no fueron de primordial interés para el estudio. En la dirección radial, y con la previsión de capturar los gradientes de temperatura debidos a la capa límite formada al interior del tubo, se adoptó un refinamiento de la malla en las proximidades de la pared del tubo.

En este punto, cabe resaltar que el número de divisiones en el sentido axial de cada región, así como el número de divisiones en el sentido radial, fue definido a través de múltiples pruebas para obtener un balance entre el costo computacional y

la precisión de los resultados. Los detalles sobre el número de divisiones definido para cada región son presentados en la Tab. 3.8.

Tabla 3.8. División del dominio para la generación de la malla numérica

Región	Divisiones	
	Axial	Radial
Entrada	30	30
Pruebas	200	30
Salida	30	30

Con la configuración de la malla definida, y con uso de *Meshing*®, se procedió a generar la malla numérica, que tuvo finalmente 7800 celdas para el cálculo. La Fig. 3.21 muestra un detalle de la región de entrada y la región de pruebas, donde se aprecia el refinamiento realizado en las proximidades de la pared del tubo.

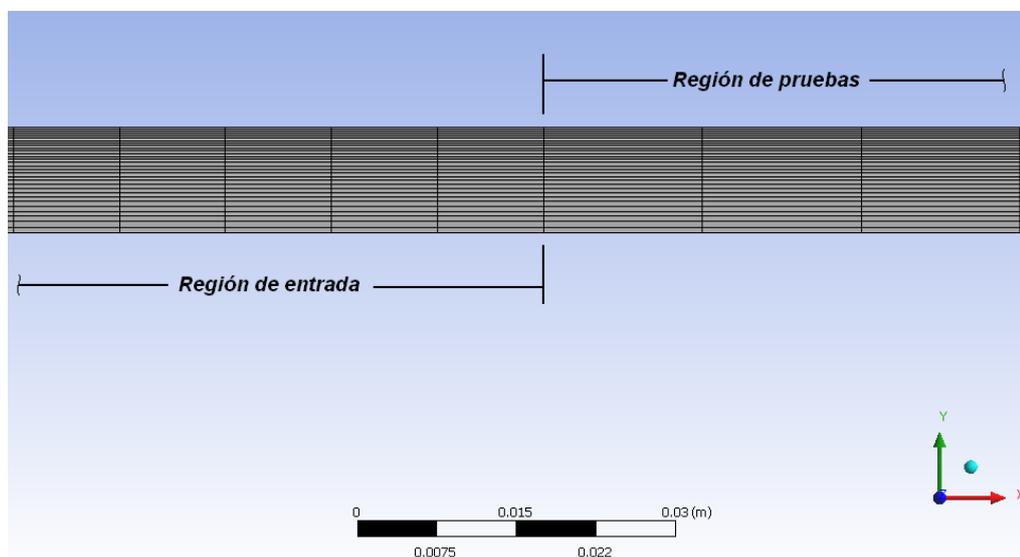


Figura 3.21. Vista del detalle del refinamiento de malla en la pared del tubo.

3.5.3. Configuración del problema físico en régimen laminar

Entendemos por configuración del problema a la definición de los parámetros físicos que lo enmarcan, tales como: materiales, modelos físicos

usados y condiciones de contorno. Además de ello, se establecen criterios de convergencia para el cálculo numérico del problema y parámetros de monitoreo para cada variable analizada.

Todos estos aspectos fueron establecidos en el elemento C2 (SETUP) del bloque *FLUENT®* mostrado en la Fig. 3.19. Una vez iniciado el programa *FLUENT®*, y tras ser definidas las condiciones generales del problema (bidimensional y precisión del cálculo), se aprecian todas las opciones de configuración que permite *FLUENT®*, mostradas en la Fig. 3.22.

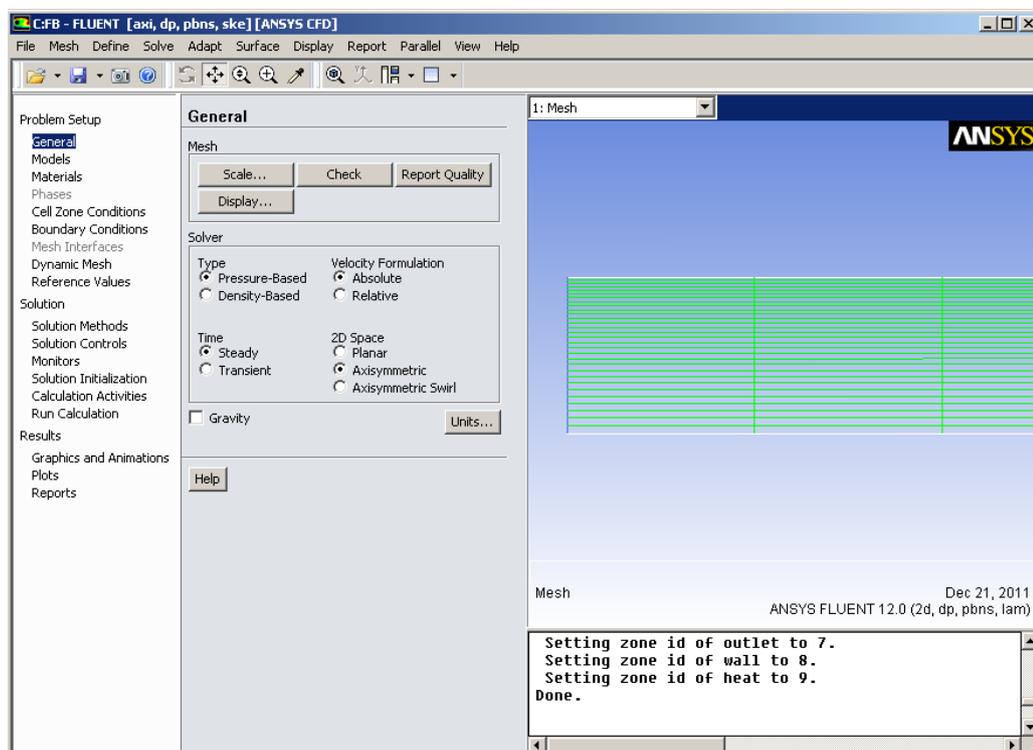


Figura 3.22. Vista de la ventana principal de FLUENT®.

La malla es importada automáticamente, con la posibilidad de ser mejorada según sea requerido. *FLUENT®* divide la resolución del problema en tres etapas: Configuración del problema (*Problem Setup*), Solución (*Solution*) y Resultados (*Results*); cada una con diversas opciones.

Así, en la primera etapa (Configuración del Problema), tenemos el establecimiento de condiciones generales para el cálculo (General): tipo de análisis realizado, formulación de la velocidad, régimen temporal de la simulación, gravedad, entre otros. Estas opciones son apreciadas en detalle en la Fig. 3.23.

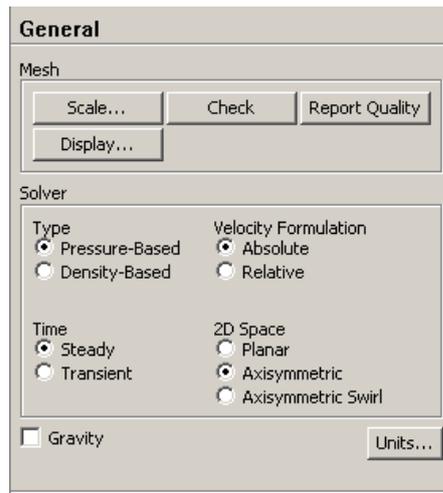


Figura 3.23. Opciones generales para la definición de la simulación.

Aún en la primera etapa podemos seleccionar los modelos matemáticos que serán implementados para el cálculo numérico de la simulación. Para el caso en estudio, fue necesario definir el tipo de régimen del flujo (laminar) y activar el uso de la ecuación de energía, como es mostrado en la Fig. 3.24 (a) y (b), respectivamente.

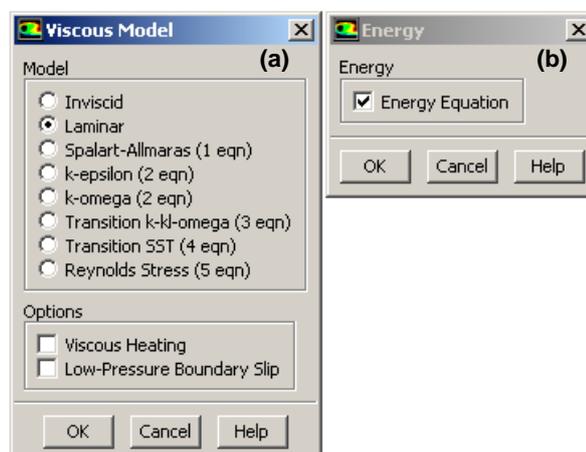


Figura 3.24. Opciones para la definición de modelos empleados en la simulación.

La siguiente fase de la configuración del problema fue la asignación del material fluido a ser analizado. En esta etapa, fue creada una biblioteca de los nanofluidos con las propiedades necesarias para el cálculo de las simulaciones. Dichas propiedades fueron tomadas del banco de datos mostrado en la Tab. 3.7 de este capítulo. La biblioteca de propiedades sigue el criterio de denominación descrito para los identificadores, como puede ser apreciado en la Fig. 3.25.

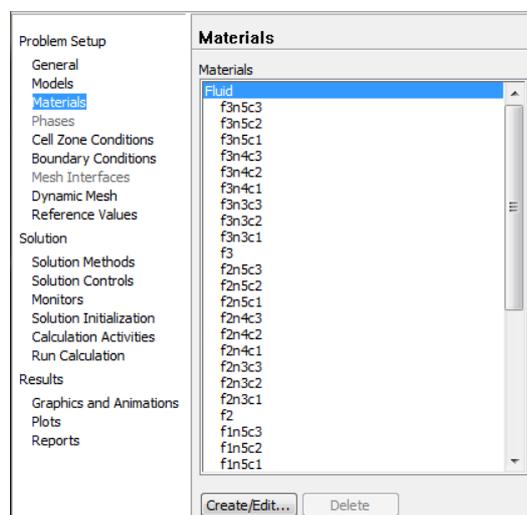


Figura 3.25. Biblioteca de propiedades de los nanofluidos preparados.

Lo siguiente a realizar fue la definición de las condiciones de contorno del problema. En este caso, fueron establecidos cinco tipos de condición de contorno, mostradas en la Tab. 3.9. Como se aprecia, la velocidad de entrada fue considerada como variable independiente de la simulación, calculada a partir del valor del número de Reynolds (Re).

Tabla 3.9. Condiciones de contorno sobre el dominio del fluido en régimen laminar.

REGIÓN	CONDICIÓN	OBSERVACIÓN
Entrada	Perfil parabólico de velocidad	Valor a partir del Re
Salida	Presión uniforme	Relativa con el ambiente
Pared_entrada	Pared	Lisa, sin deslizamiento, adiabática
Pared_salida	Pared	Lisa, sin deslizamiento, adiabática
Pared_pruebas	Pared	Lisa, con flujo de calor constante
Línea_central	Eje de axisimetría	Línea central del tubo

Siendo que el parámetro patrón para la comparación del comportamiento de cada flujo de nanofluidos es el número de Reynolds, las velocidades de entrada serán definidas a partir de este, variando en cada caso por causa de las propiedades modificadas del nanofluido. De ese modo, para un flujo de agua con $Re = 500$, el valor de la velocidad axial media será $u_m = 0,0223 \text{ m/s}$. La condición de contorno en esta región es complementada con la información de la temperatura, $T_e = 25^\circ\text{C}$ ($298,15\text{K}$) para todos los casos. La presión relativa en la salida es establecida en cero, pues para el análisis no será necesario el valor exacto de la presión en este punto, sino la diferencia de presiones producida por el flujo del nanofluido. Las condiciones de pared de las regiones de entrada y salida son consideradas de no-deslizamiento y con superficie lisa. En la región de pruebas la pared también es considerada lisa, pero con una condición de entrada de flujo de calor constante, que ingresa a través de ella hacia el nanofluido (igual a 5000 W/m^2).

Una vez que todas las condiciones de contorno fueron establecidas, y dentro de la categoría Solución (*Solution*) puede seleccionarse entre diferentes métodos de solución (*Solution Methods*) según la necesidad de cálculo y las condiciones a las que esté sometido el problema. La bibliografía especializada recomienda que para problemas de baja complejidad se use el tipo de esquema SIMPLE, con discretización espacial de segundo orden (ver Maïga et al., 2004; Fluent User's Guide, 2006).

A continuación, pueden definirse algunos criterios de parada para la simulación, como el número de iteraciones o mediante un valor crítico para el residual de cada variable (por ejemplo, el error cuadrático medio). Estos parámetros son definidos en las opciones de monitoreo de residuales (*Monitors* → *Residuals*) de la categoría Solución en FLUENT®.

Luego, deben inicializarse las variables en todo el dominio para comenzar con el cálculo. En la opción Inicialización de solución (*Solution initialization*) se especifica cuál condición de contorno será utilizada para tal fin. Para el caso en estudio, la inicialización del dominio fue a partir de la velocidad de entrada. Concluido este paso, ya es posible iniciar el cálculo del problema (*Run Calculation*), donde se pueden definir el número de iteraciones, intervalo de reportes, entre otras opciones.

Los resultados de la simulación son almacenados en archivos de caso generados por *FLUENT®*. Estos datos pueden ser procesados en el propio programa, para la construcción de tablas y gráficos que muestren el comportamiento de las variables estudiadas, o importadas a otro programa patrón de *ANSYS®: CFD-Post*. En el presente trabajo, se optó por el segundo programa, por la facilidad de creación de lugares geométricos para la captura de datos y la óptima presentación de figuras y gráficos. Por ejemplo, en la Fig. 3.26 se observa un gráfico del campo de velocidades para todo el dominio del fluido. En este caso, la escala en el sentido radial fue modificada para una mejor visualización del fenómeno.

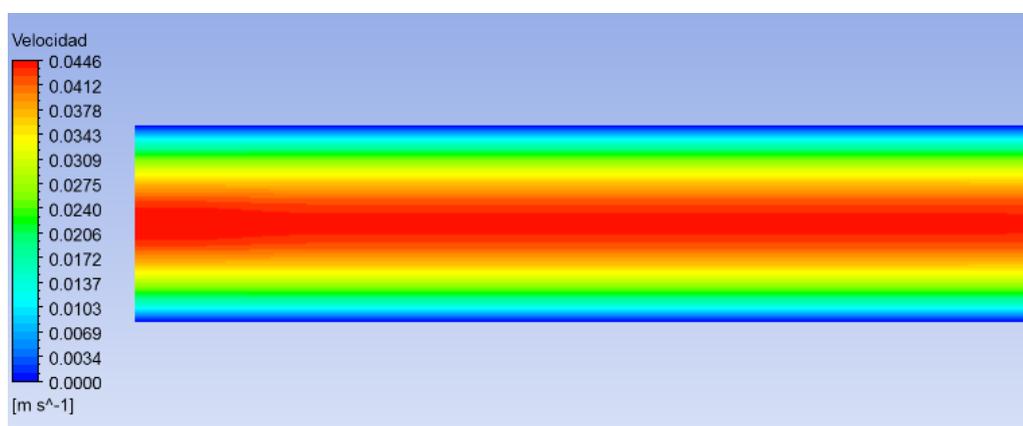


Figura 3.26. Campo de velocidades impuesto en el dominio del fluido.

Del mismo modo, puede ser visto el campo de temperaturas, como es mostrado en la Fig. 3.27, que tiene la escala en el eje 'y' aumentada para su mejor visualización. Se observa que el valor máximo de temperatura es alcanzado poco antes del final del dominio definido. La sección final con la menor temperatura corresponde a la región de salida definida anteriormente.

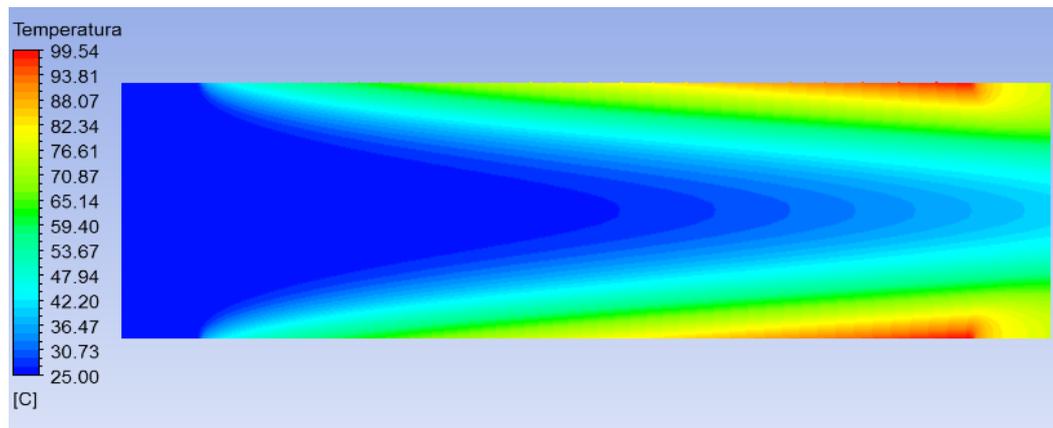


Figura 3.27. Campo de temperaturas resultado del flujo de calor a través de la pared.

Una de las utilidades del *CFD-Post* permite crear gráficos basados en los resultados calculados para una posición determinada. Así, por ejemplo, es posible crear líneas que coincidan con el eje de la tubería y las proximidades de la pared del tubo, y graficar los valores de temperatura sobre estos lugares geométricos en particular. En la sección *Report*, es insertado un nuevo gráfico (*Chart*), con el nombre de 'Temperatura vs. Posición x'. En las opciones del gráfico se seleccionan los lugares geométricos 'Línea Central' y 'Pared' (creados previamente) y se definen las variables para los ejes 'x' e 'y' como X (coordenadas longitudinales) y Temperatura, respectivamente. El resultado es mostrado en la Fig. 3.28.

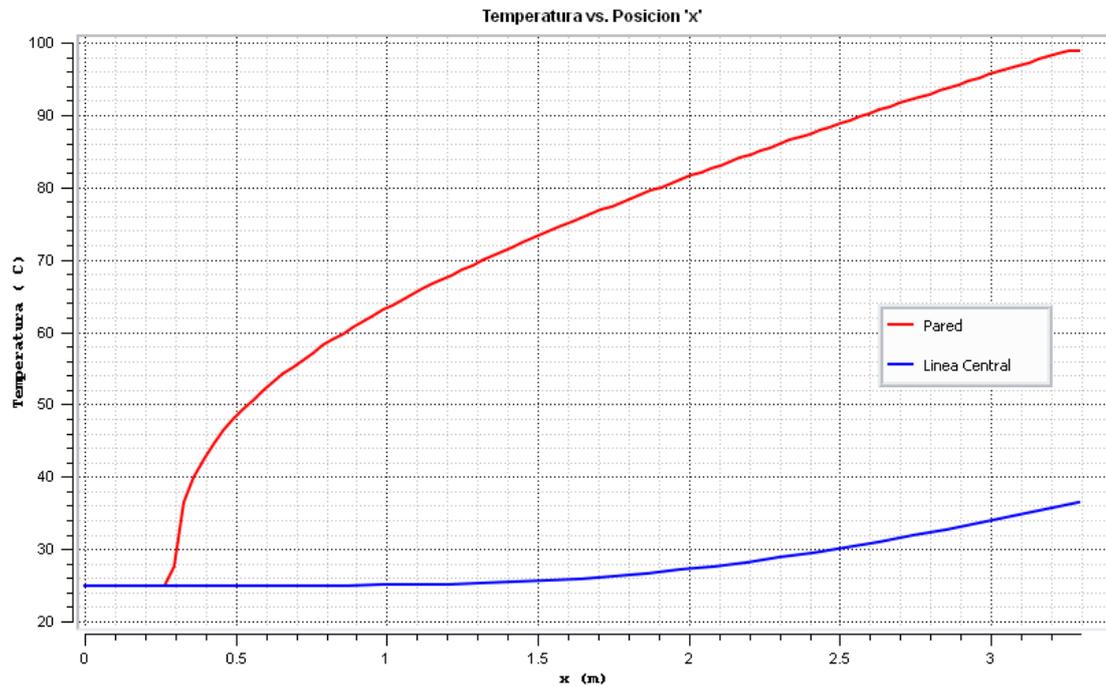


Figura 3.28. Gráfico de temperaturas en dos lugares geométricos usando CFD-Post.

De la figura anterior, se verifica parcialmente el comportamiento descrito en la sub sección 2.5.3 (ver Fig. 2.13). Cabe destacar que, en este caso, fue mostrado el comportamiento de la temperatura sobre la línea central del dominio del fluido, y no la temperatura media del mismo.

De esta forma, a través de la creación de geometrías auxiliares, pueden ser obtenidas las temperaturas medias del fluido en secciones determinadas (las cuales serán previamente definidas). Siendo la sección de pruebas la de mayor interés (la región calentada de la tubería), en el presente trabajo fueron creadas 31 secciones transversales de captura de datos (una cada diez centímetros), representadas esquemáticamente en la Fig. 3.29 mediante círculos de color verde.

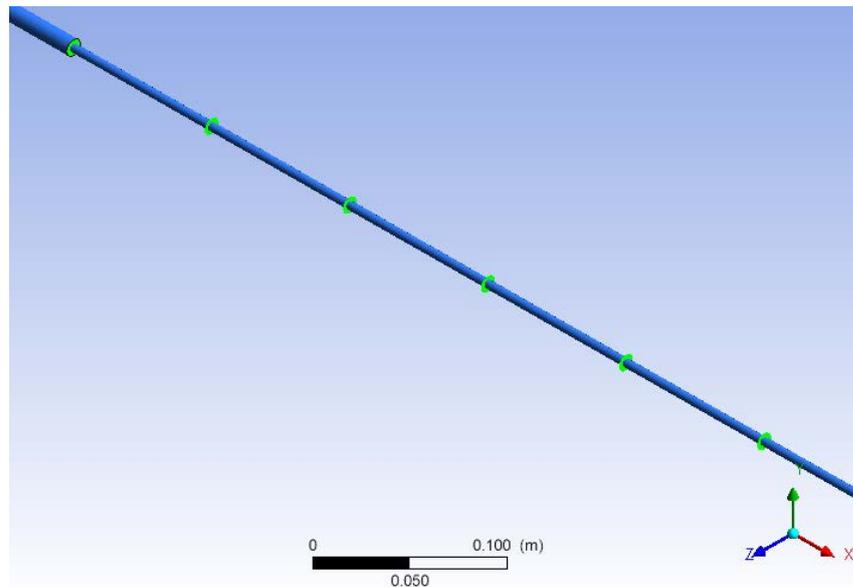


Figura 3.29. Vista esquemática de la posición de las secciones de control.

Con todos los valores capturados de los campos de velocidad, temperatura y presión calculados para los fluidos base, el paso siguiente es simular el flujo de cada uno de los nanofluidos 'preparados'. En ese sentido, es extremadamente útil la capacidad de Workbench® para trabajar de forma modular, pues la mayoría de las condiciones permanecen inalteradas. Apenas son necesarias las actualizaciones del material usado (nanofluido) y las condiciones de velocidad de entrada y flujo de calor en la pared. Los resultados obtenidos para cada nanofluido serán procesados mediante las ecuaciones y correlaciones dadas en la sección 2.6 para conseguir las intensificaciones de la transferencia de calor según las condiciones establecidas hasta aquí.

3.5.4. Configuración del problema físico en régimen turbulento

Para el caso de las simulaciones en régimen turbulento, también fue utilizado el programa *FLUENT*®. Esto, debido a su mayor robustez en problemas de este tipo. Se mantuvo la geometría del problema, así como la malla generada

para los casos simulados en régimen laminar. Las regiones para las condiciones de contorno también permanecieron como fueron definidas anteriormente (ver Tab. 3.10).

Tabla 3.10. Condiciones de contorno sobre el dominio del fluido en régimen turbulento.

REGIÓN	CONDICIÓN	OBSERVACIÓN
Entrada	Perfil parabólico de velocidad	<i>Valor a partir del Re</i>
Salida	Presión uniforme	<i>Relativa con el ambiente</i>
Pared_entrada	Pared	<i>Lisa, sin deslizamiento, adiabática</i>
Pared_salida	Pared	<i>Lisa, sin deslizamiento, adiabática</i>
Pared_pruebas	Pared	<i>Lisa, con flujo de calor constante</i>
Línea_central	Eje de axisimetría	<i>Línea central del tubo</i>

En este caso, para simular el flujo de nanofluido en régimen turbulento, fue seleccionado el modelo de turbulencia semi-empírico $k - \varepsilon$, que considera la energía cinética contenida en las fluctuaciones (k) e la tasa de disipación de energía en calor (ε). Este modelo, además de ser el sugerido para problemas de baja complejidad por la Guía del Usuario de FLUENT® (Fluent Inc., 2006), ha sido reportado en múltiples investigaciones computacionales; entre ellos, los trabajos de Maiga et al. (2004) y Bianco et al. (2009). Mayores detalles sobre este modelo pueden ser encontrados en Lauder y Spalding (1972).

Para el condicionamiento de la velocidad de entrada, además del valor de esta, es necesario proporcionar los valores de la Intensidad de Turbulencia (I), dado por la Ec. (3.10), y de la Longitud de Escala de Turbulencia (l), dado por la Ec. (3.11).

$$I = \frac{u'}{u_{\text{media}}} = 0,16(Re_D)^{-1/8} \quad (3.10)$$

$$l = 0,07D \quad (3.11)$$

Donde u' es la velocidad fluctuante característica de la turbulencia.

En el primer caso, para el valor de $Re = 10000$, la intensidad de turbulencia calculada fue 0,0506, y para $Re = 20000$, fue 0,0464. Estos valores son próximos al sugerido por la propia guía de usuario de *FLUENT*® (5%), el cual fue seleccionado para todas las simulaciones. El valor de la longitud de escala de la turbulencia, calculado a partir de la geometría fue 0,0014. Estos valores fueron introducidos en la ventana de definición de la velocidad de entrada, como es mostrado en la Fig. 3.30.

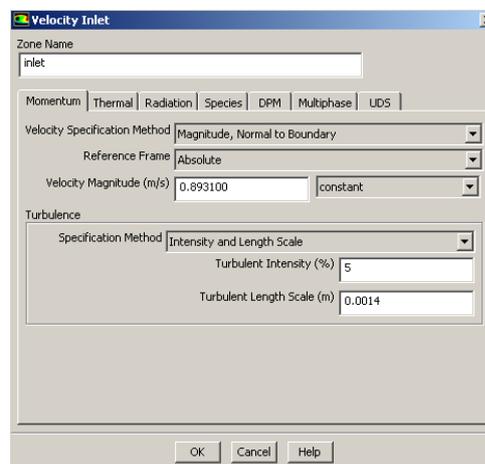


Figura 3.30. Ventana de definición de la velocidad de entrada (régimen turbulento).

Las demás condiciones de contorno fueron definidas de manera similar a lo realizado para el régimen laminar. De ellas, la condición de flujo de calor constante a través de la pared (mostrado en la Fig. 3.31) fue la más importante.

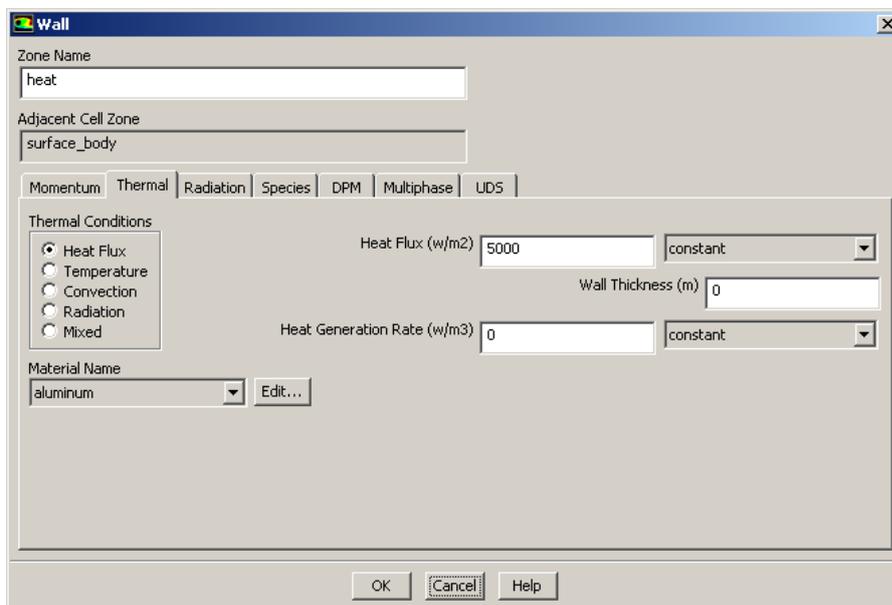


Figura 3.31. Definición del flujo de calor constante (régimen turbulento).

Después de la definición de la velocidad, esta debe volver a ser inicializada como en las simulaciones en régimen laminar. Los resultados fueron visualizados a través de un nuevo bloque Resultados en la ventana principal del *Workbench*®, que tuvo las mismas condiciones mencionadas en la sección anterior.

Finalmente, el bloque correspondiente al análisis mediante FLUENT® será reproducido para cada nanofluido, modificando el valor de la velocidad de entrada para mantener el número de Reynolds constante, y los resultados serán agrupados según el fluido base y la nanopartícula utilizada. La Fig. 3.32 ilustra uno de los archivos creados con la definición completa de todas las simulaciones para un fluido base dado, con el valor del número de Reynolds definido y en régimen turbulento.

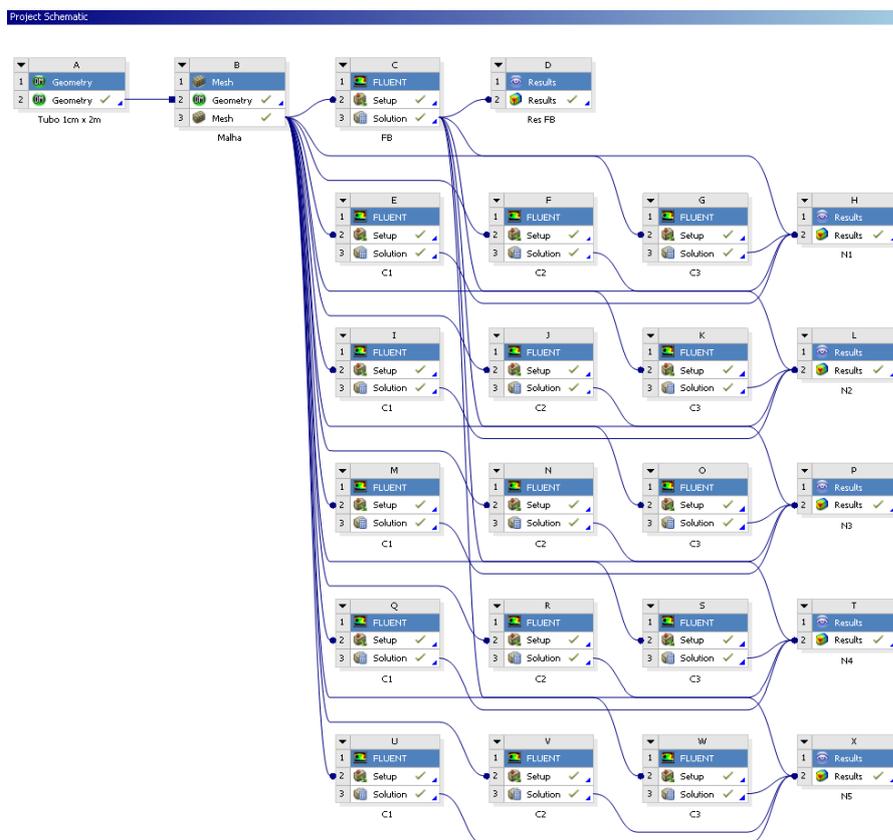


Figura 3.32. Esquema del proyecto para la simulación de los nanofluidos basados en agua, fluyendo en régimen turbulento.

CAPÍTULO IV

Resultados

4.1. Introducción

En este capítulo son presentadas, en primer lugar, las variaciones de las propiedades de los nanofluidos, con el objetivo de mostrar las principales diferencias encontradas debido a la adición de nanopartículas en el fluido base.

De manera semejante, son presentados los resultados obtenidos por medio de la simulación numérica del flujo de nanofluidos. Como fue mencionado en el capítulo anterior, los resultados de la simulación son dados en términos de los campos de velocidad, temperatura y presión en el dominio entero de la geometría del problema. Debido a la gran cantidad de datos obtenidos, son mostrados apenas los casos más representativos y aquellos que contengan alguna información relevante.

Finalmente, son visualizadas las tendencias del coeficiente de transferencia de calor por convección para todos los nanofluidos, agrupados por fluido base.

4.2. Variación de las propiedades

El primer efecto evidenciado en el cálculo de las propiedades modificadas del nanofluido fue la influencia que poseen las propiedades iniciales de ambas fases envueltas en la síntesis del fluido. Este tópico fue desarrollado de manera más general en la sección 3.2 del capítulo anterior. Las variaciones de la masa específica, viscosidad, conductividad térmica y calor específico de los nanofluidos en función de las razones entre las propiedades de la nanopartícula y el fluido base correspondientes son mostradas en las Ecs. (4.1), (4.2), (4.3) y (4.4), respectivamente.

$$\rho_{int} = \frac{\rho_{nf}}{\rho_{fb}} = (1 - \phi_{np}) + \phi_{np}\rho_r \quad (4.1)$$

$$\mu_{int} = \frac{\mu_{nf;Bat.}}{\mu_{fb}} = (1 + 2,5\phi_{np} + 6,5\phi_{np}^2) \quad (4.2)$$

$$k_{int} = \frac{k_{nf;Max.}}{k_{fb}} = \frac{2+k_r+2\phi_{np}(k_r-1)}{2+k_r-\phi_{np}(k_r-1)} \quad (4.3)$$

$$(C_p)_{int} = \frac{(C_p)_{nf}}{(C_p)_{fb}} = \frac{(1-\phi_{np})+\phi_{np}\rho_r(C_p)_r}{(1-\phi_{np})+\phi_{np}\rho_r} \quad (4.4)$$

Por conveniencia, se mantuvo el subíndice *int* para el caso del calor específico, a pesar de disminuir el aumento de la concentración volumétrica de las nanopartículas.

Con base en las anteriores ecuaciones fue generada la Fig. 4.1, que ilustra las tendencias en la variación de propiedades de los nanofluidos compuestos por

agua como fluido base y las diferentes nanopartículas de plata, cobre, hierro, óxido de cobre y óxido de aluminio.

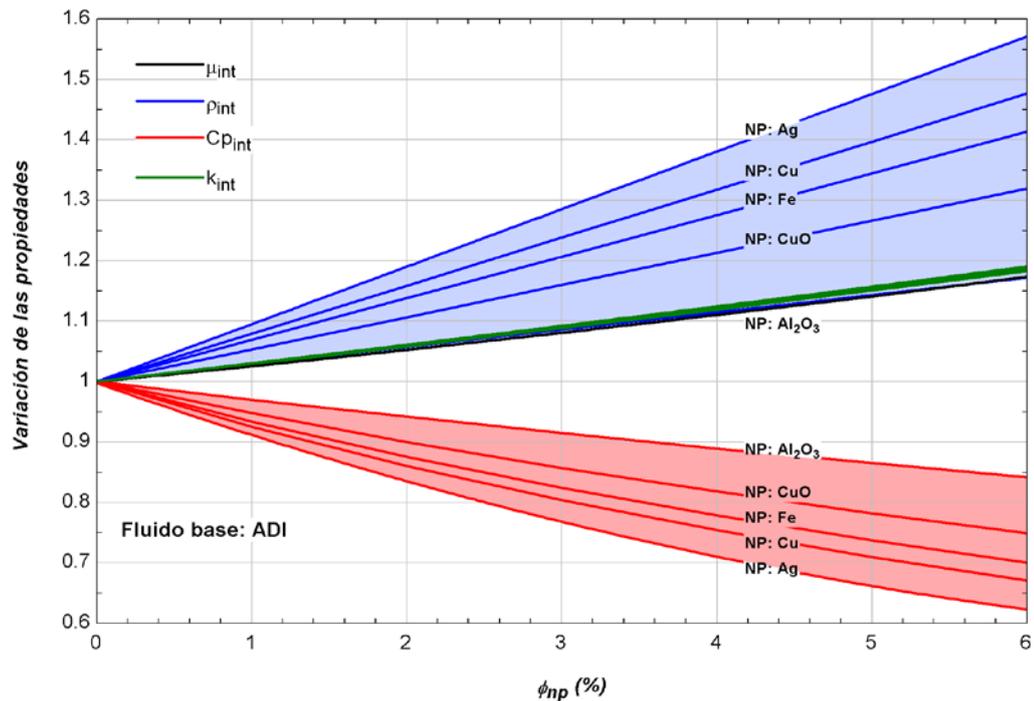


Figura 4.1. Tendencia de las propiedades para los nanofluidos basados en agua, variando con la concentración volumétrica.

En la figura mostrada anteriormente, se puede observar el gran aumento de la masa específica, que alcanza un incremento de más de 50% en el rango de concentraciones utilizada en el presente trabajo (0% – 6%). Lo segundo a destacar es la gran disminución del calor específico, con un valor máximo de casi 40% para el nanofluido de agua como fluido base y nanopartículas dispersas de plata.

La intensificación de la conductividad térmica alcanza un valor máximo de aproximadamente 20%, sin mucha diferencia entre los nanofluidos referidos. Por otro lado, es importante remarcar que la viscosidad presentará siempre la misma tendencia de intensificación por ser una función únicamente de la concentración volumétrica, conforme la Ec. (4.2), con un valor máximo de aproximadamente 20%.

Por esta misma razón, tal tendencia será la misma para todos los demás nanofluidos en estudio.

También se observa que tanto las variaciones de la masa específica como del calor específico son menos pronunciadas en los nanofluidos de nanopartículas de óxidos metálicos, en comparación con aquellos que contienen nanopartículas metálicas dispersas en agua. Las áreas sombreadas muestran la amplitud de los valores de intensificación obtenidos, claramente mayores para la masa y calor específicos.

Otro caso en destaque es el del nanofluido basado en alúmina y agua, que muestra valores de intensificación de la densidad, viscosidad y conductividad térmica próximas entre sí en el rango de concentraciones estudiado, cosa que no ocurre con ninguno de los restantes nanofluidos analizados. La Fig. 4.2 destaca la intersección de las líneas de tendencia de las intensificaciones para el nanofluido basado en agua con nanopartículas de alúmina.

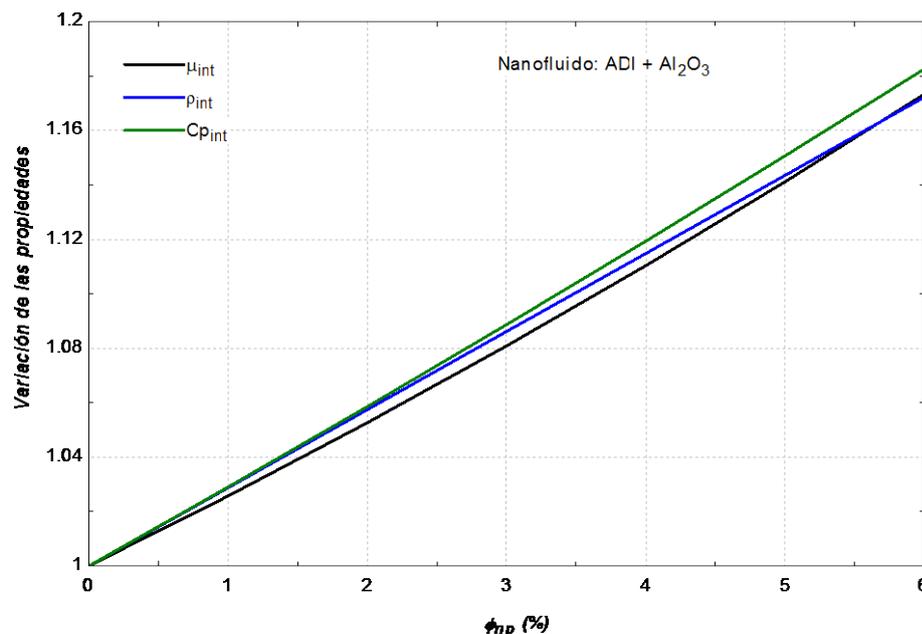


Figura 4.2. Destaque de la tendencia de las propiedades para el nanofluido F1N4, variando con la concentración volumétrica.

Tal intersección indica que para una determinada concentración volumétrica, las intensificaciones de la viscosidad y de la densidad poseen igual valor. Este fenómeno tiene un efecto directo sobre el cálculo de la velocidad de entrada como condición impuesta en la simulación, que será discutido con mayor detalle en la sección 4.3.1.

La Fig. 4.3 muestra las tendencias de la variación de las propiedades para nanofluidos de etileno glicol con nanopartículas de hierro, alúmina y óxido de cobre. Estas tendencias son semejantes a las de los casos de nanofluidos que utilizan nanopartículas metálicas, con excepción de la intensificación de la masa específica del nanofluido con nanopartículas dispersas de alúmina. Esta intensificación es menor que la intensificación de la viscosidad del nanofluido. Este fenómeno, y su consecuencia sobre la velocidad de entrada calculada, también serán discutidos con mayor detalle en la sección 4.3.1.

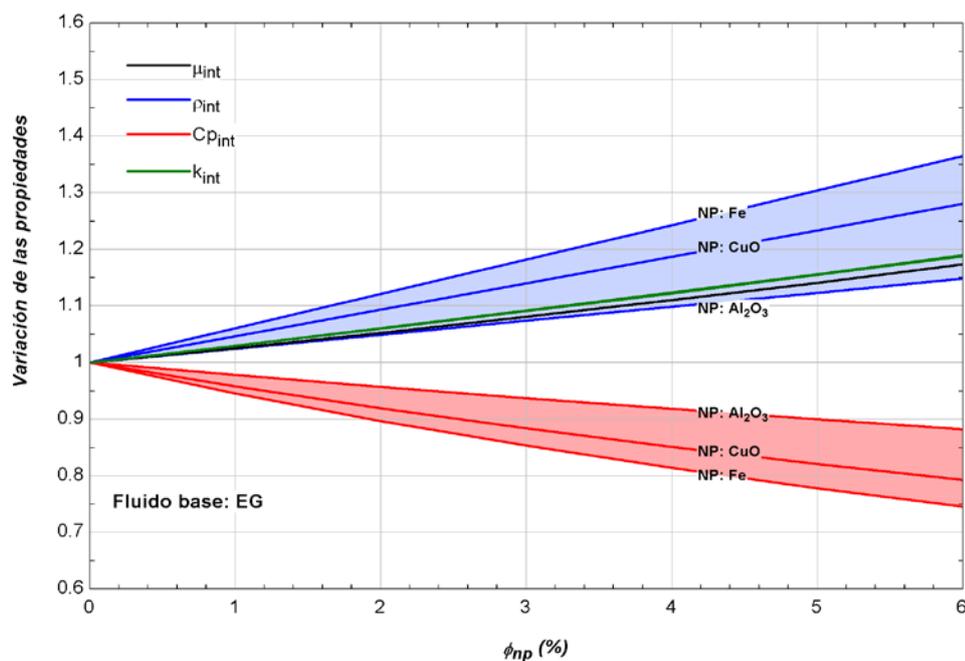


Figura 4.3. Tendencia de las propiedades para los nanofluidos basados en etileno glicol, variando con la concentración volumétrica.

La Fig. 4.4 muestra las tendencias de la variación de las propiedades para nanofluidos de poli-alfa-olefin con nanopartículas de hierro, alúmina y óxido de cobre, respectivamente. En estos casos, las tendencias de variación de las propiedades son semejantes a las de los nanofluidos de agua con nanopartículas metálicas dispersas.

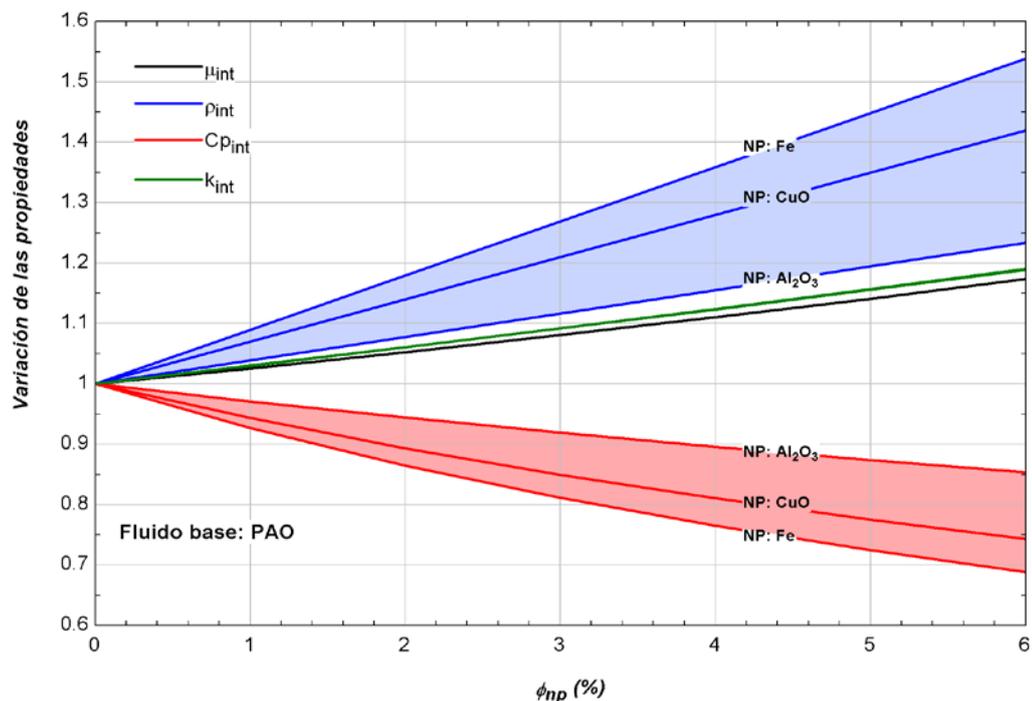


Figura 4.4. Tendencia de las propiedades para los nanofluidos basados en poli-alfa-olefin, variando con la concentración volumétrica.

4.2.1. Variación del número de Prandtl

Otra de las formas para visualizar el efecto de la adición de nanopartículas sobre las propiedades del fluido base se da por intermedio del número de Prandtl, Pr . Por su forma, este es generalmente mostrado como una propiedad de las sustancias en un determinado estado.

Además de eso, el número de Prandtl relaciona tres de cuatro de las propiedades modificadas de los nanofluidos. En este caso, la variación del Pr

permite dar una idea de cuál nanofluido tendrá un mejor comportamiento térmico en relación con el fluido base, pues relaciona la difusividad de momento térmica desarrollada en el flujo. La Fig. 4.5 muestra cómo varía el Pr para todos los nanofluidos estudiados, basados en el cálculo de las propiedades modificadas (ver Tab. 3.7).

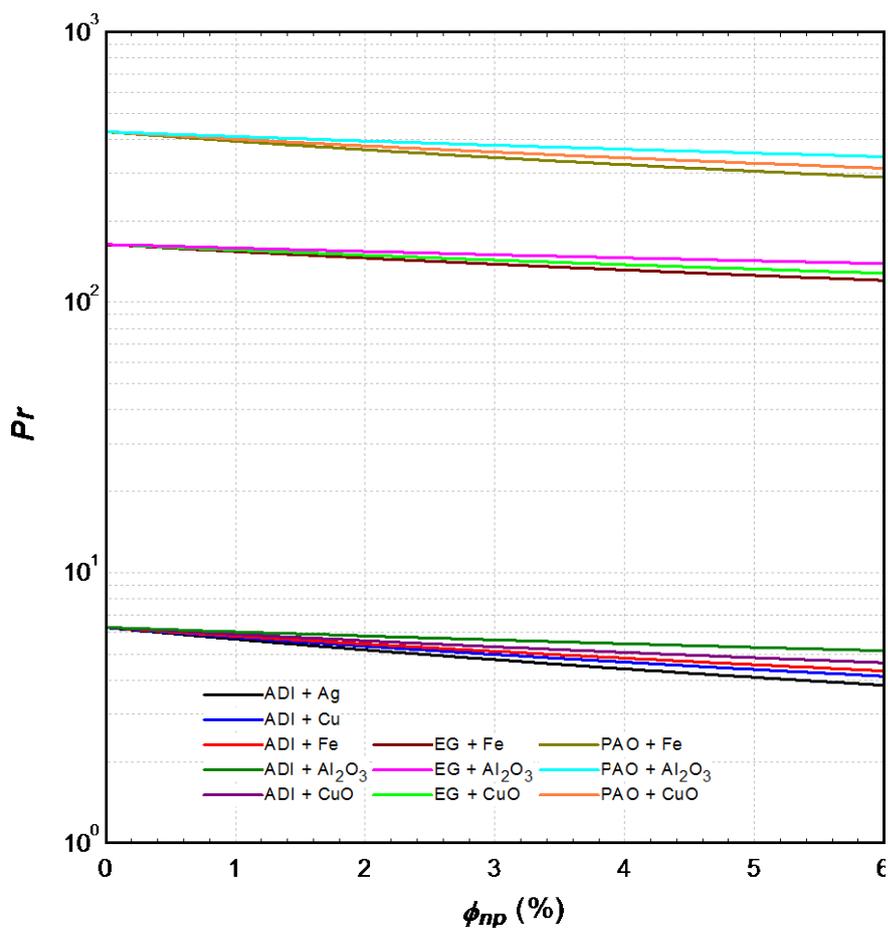


Figura 4.5. Variación del Pr para todos los nanofluidos, variando con la concentración volumétrica.

Las Figs. 4.6, 4.7 y 4.8 muestran las tendencias del número de Prandtl para los nanofluidos basados en agua, etileno glicol y poli-alfa-olefin, respectivamente.

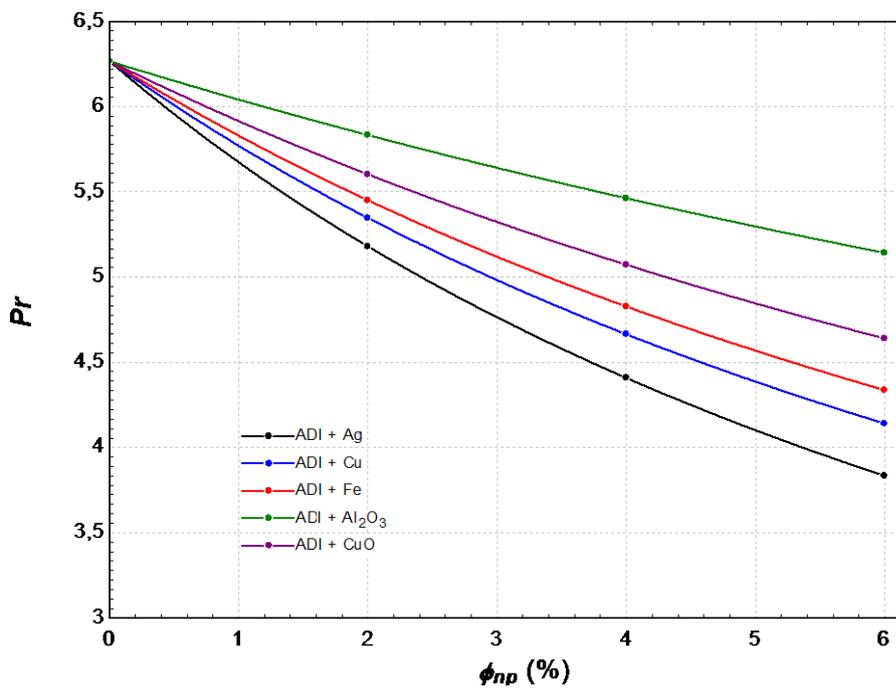


Figura 4.6. Variación del Pr para los nanofluidos basados en agua, variando con la concentración volumétrica.

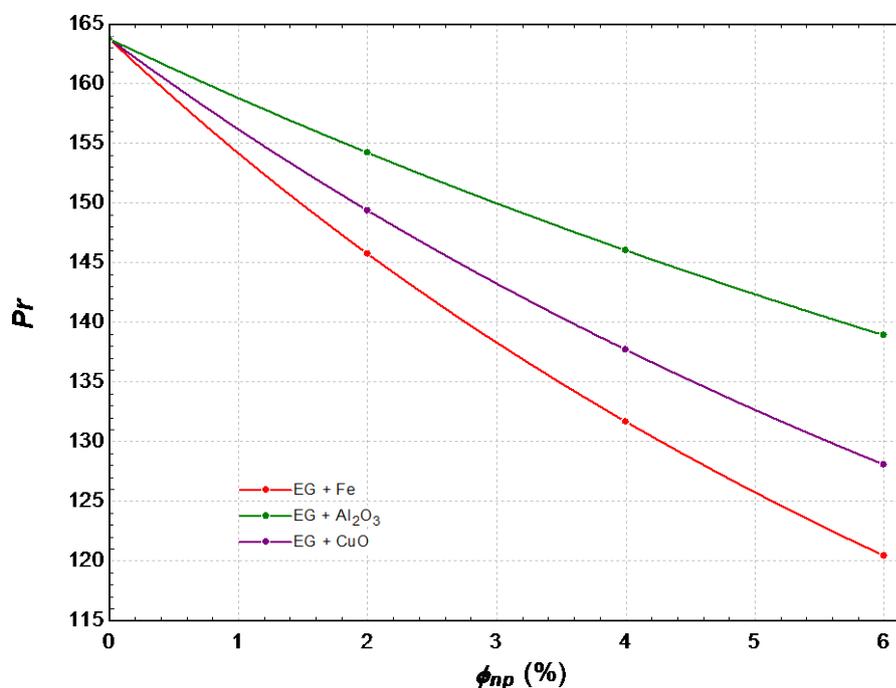


Figura 4.7. Variación del Pr para los nanofluidos basados en etileno glicol, variando con la concentración volumétrica.

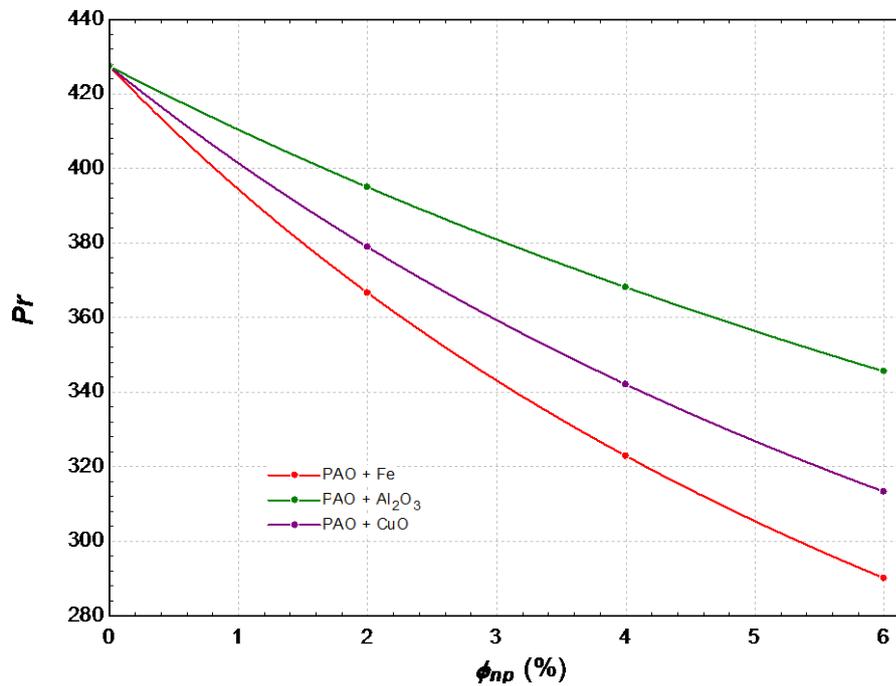


Figura 4.8. Variación del Pr para los nanofluidos basados en poli-alfa-olefin, variando con la concentración volumétrica.

Dado que el número de Prandtl relaciona los efectos de difusión de momento y térmica (conforme lo visto en la Ec. 2.41), es conveniente que este sea cada vez menor, pues indicaría que el aumento de la viscosidad es superado por el efecto combinado de la disminución del calor específico y la intensificación de la conductividad térmica.

De este modo, se tiene la previsión inicial que los nanofluidos compuestos por nanopartículas de plata tendrán el mejor comportamiento térmico entre todos los estudiados, seguido por los basados en cobre, hierro, óxido de cobre y alúmina. Sin embargo, es importante recordar que la masa específica fue obviada en este análisis preliminar.

Otro de los efectos esperados de las variaciones en el número de Prandtl es la disminución de la longitud de entrada térmica en régimen laminar, conforme lo detallado en la sub sección 2.6.4. Según la Ec. (2.50), el comportamiento de la entrada térmica es función del diámetro de la tubería, el número de Reynolds y el

número de Prandtl. Siendo que tanto el diámetro y el Re son valores constantes definidos para cada simulación, la longitud de entrada térmica es función solamente del Pr . De ese modo, y conforme las Figs. 4.6 a 4.8, es esperado que el desarrollo térmico ocurra primero para los nanofluidos con nanopartículas de plata, seguido por aquellos que contienen nanopartículas de cobre, hierro, óxido de cobre y alúmina, en ese orden.

4.3. Desarrollo del flujo de nanofluido

De las simulaciones realizadas, fueron obtenidos los campos de velocidad, temperatura y presión en el dominio de la tubería estudiada para cada caso. Cuando son comparados, estos resultados muestran la variación en los comportamientos hidrodinámico y térmico del flujo, los cuales son objeto de estudio en este trabajo.

4.3.1. Comportamiento hidrodinámico en régimen laminar

El comportamiento hidrodinámico del flujo de nanofluido es descrito por el perfil de velocidad en la región plenamente desarrollada. Sin embargo, y con el objetivo de reducir el costo computacional en el presente trabajo (ver sección 3.4), los perfiles de velocidad fueron condiciones de entrada impuestas mediante el uso de funciones apropiadas para el solucionador *FLUENT®*, y se mantuvieron constantes en todo el dominio de estudio. No obstante, fue observado un comportamiento interesante para el caso de los nanofluidos que utilizan nanopartículas de alúmina, el cual será comentado en breve.

Los perfiles de velocidad para los nanofluidos F1N1, F1N2, F1N3 y F1N5 en régimen laminar mostraron un comportamiento semejante, que es ilustrado en la Fig. 4.9, que es el caso del nanofluido de nanopartículas de plata dispersas en agua (F1N1) fluyendo para un valor de $Re = 500$.

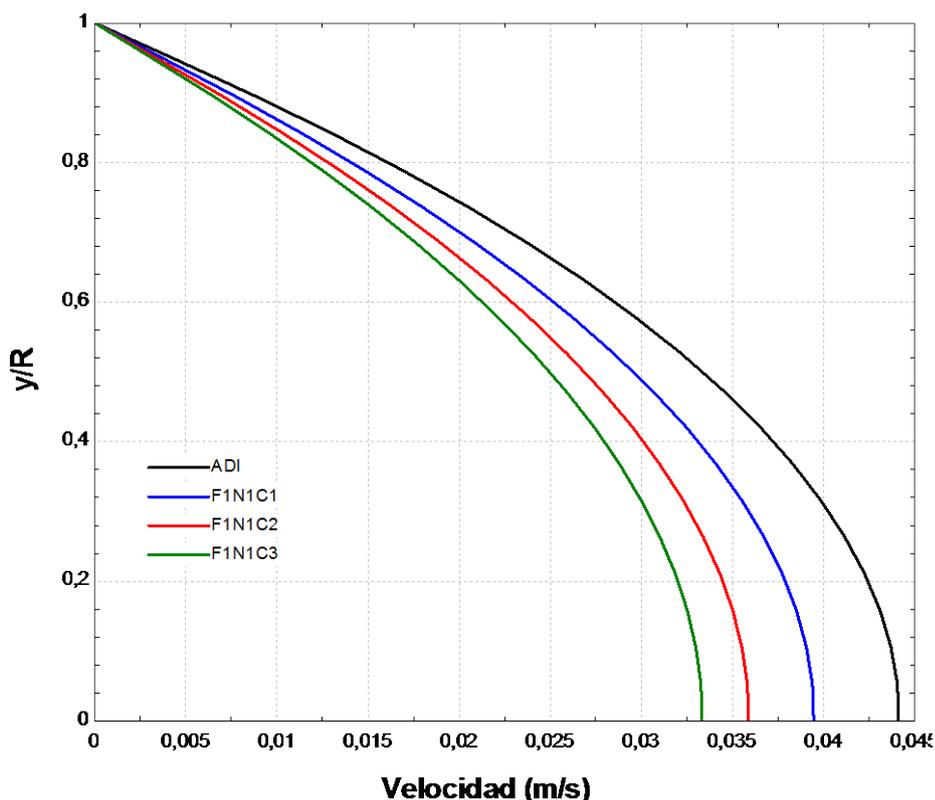


Figura 4.9. Perfil de velocidad para el nanofluido F1N1 ($Re = 500$)

Bajo la misma condición ($Re = 500$), el nanofluido compuesto por nanopartículas de alúmina dispersas en agua (F1N4) muestra el comportamiento ilustrando en la Fig. 4.10. En este caso particular, se muestra en destaque la cercanía entre los valores de velocidad obtenidas con el nanofluido que contiene nanopartículas de alúmina, como fue advertido en la sección 4.2.

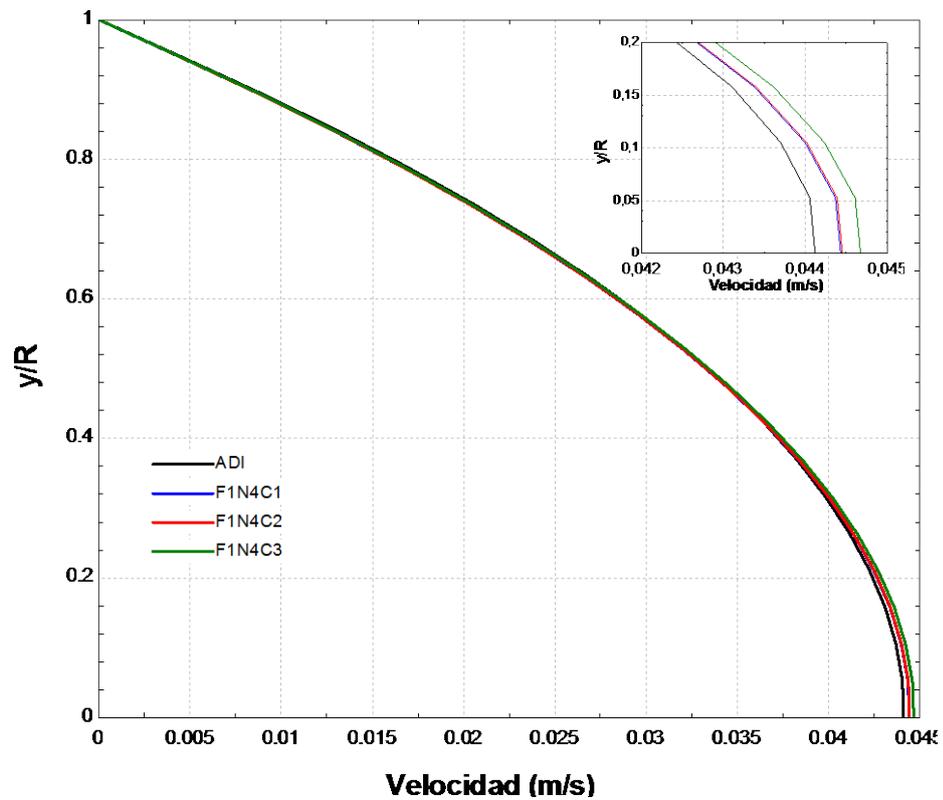


Figura 4.10. Perfil de velocidad para el nanofluido F1N4 ($Re = 500$).

Comportamientos similares fueron evidenciados para los demás fluidos base. De ese modo, para los nanofluidos basados en etileno glicol, los perfiles de velocidad en régimen laminar de los nanofluidos que contienen nanopartículas de hierro (F2N3) y óxido de cobre (F2N5) mostraron una tendencia semejante. Este comportamiento puede ser observado en la Fig. 4.11, que es el caso del nanofluido F2N3 con $Re = 500$.

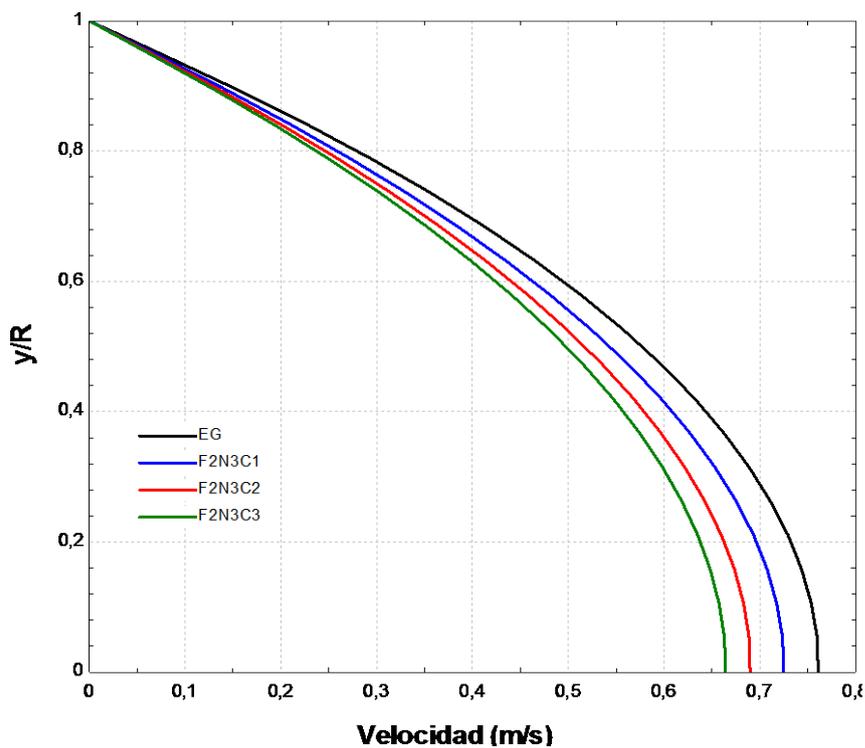


Figura 4.11. Perfil de velocidad para el nanofluido F2N3 ($Re = 500$).

El caso del nanofluido F2N4 bajo la misma condición dinámica ($Re = 500$) es ilustrado en la Fig. 4.12.

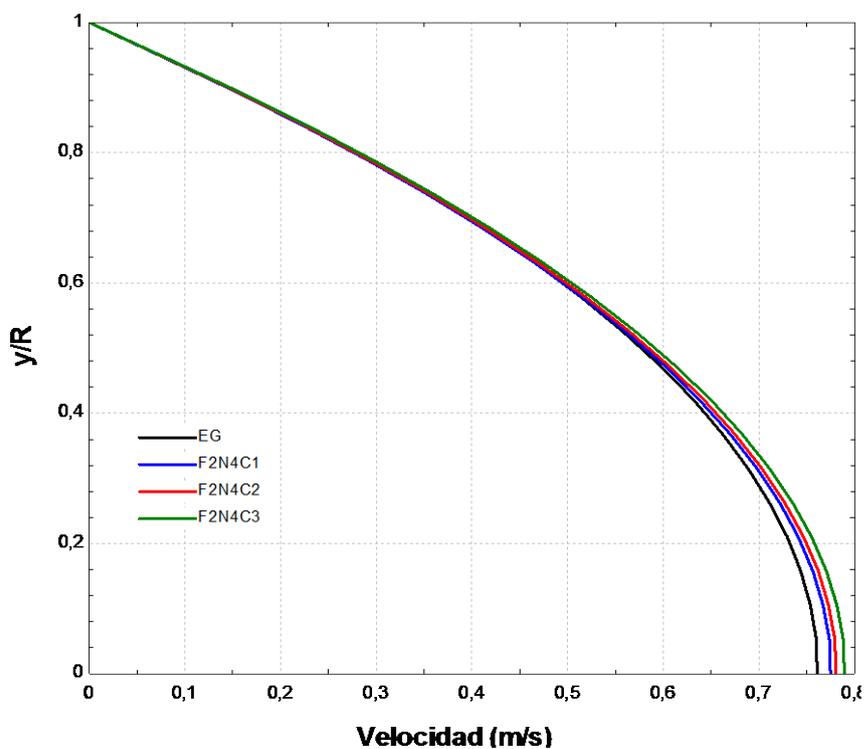


Figura 4.12. Perfil de velocidad para el nanofluido F2N4 ($Re = 100$).

Para los nanofluidos basados en poli-alfa-olefín, aquellos que contienen nanopartículas de hierro (F3N3) y óxido de cobre (F3N5) presentan un perfil de velocidad con la misma tendencia en régimen laminar, que es ilustrado para el caso de $Re = 500$ en las Figs. 4.13 y 4.14, respectivamente.

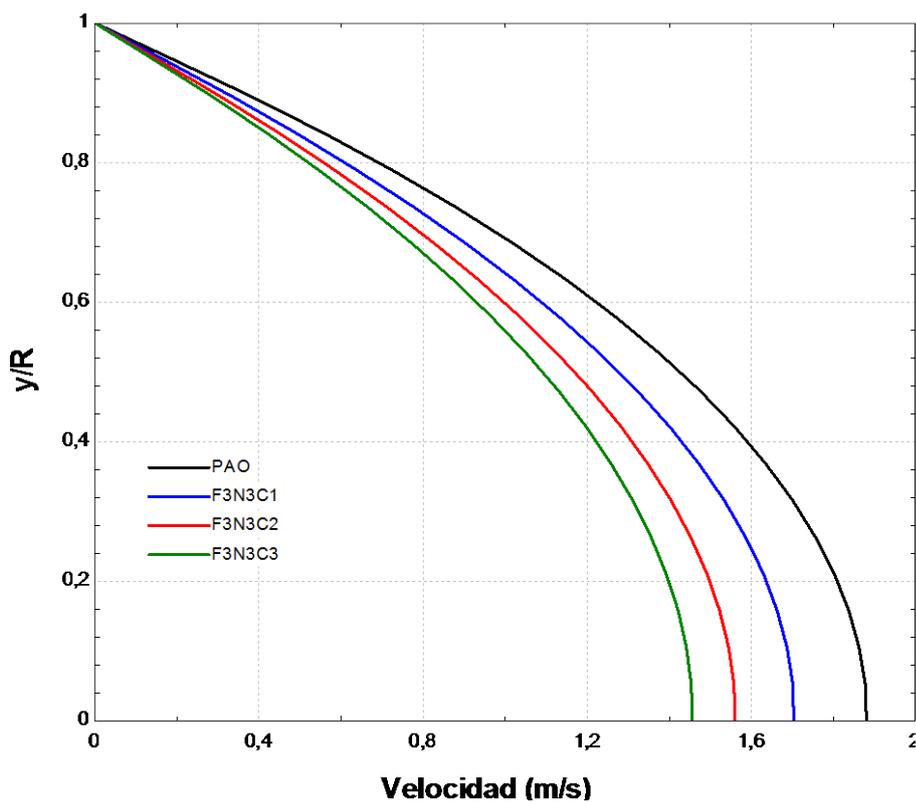


Figura 4.13. Perfil de velocidad para el nanofluido F3N3 ($Re = 500$).

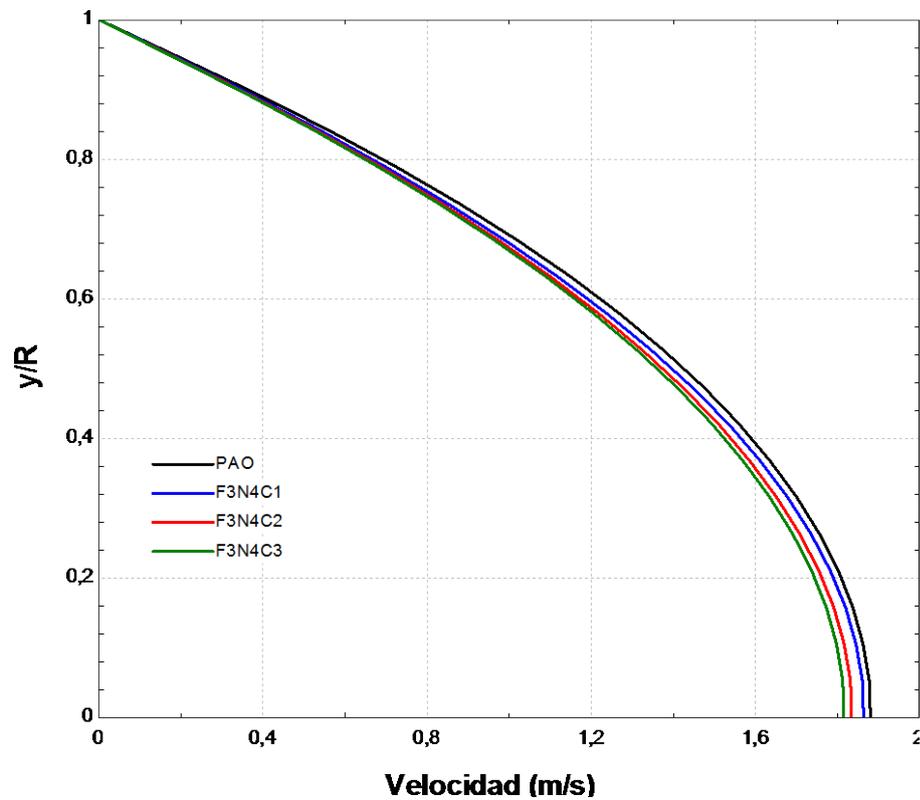


Figura 4.14. Perfil de velocidad para el nanofluido F3N4 ($Re = 500$).

Como era esperado, también varían los perfiles de velocidad en régimen turbulento. Nuevamente, todos los nanofluidos siguieron la misma tendencia de variación de la velocidad, a excepción de aquellos que contenían nanopartículas de alúmina dispersas en agua (F1N4).

A continuación son mostrados los perfiles de velocidad del flujo bajo la condición de $Re = 10000$ para algunos nanofluidos basados en agua (F1), para los nanofluidos basados en etileno glicol (F2) y para los nanofluidos basados en poli-alfa-olefín (F3) en las Figs. 4.15, 4.16 y 4.17, respectivamente.

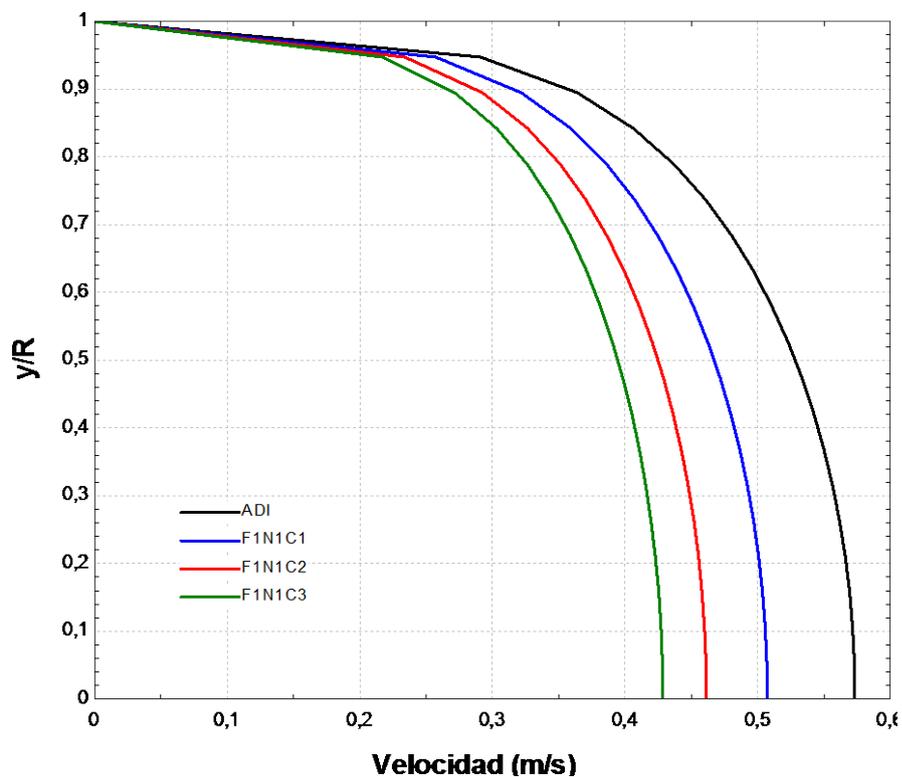


Figura 4.15. Perfil de velocidad para el nanofluido F1N1 ($Re = 10000$)

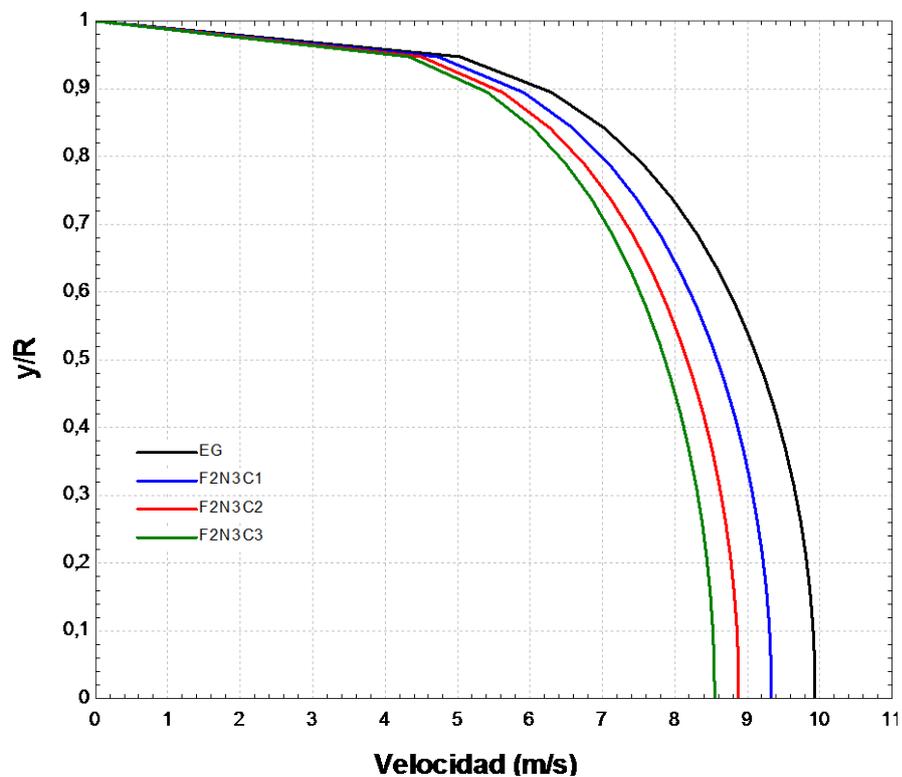


Figura 4.16. Perfil de velocidad para el nanofluido F2N3 ($Re = 10000$)

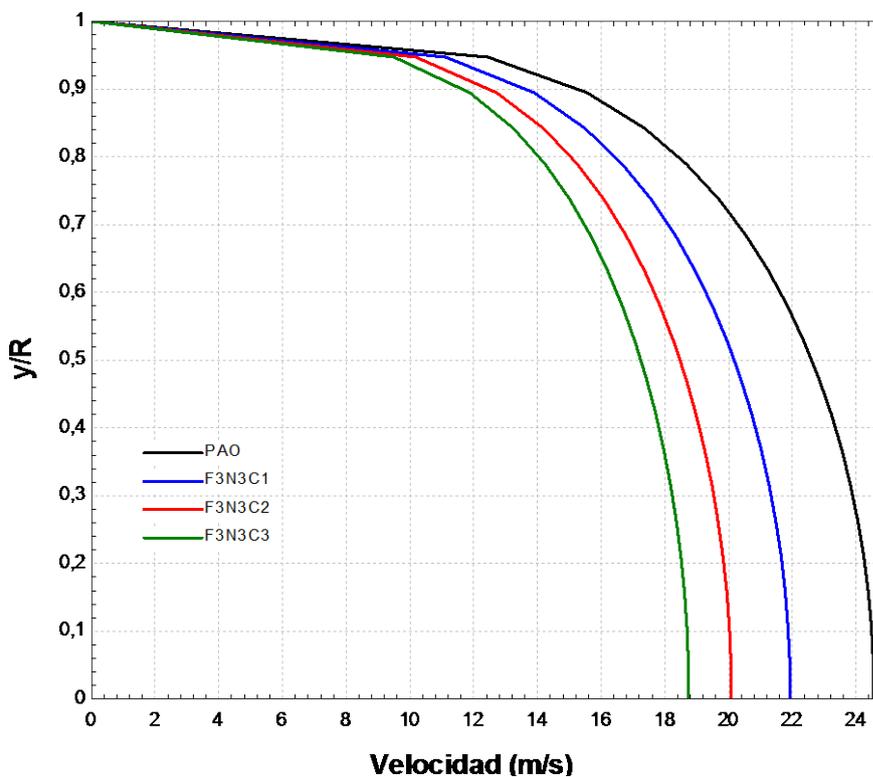


Figura 4.17. Perfil de velocidad para el nanofluido F3N3 ($Re = 10000$)

Los perfiles de velocidad en régimen turbulento para los casos de los nanofluidos que contienen nanopartículas de alúmina dispersas en agua, etileno glicol y poli-alfa-olefín son mostrados en las Figs. 4.18, 4.19 y 4.20, respectivamente.

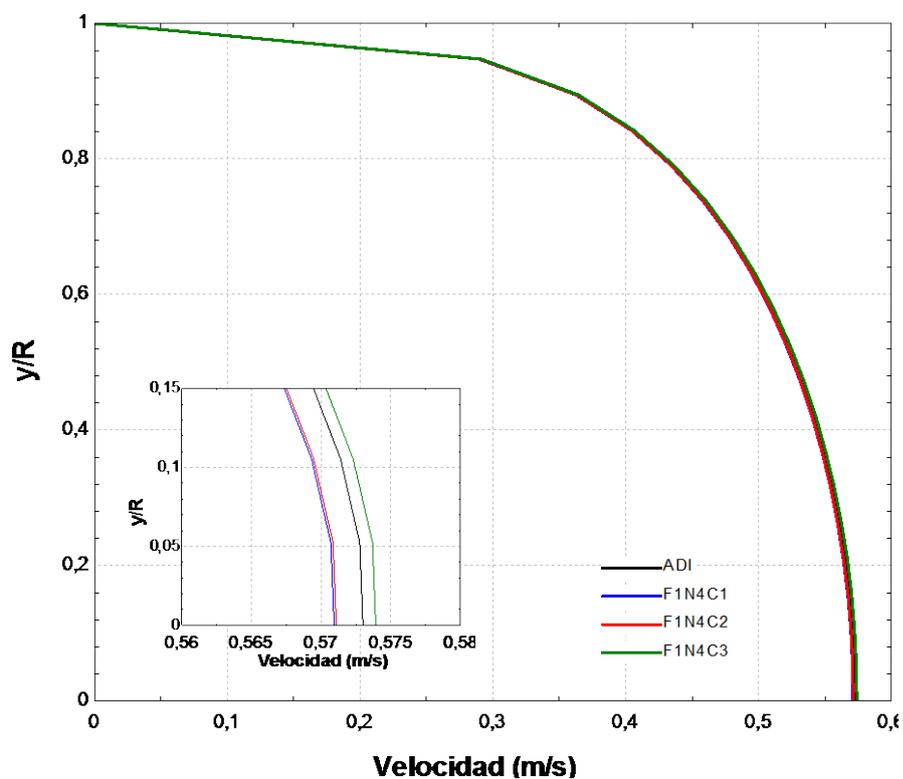


Figura 4.18. Perfil de velocidad para el nanofluido F1N4 ($Re = 10000$)

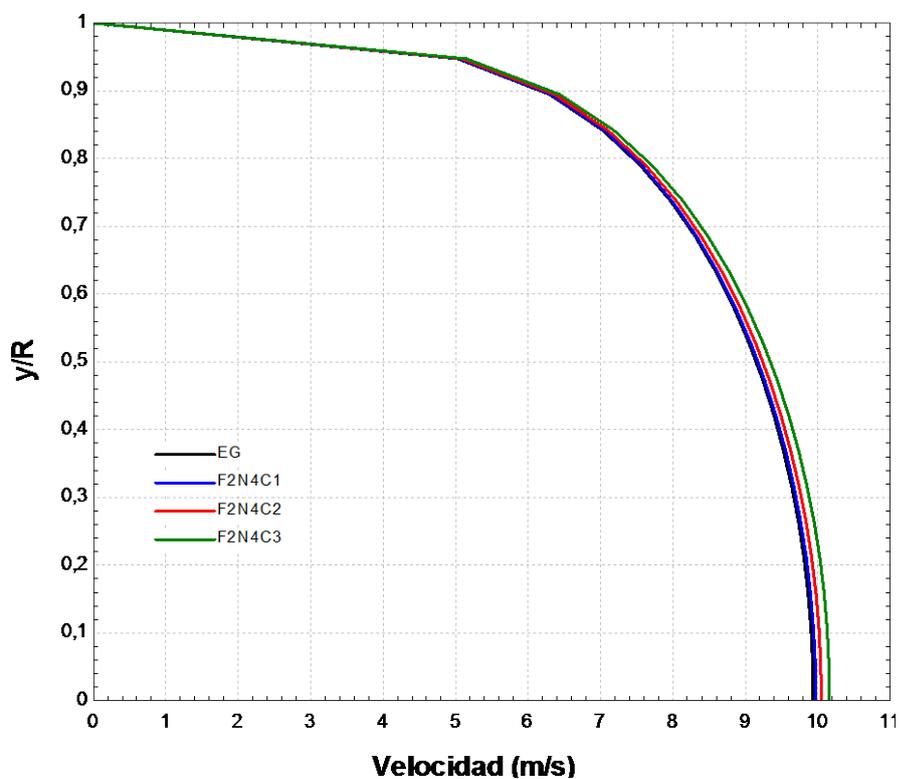


Figura 4.19. Perfil de velocidad para el nanofluido F2N4 ($Re = 10000$)

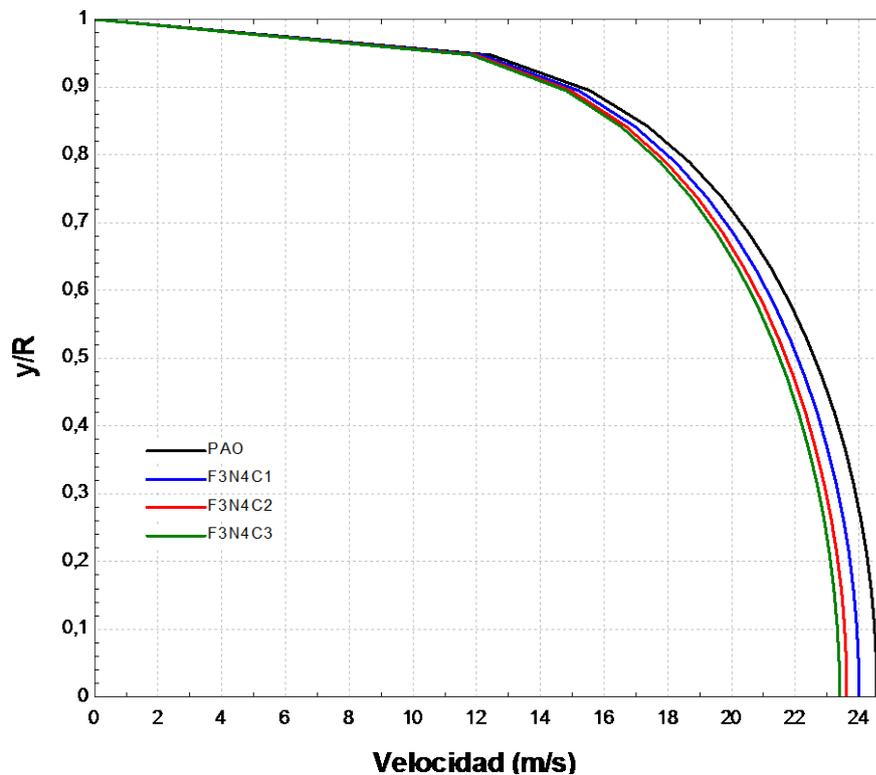


Figura 4.20. Perfil de velocidad para el nanofluido F3N4 ($Re = 10000$)

En las figuras anteriores, se observa una pequeña variación de los perfiles de velocidad de aquellos nanofluidos que contienen nanopartículas de alúmina dispersas en agua (Figs. 4.18 y 4.26). Para los nanofluidos con nanopartículas de alúmina dispersas en etileno glicol, las velocidades calculadas tienden a aumentar para mayores concentraciones volumétricas (Figs. 4.20 y 4.27). Lo contrario ocurre para los nanofluidos con nanopartículas dispersas en poli-alfa-olefín (Figs. 4.25 y 4.28), cuya tendencia es la misma de los demás nanofluidos.

Siendo que el número de Reynolds (Re) fue seleccionado para definir las condiciones dinámicas impuestas para el flujo, los valores de este están definidos para todas las simulaciones desarrolladas en el presente trabajo dentro de un rango establecido. Una consecuencia inmediata de este condicionamiento es la variación

de la velocidad de entrada para la simulación de cada nanofluido, conforme lo ilustra la Ec. (4.5):

$$u_m = \frac{\mu Re_D}{\rho D} \quad (4.5)$$

Tanto el diámetro (que es constante para todas las simulaciones) como el Re son valores predefinidos. Por tanto, la velocidad de entrada es función de la razón entre la viscosidad y la masa específica del nanofluido.

Conforme lo ilustrado en la Fig. 4.2, para el caso del nanofluido de agua con nanopartículas de alúmina, era esperado tener una disminución inicial de la velocidad de entrada en relación con la velocidad definida para el fluido base. Posteriormente, era esperado observar un incremento debido a la aproximación de las intensificaciones de la viscosidad y la masa específica.

Por otro lado, para el nanofluido de etileno glicol con nanopartículas de alúmina, dado que la intensificación de la densidad es menor que la intensificación de la viscosidad (ver Fig. 4.3), la velocidad tiende a disminuir.

Estos comportamientos son mejor evidenciados en la Tab. 4.1, que muestra las velocidades de entrada calculadas a partir de las propiedades modificadas de los nanofluidos que contienen nanopartículas de alúmina.

Tabla 4.1. Velocidades de entrada para los nanofluidos que contienen alúmina.

Fluido Base/ Nanofluido	u_m (m/s)				
	$Re = 500$	$Re = 750$	$Re = 1000$	$Re = 10000$	$Re = 20000$
F1	0,02233	0,03349	0,04465	0,44655	0,89310
F1N4C1	0,02223	0,03334	0,04445	0,44451	0,88903
F1N4C2	0,02224	0,03336	0,04448	0,44477	0,88954
F1N4C3	0,02235	0,03352	0,04470	0,44698	0,89396
F2	0,38654	0,57981	0,77308	7,73087	15,46173
F2N4C1	0,38772	0,58157	0,77543	7,75431	15,50862
F2N4C2	0,39061	0,58592	0,78122	7,81223	15,62445
F2N4C3	0,39501	0,59251	0,79002	7,90017	15,80033
F3	0,95545	1,43317	1,91090	19,10900	38,21800
F3N4C1	0,93316	1,39974	1,86631	18,66314	37,32629
F3N4C2	0,91816	1,37725	1,83633	18,36328	36,72656
F3N4C3	0,90909	1,36364	1,81818	18,18180	36,36360

Es importante resaltar que este efecto es determinado por la forma de las correlaciones utilizadas para el cálculo de las propiedades de los nanofluidos. Sin embargo, sea cual fuere el modelo definido para cada propiedad, debe considerarse este efecto para el condicionamiento de los datos de entrada en futuras simulaciones.

4.3.2. Comportamiento térmico

Una medida del comportamiento térmico del flujo de nanofluido es observable en el perfil de temperatura desarrollado a lo largo de la tubería. En seguida, son mostrados los perfiles de temperatura del flujo bajo la condición del número de Reynolds, $Re = 500$, y flujo de calor $q'' = 5000 \text{ W/m}^2$, para nanofluidos basados en agua y $q'' = 8000 \text{ W/m}^2$, para nanofluidos basados en etileno glicol y poli-alfa-olefín. En las Figs. 4.21, 4.22 y 4.23 son mostrados los perfiles de temperatura a la salida de la sección de pruebas para los casos representativos de los nanofluidos basados en agua, etileno glicol y poli-alfa-olefín, respectivamente.

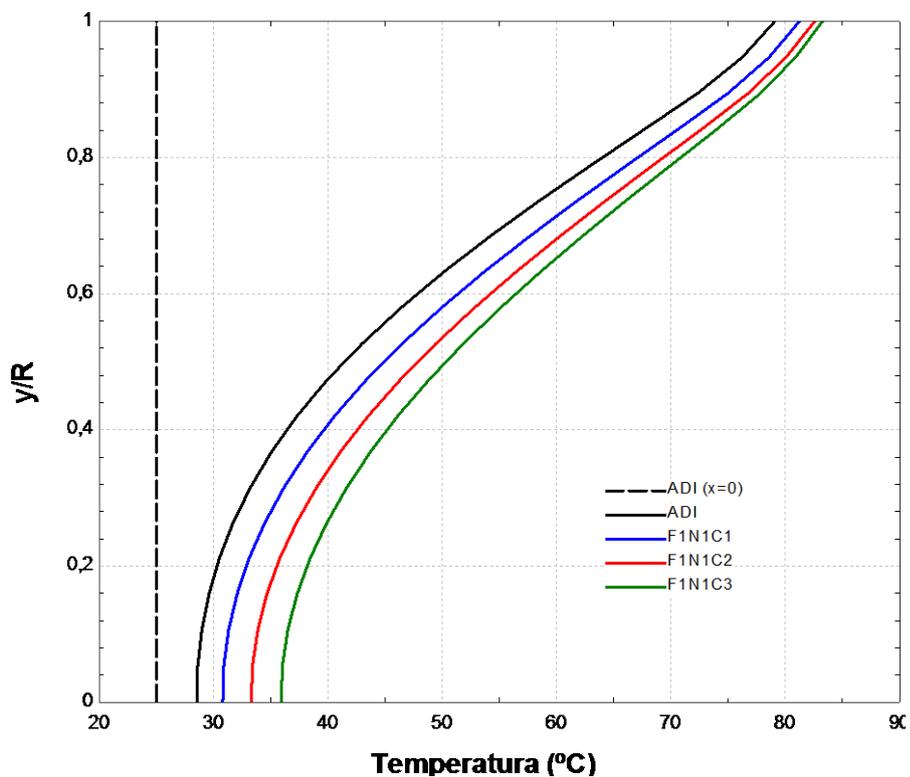


Figura 4.21. Perfil de temperatura para el nanofluido F1N1 ($Re = 500$).

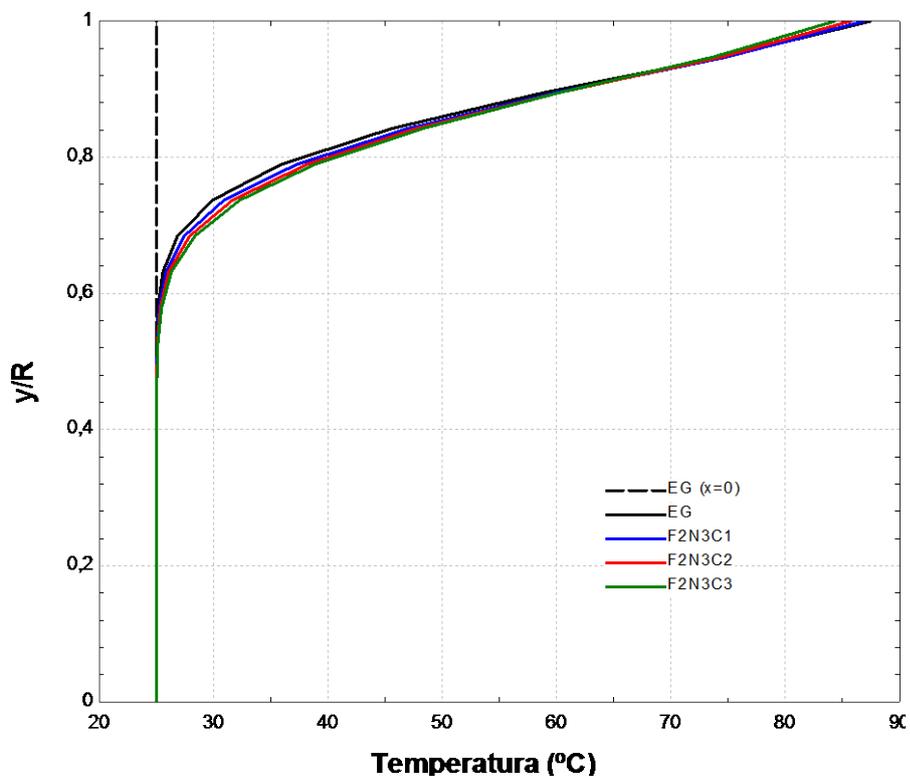


Figura 4.22. Perfil de temperatura para el nanofluido F2N3 ($Re = 500$).

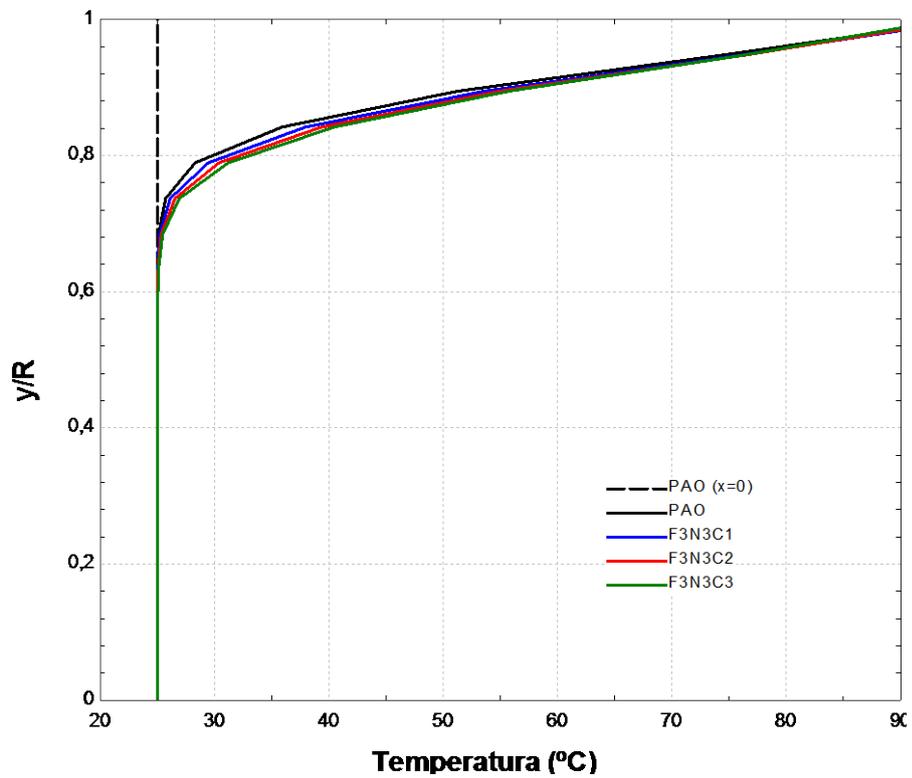


Figura 4.23. Perfil de temperatura para el nanofluido F3N3 ($Re = 500$).

También en el caso del comportamiento térmico, fue observado que los resultados de las simulaciones de los nanofluidos que contienen nanopartículas de alúmina resultaron diferentes. Así, puede observarse en las Figs. 4.24, 4.25 y 4.26 los perfiles de temperatura de los nanofluidos compuestos por nanopartículas de alúmina dispersas en agua, etileno glicol y poli-alfa-olefín, respectivamente (como en los casos anteriores, son mostrados apenas los casos más representativos).

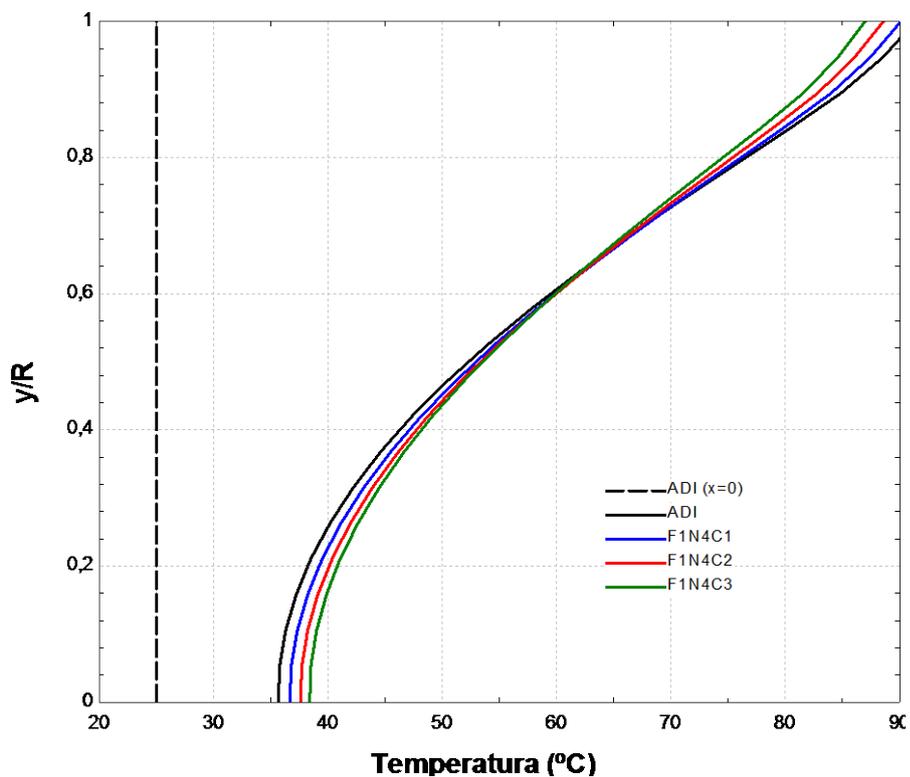


Figura 4.24. Perfil de temperatura para el nanofluido F1N4 ($Re = 500$).

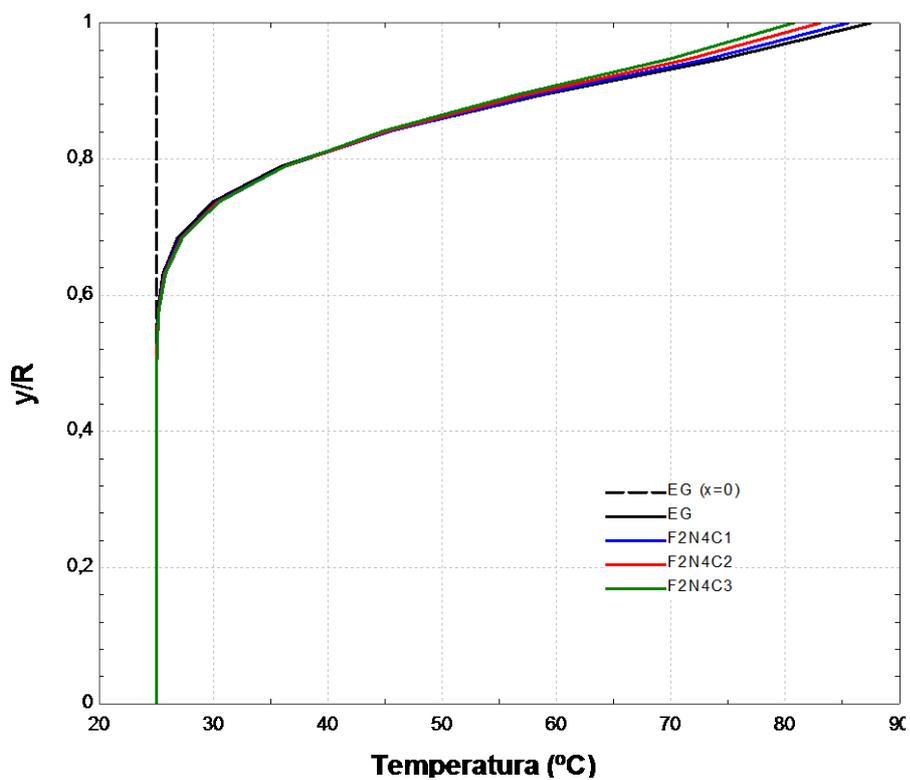


Figura 4.25. Perfil de temperatura para el nanofluido F2N4 ($Re = 500$).

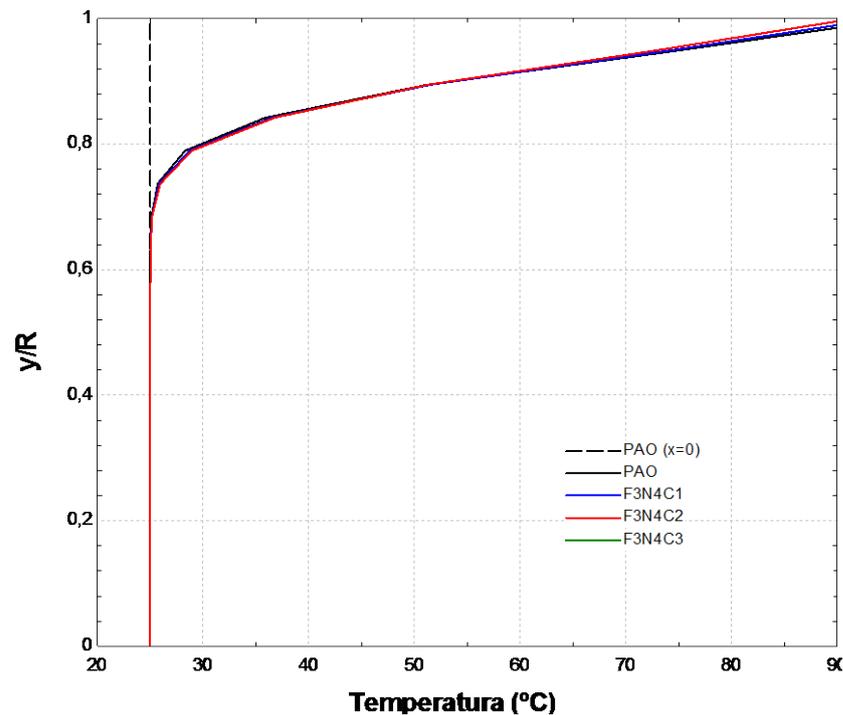


Figura 4.26. Perfil de temperatura para el nanofluido F3N4 ($Re = 500$).

En las Figs. 4.24 a 4.26, se puede visualizar que la adición de nanopartículas de alúmina influencia de dos maneras en el comportamiento térmico cuando el flujo es laminar. La primera es a través de la variación irregular de la velocidad de entrada, debido a la variación de las propiedades de los nanofluidos, conforme lo detallado en la sección 4.3.1. La segunda es la alteración en la longitud de entrada para el completo desarrollo térmico del flujo. Este fenómeno se torna más evidente para el caso de los nanofluidos a base de agua, como puede ser visto por la comparación de las Figs. 4.29 y 4.32. Tal comportamiento es consistente con la variación del número de Prandtl, conforme lo visto en la subsección 4.2.1.

En régimen turbulento, el desarrollo térmico es alcanzado con mayor rapidez, conforme lo detallado en el numeral 2.6.3. Seguidamente, son mostrados los perfiles de temperatura de los nanofluidos fluyendo en régimen turbulento, sometidos a la condición de $Re = 10000$, con $q'' = 5000 \text{ W/m}^2$ para nanofluidos

basados en agua y $q'' = 8000 \text{ W/m}^2$ para los nanofluidos basados en etileno glicol y poli-alfa-olefín, en las Figs. 4.27, 4.28 y 4.29, respectivamente (apenas los casos representativos).

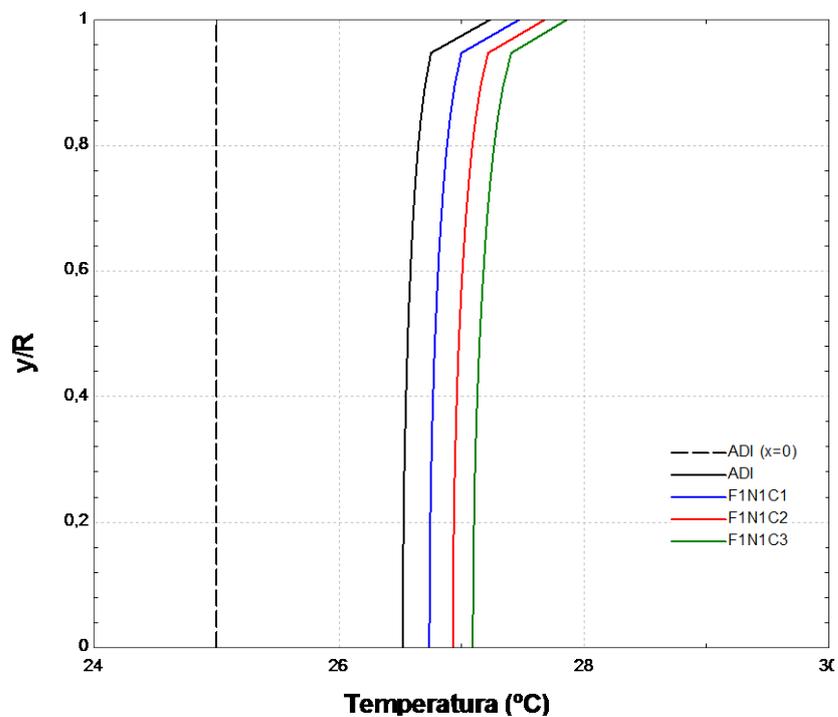


Figura 4.27. Perfil de temperatura para el nanofluido F1N1 ($Re = 10000$).

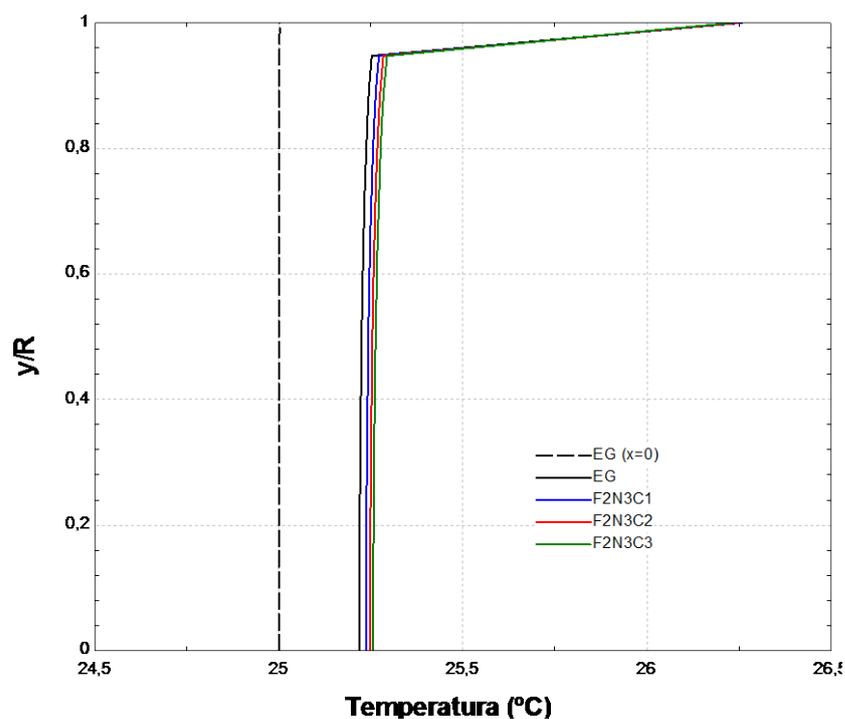


Figura 4.28. Perfil de temperatura para el nanofluido F2N3 ($Re = 10000$).

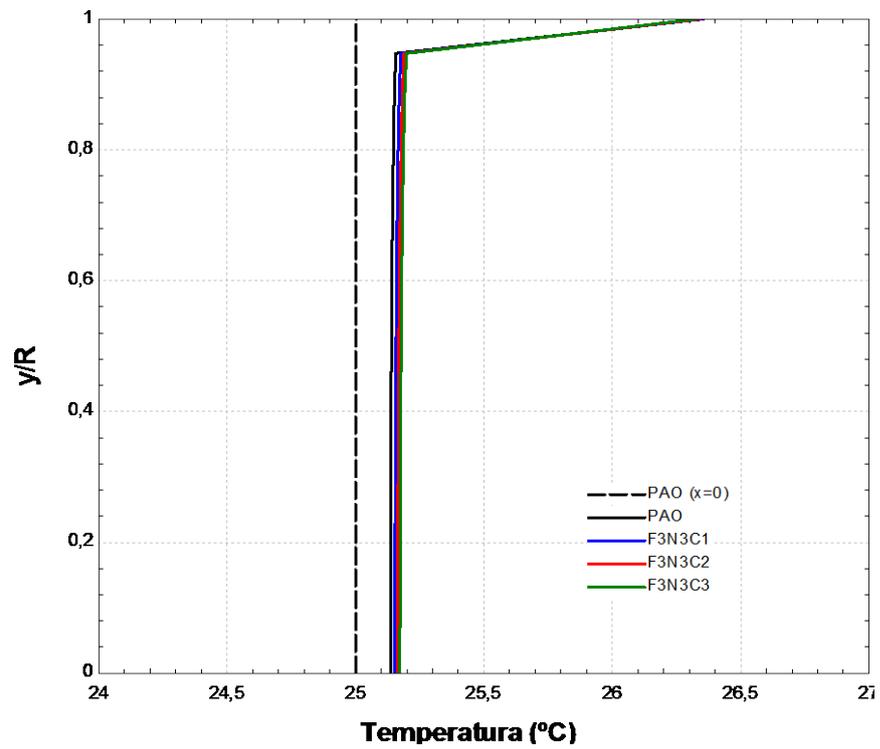


Figura 4.29. Perfil de temperatura para el nanofluido F3N3 ($Re = 10000$).

También en este caso, los nanofluidos compuestos por nanopartículas de alúmina representan diferencias con los demás nanofluidos simulados. Estas pequeñas diferencias son mostradas en las Figs. 4.30, 4.31 y 4.32 para nanofluidos que contienen nanopartículas de alúmina en agua, etileno glicol y poli-alfa-olefín, respectivamente y apenas para los casos más representativos.

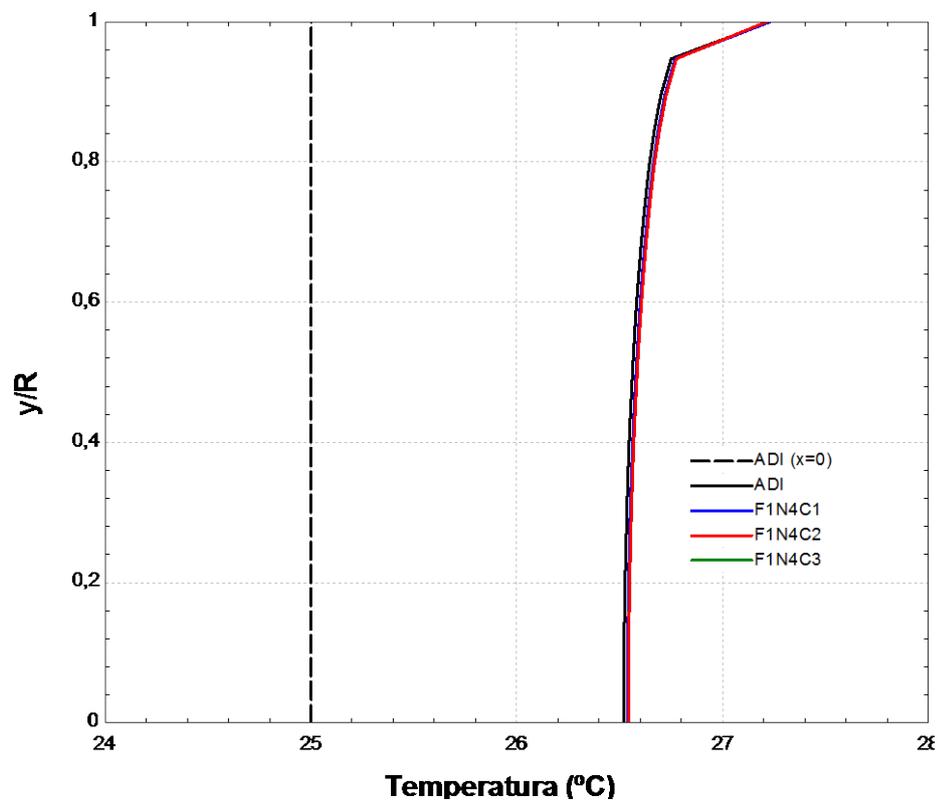


Figura 4.30. Perfil de temperatura para el nanofluido F1N4 ($Re = 10000$).

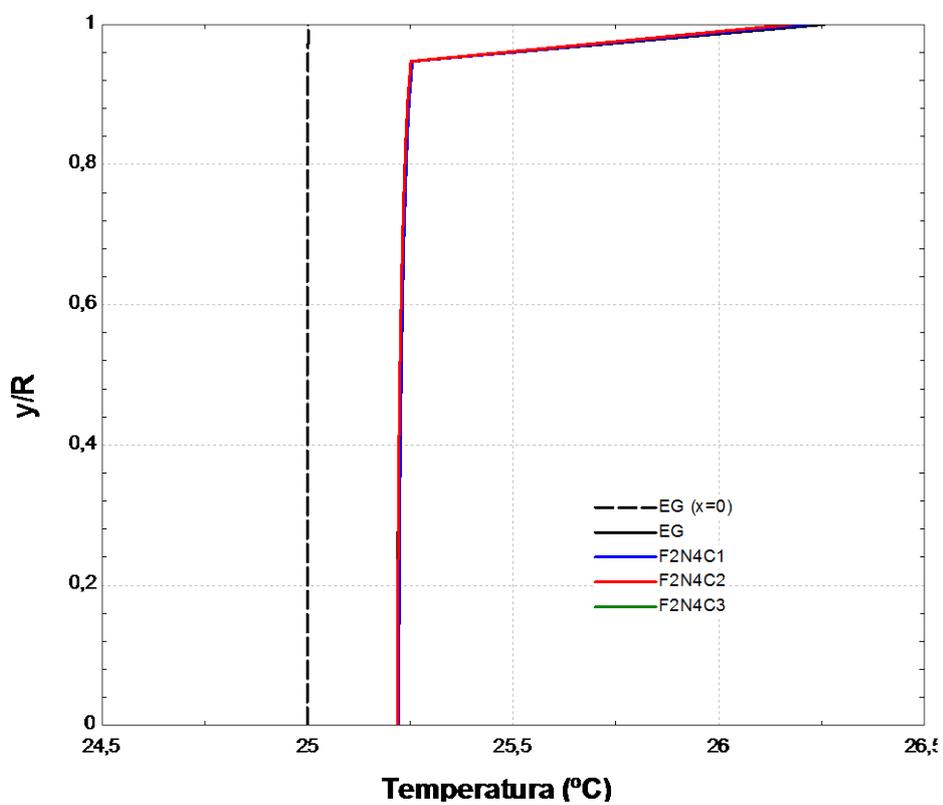


Figura 4.31. Perfil de temperatura para el nanofluido F2N4 ($Re = 10000$).

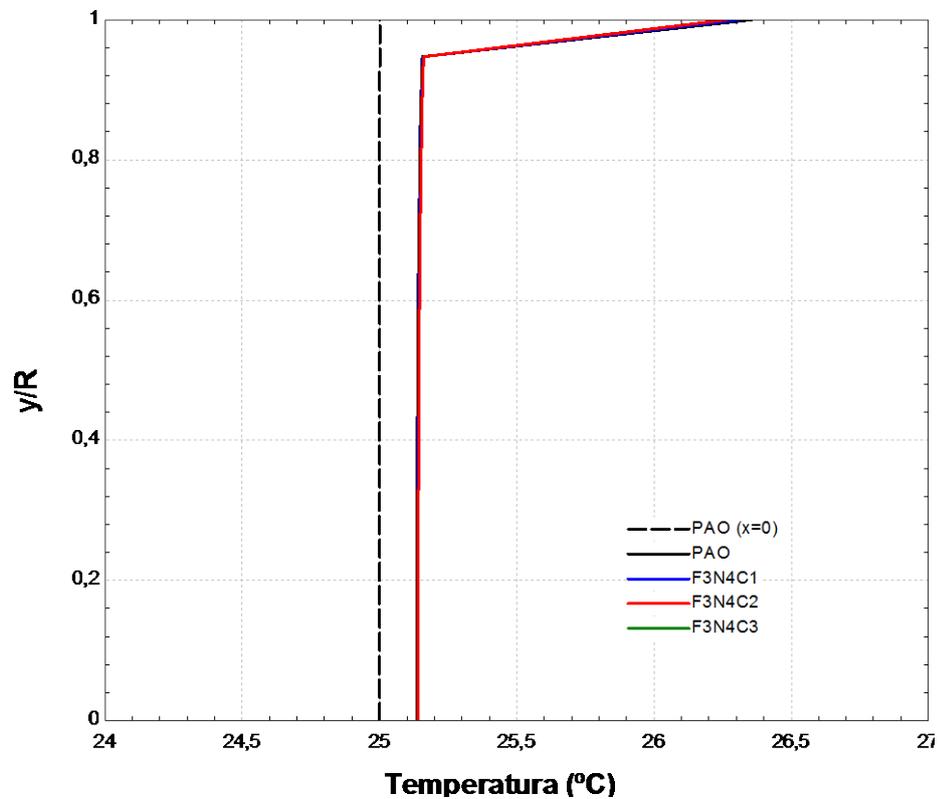


Figura 4.32. Perfil de temperatura para el nanofluido F3N4 ($Re = 10000$).

Las Figs. 4.27 a 4.32 ilustran que el desarrollo térmico del flujo ocurre apenas para los nanofluidos basados en agua (lo que es confirmado en la sección siguiente). Esto es debido a las propiedades del fluido base aplicado en cada caso, principalmente a la notable diferencia de sus viscosidades.

4.4. Intensificación de la transferencia de calor

Mediante funciones propias del programa computacional fue posible coleccionar valores de temperatura media en secciones determinadas de la tubería (descritas en la sub sección 3.3.3) así como la temperatura de pared en esas mismas secciones.

4.4.1. Temperaturas media y de pared

Las tendencias de la variación tanto de la temperatura de pared como de la temperatura media del nanofluido son mostradas a continuación, apenas para visualizar los diversos tipos de comportamientos encontrados a partir de las simulaciones, dado el gran número de resultados obtenidos.

En la Fig. 4.33 se muestra el desarrollo de las temperaturas de pared y media para el nanofluido compuesto por agua y nanopartículas de plata, bajo las condiciones de $Re = 500$ y $q'' = 5000 \text{ W/m}^2$.

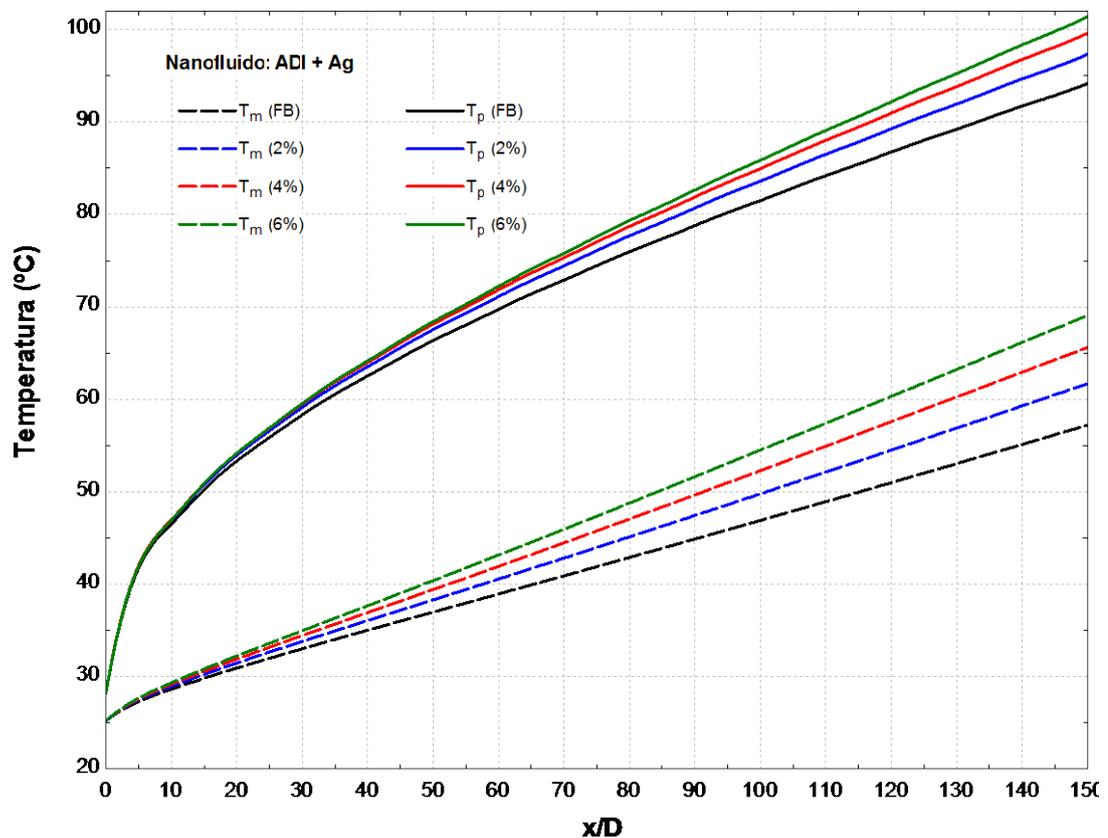


Figura 4.33. Temperaturas media (T_m) y de pared (T_p) a lo largo de la tubería para el nanofluido F1N1.

En la Fig. 4.34 se aprecia el desarrollo de las temperaturas de pared y media para el nanofluido de etileno glicol y nanopartículas de hierro, bajo las condiciones de $Re = 500$ y $q'' = 8000 \text{ W/m}^2$.

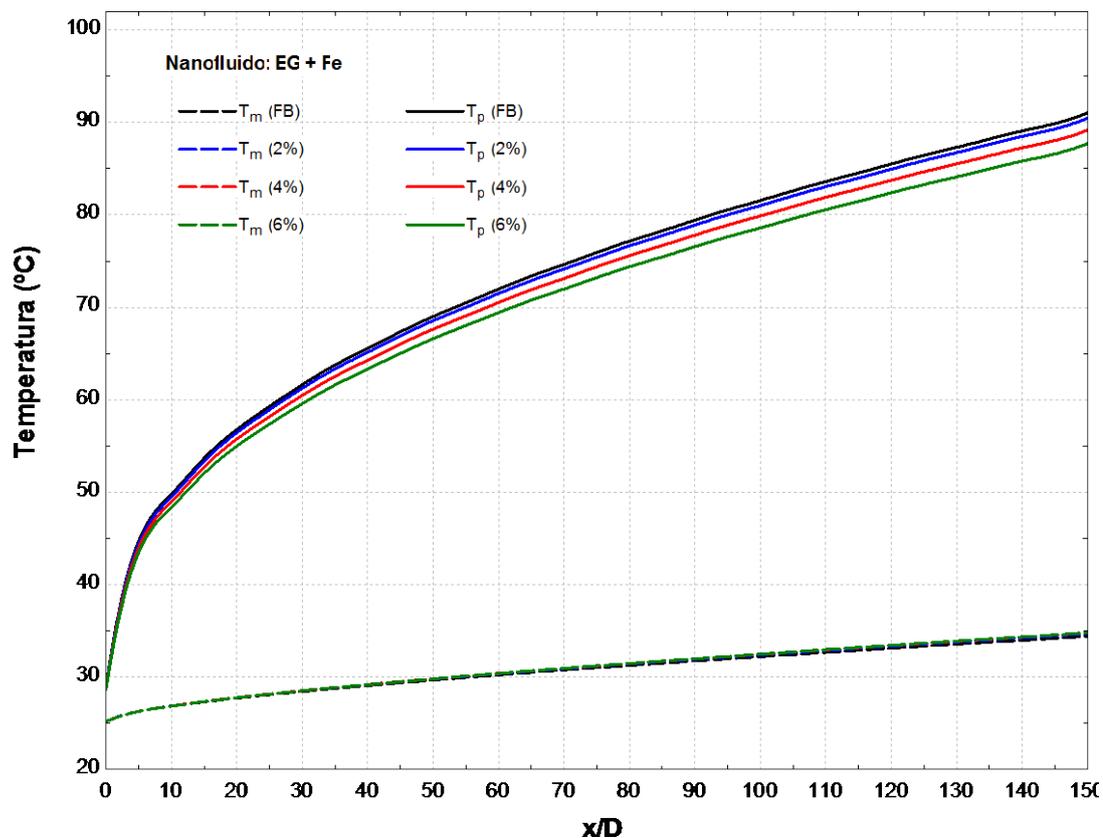


Figura 4.34. Temperaturas media (T_m) y de pared (T_s) a lo largo de la tubería para el nanofluido F2N3.

En la Fig. 4.35 se muestra el desarrollo de las temperaturas de pared y media para el nanofluido compuesto por poli-alfa-olefín y nanopartículas de hierro, bajo las condiciones de $Re = 500$ y $q'' = 8000 \text{ W/m}^2$.

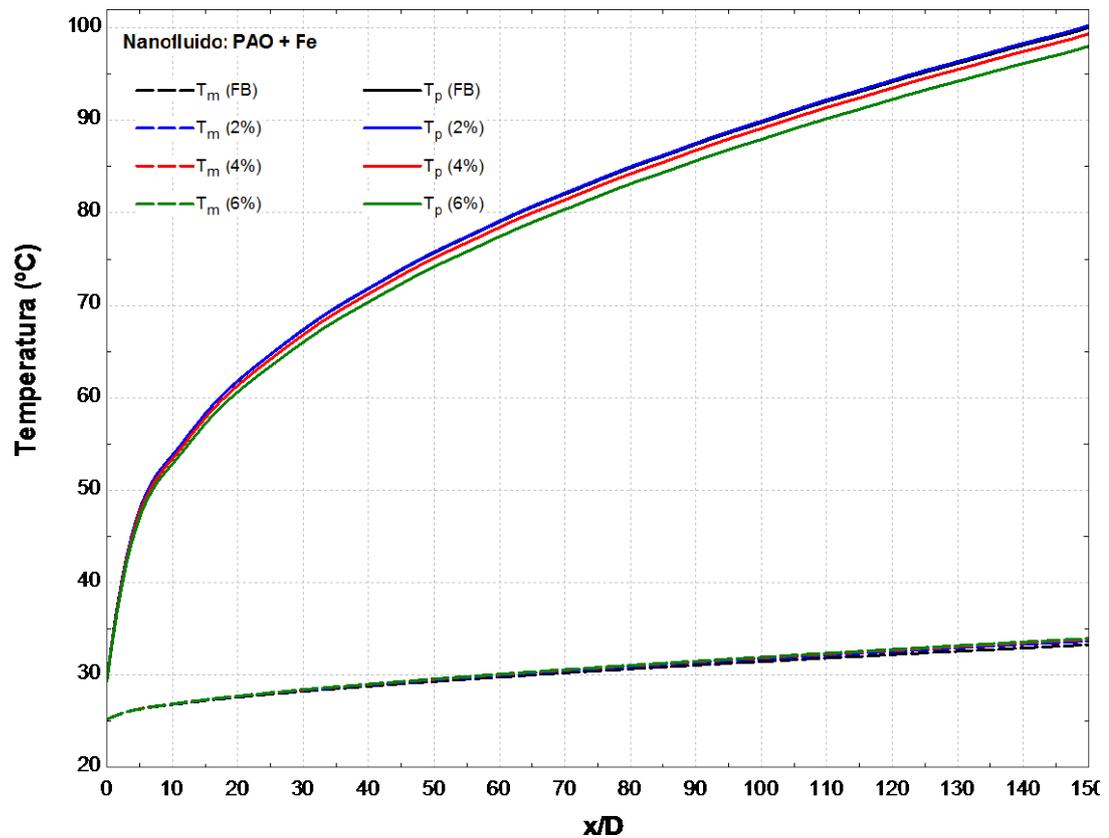


Figura 4.35. Temperaturas media (T_m) y de pared (T_p) a lo largo de la tubería para el nanofluido F3N3.

De los gráficos anteriores, se torna evidente que el desarrollo térmico aún no es alcanzado para los casos de los nanofluidos basados en etileno glicol y poli-alfa-olefín. La principal diferencia se debe a los altos número de Pr de estos fluidos base, que deriva en una mayor longitud de entrada térmica para los flujos en régimen laminar (conforme lo explicado en la sub sección 4.2.1).

4.4.2. Coeficiente de transferencia de calor

Como el principal objetivo es determinar la intensificación del coeficiente de la transferencia de calor en el flujo del nanofluido, serán procesados los resultados del campo de temperaturas mediante las ecuaciones dadas en la sub sección 2.6.5

para la condición de flujo de calor constante. Para el cálculo del coeficiente de transferencia de calor por convección (h), será empleada la correlación de enfriamiento de Newton, de la forma dada por la Ec. (4.6).

$$h_x = \frac{\dot{q}_s}{[T_{p(x)} - T_{m(x)}]} \quad (4.6)$$

Con base en esta definición y con los datos de temperaturas obtenidas mediante simulación numérica, fueron calculados los valores del coeficiente de transferencia de calor convectivo a lo largo de la tubería. A partir de estos son calculados los valores medios de coeficiente de transferencia de calor para cada nanofluido y bajo las condiciones dinámicas determinadas. Los resultados serán agrupados por fluido base y presentados en las figuras siguientes, apenas para ilustrar las tendencias generales de los comportamientos de cada grupo de nanofluidos. Tales comportamientos serán detallados más adelante.

En ese sentido, la Fig. 4.36 muestra el incremento del coeficiente de transferencia de calor convectivo a lo largo de la tubería con el aumento de la concentración volumétrica de nanopartículas de los nanofluidos basados en agua y el aumento del valor del número de Reynolds, tanto en régimen laminar como turbulento.

La Fig. 4.37 ilustra la misma tendencia de aumento del coeficiente de transferencia de calor por convección con la concentración volumétrica para los nanofluidos basados en etileno glicol y con el incremento del Re en ambos regímenes, laminar y turbulento.

La Fig. 4.38 muestra una tendencia similar a las anteriores en relación con el incremento de ambos: la concentración volumétrica y el número de Reynolds. Sin embargo, se destaca la disminución del valor de h para los nanofluidos de menor concentración volumétrica.

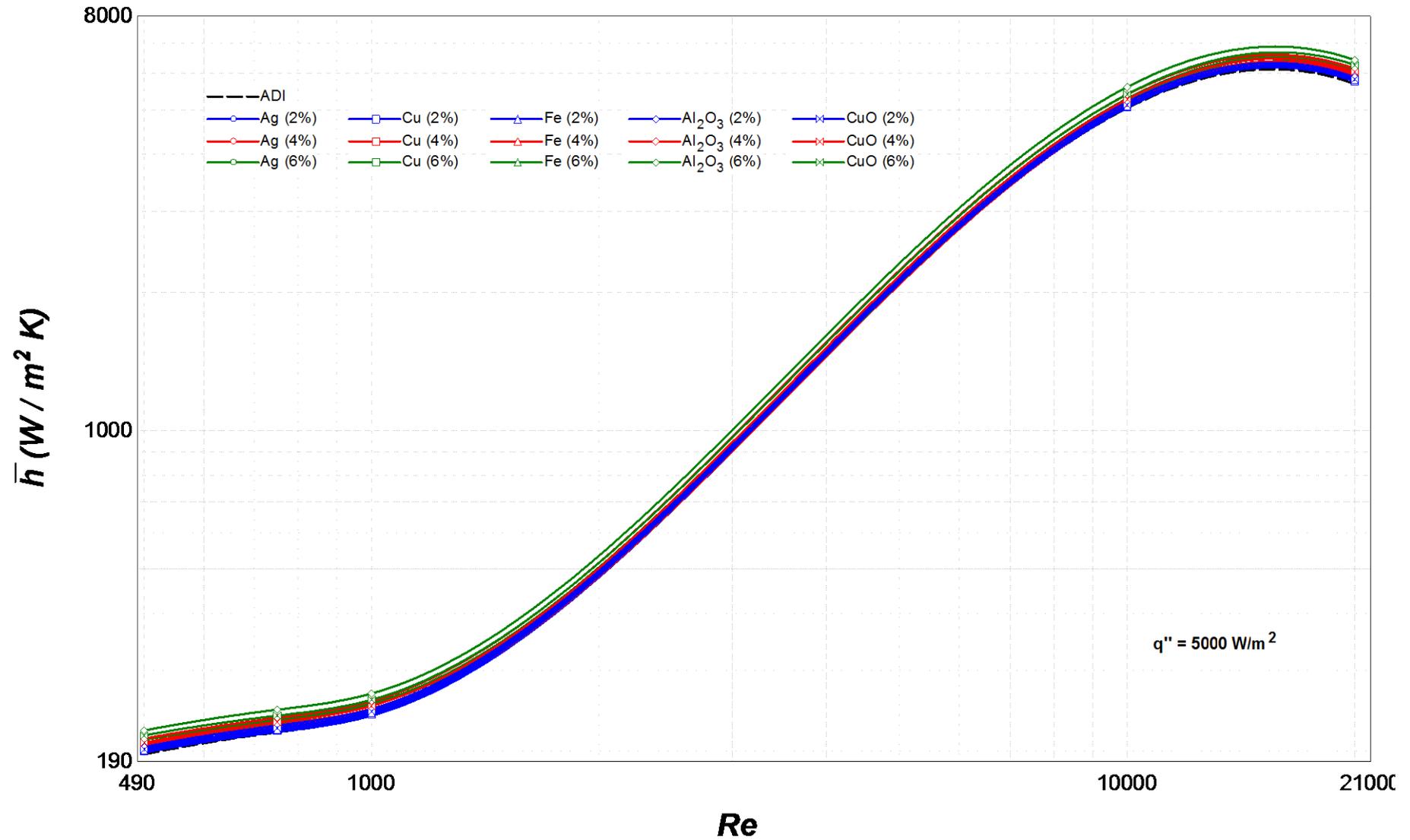


Figura 4.36. Coeficiente medio de transferencia de calor por convección para los nanofluidos basados en agua.

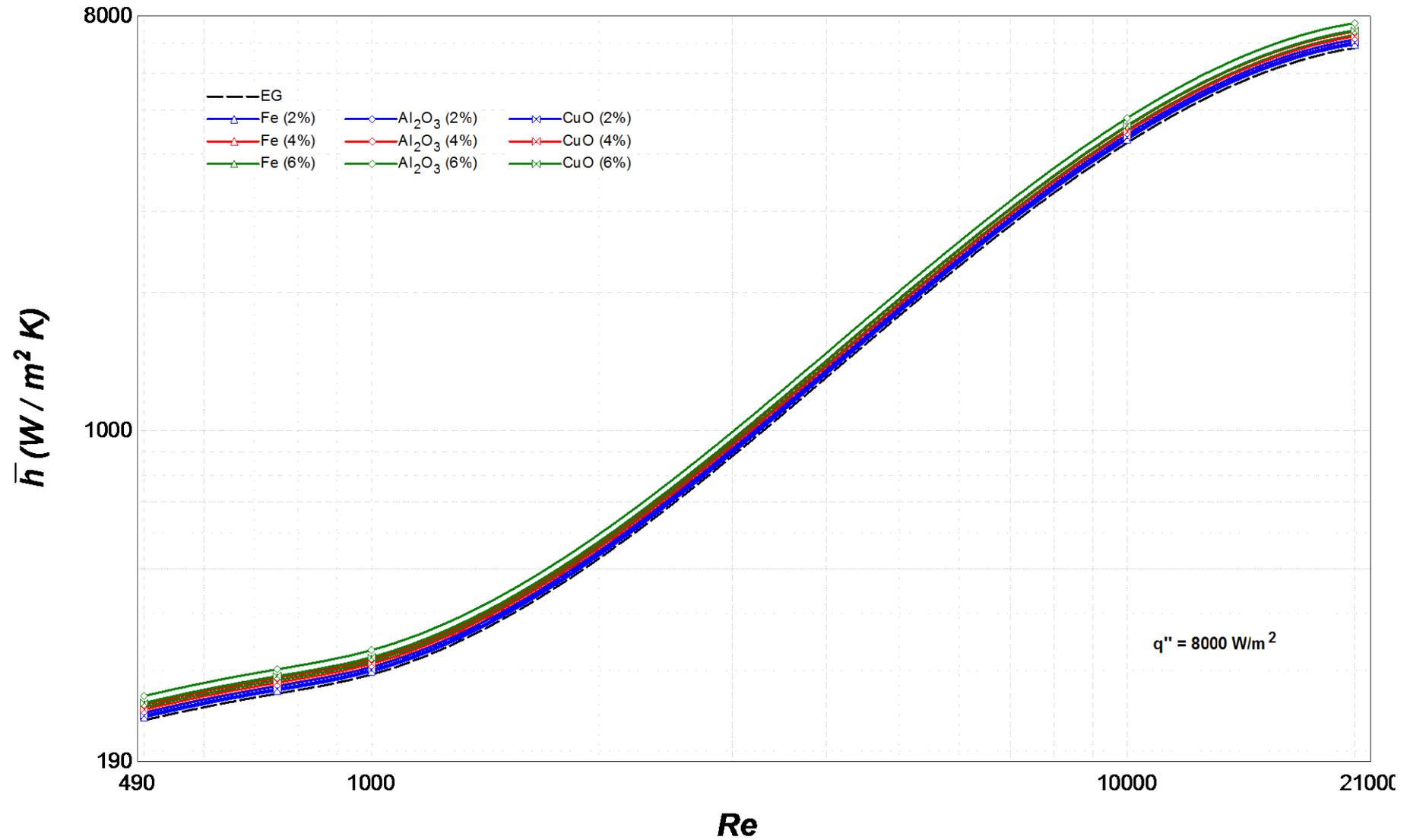


Figura 4.37. Coeficiente medio de transferencia de calor por convección para los nanofluidos basados en etileno glicol.

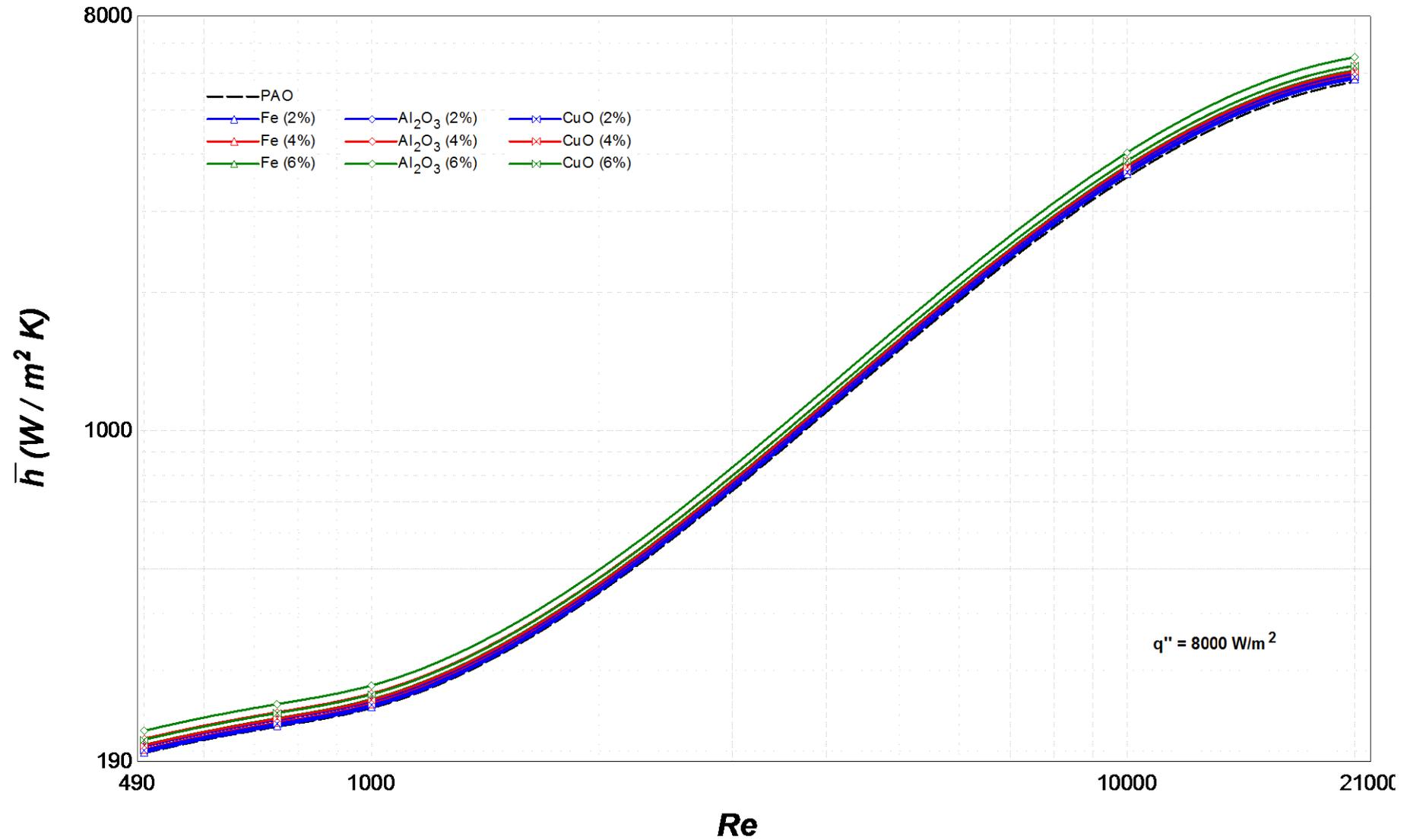


Figura 4.38. Coeficiente medio de transferencia de calor por convección para los nanofluidos basados en poli-alfa-olefín.

Agrupados por tipo de régimen, es posible observar mejor las tendencias en cada caso. De ese modo, las Figs. 4.39, 4.40 y 4.41 muestran las intensificaciones del coeficiente de transferencia de calor por convección para los nanofluidos basados en agua, etileno glicol y poli-alfa-olefín, respectivamente, en régimen laminar.

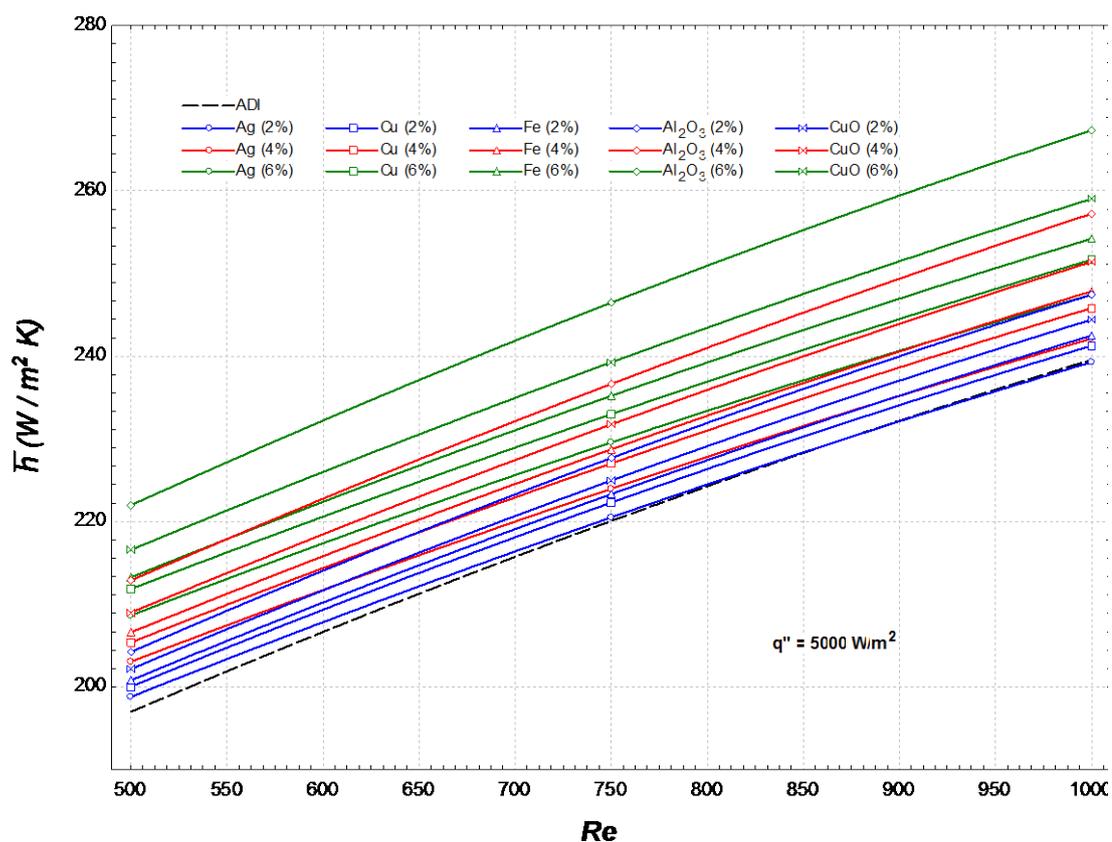


Figura 4.39. Coeficiente medio de transferencia de calor de los nanofluidos basados en agua para régimen laminar.

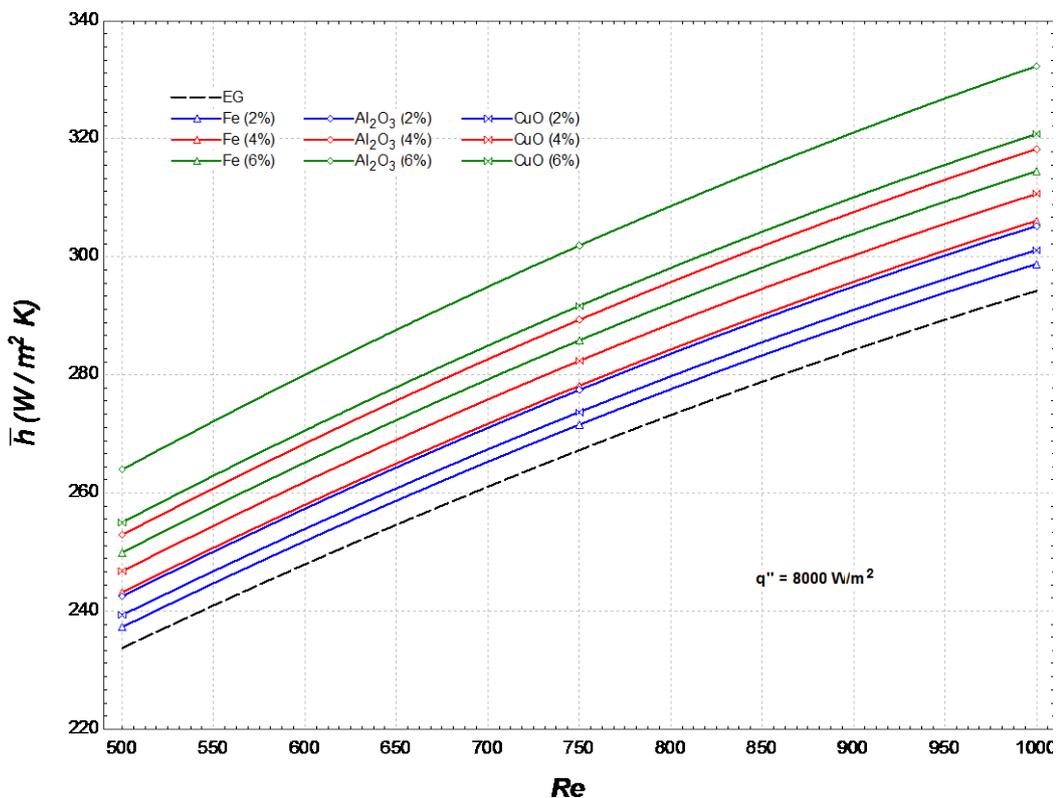


Figura 4.40. Coeficiente medio de transferencia de calor de los nanofluidos basados en etileno glicol para régimen laminar.

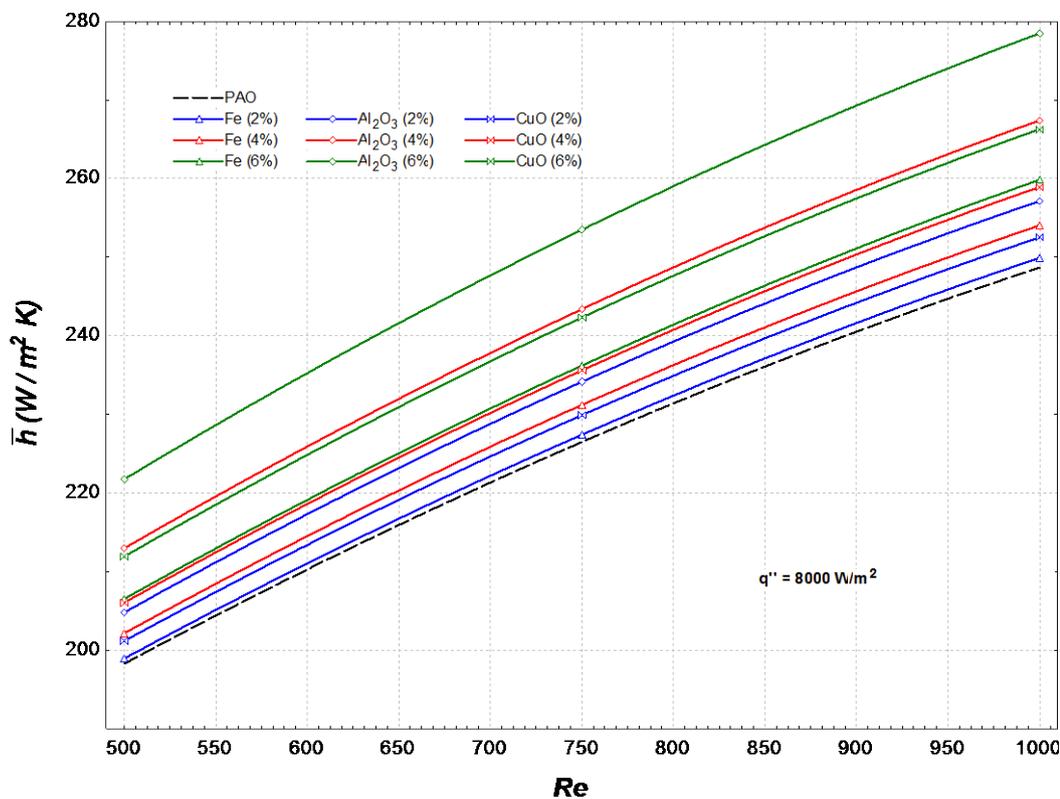


Figura 4.41. Coeficiente medio de transferencia de calor de los nanofluidos basados en poli-alfa-olefín para régimen laminar.

Las Figs. 4.39 a 4.41 muestran una tendencia general de intensificación de transferencia de calor por convección con el aumento de la concentración de nanopartículas. En todos los casos fueron obtenidas las mayores intensificaciones para los nanofluidos que contienen nanopartículas de alúmina, seguido por los nanofluidos con nanopartículas dispersas de óxido de cobre, hierro, cobre y plata, en orden decreciente. También se aprecia una pequeña disminución en la transferencia de calor por convección del nanofluido compuesto por agua y nanopartículas de plata al 2%. Más adelante se esboza una explicación para este fenómeno.

La intensificación del coeficiente de transferencia de calor por convección de los nanofluidos basados en agua, fluyendo en régimen turbulento, presenta las tendencias mostradas en la Fig. 4.42.

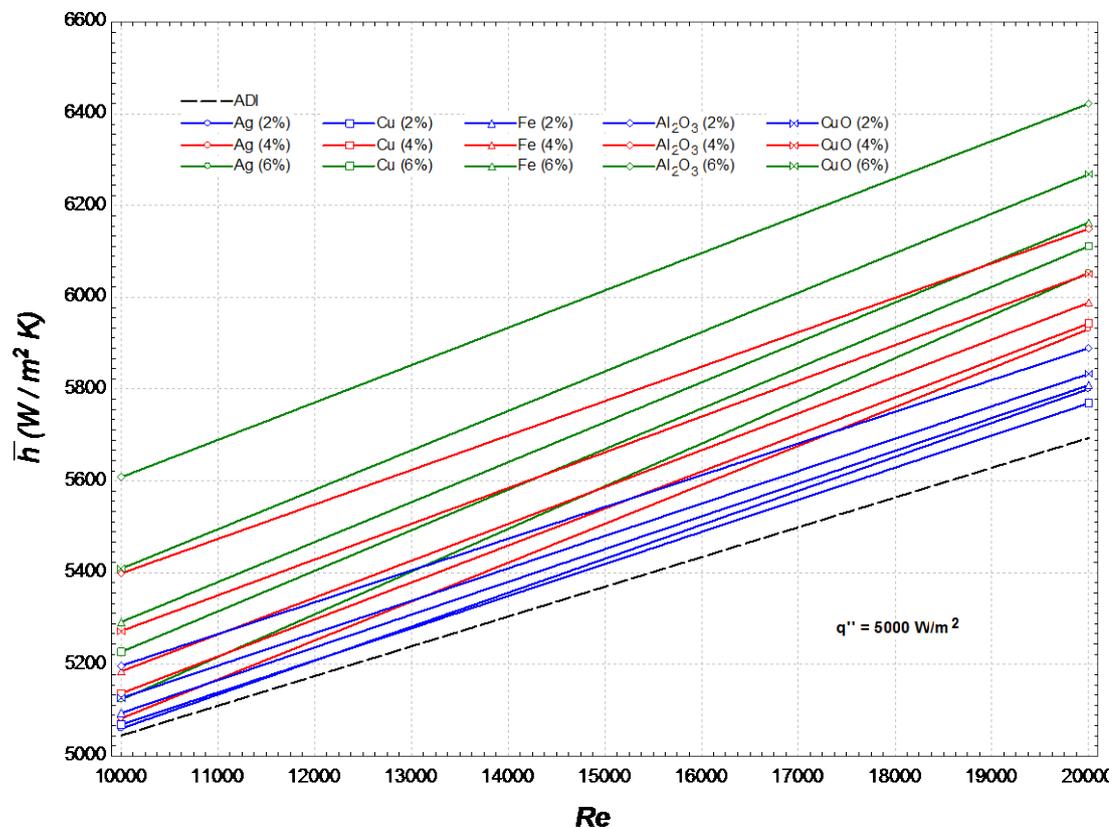


Figura 4.42. Coeficiente medio de transferencia de calor de los nanofluidos basados en agua para régimen turbulento.

Es observado que la tendencia de la intensificación valor de h es similar a la descrita para los flujos de los nanofluidos basados en agua fluyendo en régimen laminar. Esto es, con la mayor intensificación para los nanofluidos que contienen nanopartículas de cobre, seguido por los nanofluidos con nanopartículas de óxido de cobre, hierro y cobre.

La Fig. 4.43 muestra la tendencia de la intensificación del valor de h para los nanofluidos basados en etileno glicol.

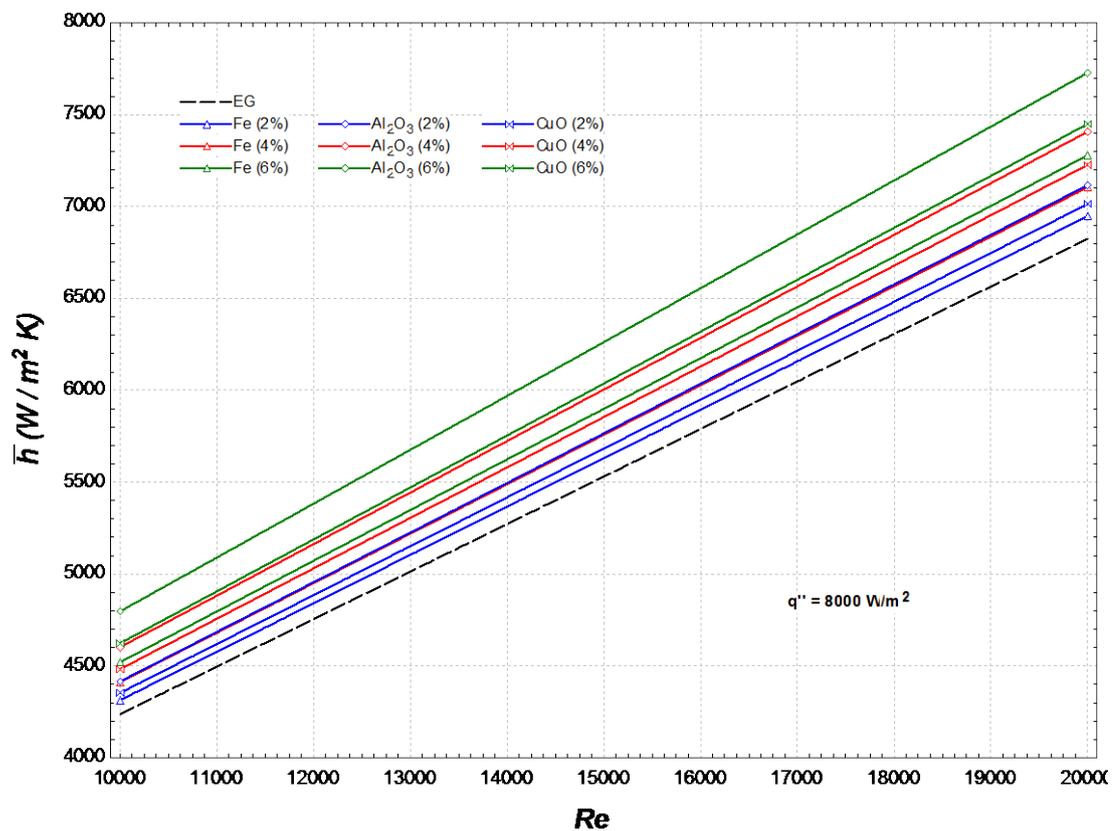


Figura 4.43. Coeficiente medio de transferencia de calor de los nanofluidos basados en etileno glicol para régimen turbulento.

Para los nanofluidos basados en etileno glicol, la intensificación del coeficiente de transferencia de calor por convección obedece la misma tendencia de los casos anteriores: mayor para el uso de nanopartículas de alúmina,

intermedia para nanopartículas de óxido de cobre y menor para nanopartículas de hierro.

En la Fig. 4.44 es mostrada la tendencia de la intensificación de h para los nanofluidos basados en poli-alfa-olefín, fluyendo en régimen turbulento.

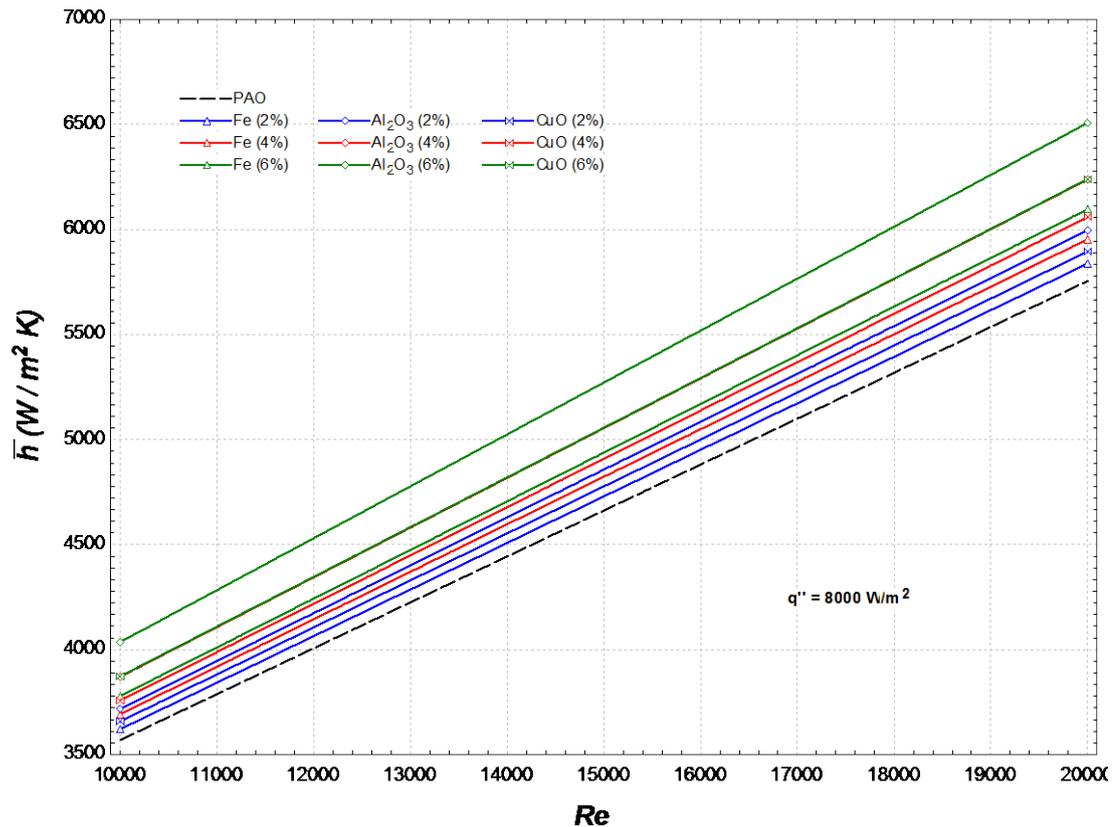


Figura 4.44. Coeficiente medio de transferencia de calor de los nanofluidos basados en poli-alfa-olefín para régimen turbulento.

Los casos de disminución del coeficiente de transferencia de calor por convección se podrían explicar bajo la hipótesis de que los nanofluidos que presentan ese fenómeno no consiguen una intensificación de la conductividad térmica superior al efecto adverso de la variación de las demás propiedades.

4.4.3. Número de Nusselt

La variación del número de Nusselt medio es mostrada en las Figs. 4.45 a 4.47 para los flujos en régimen laminar de los nanofluidos basados en agua, etileno glicol y poli-alfa-olefín, respectivamente.

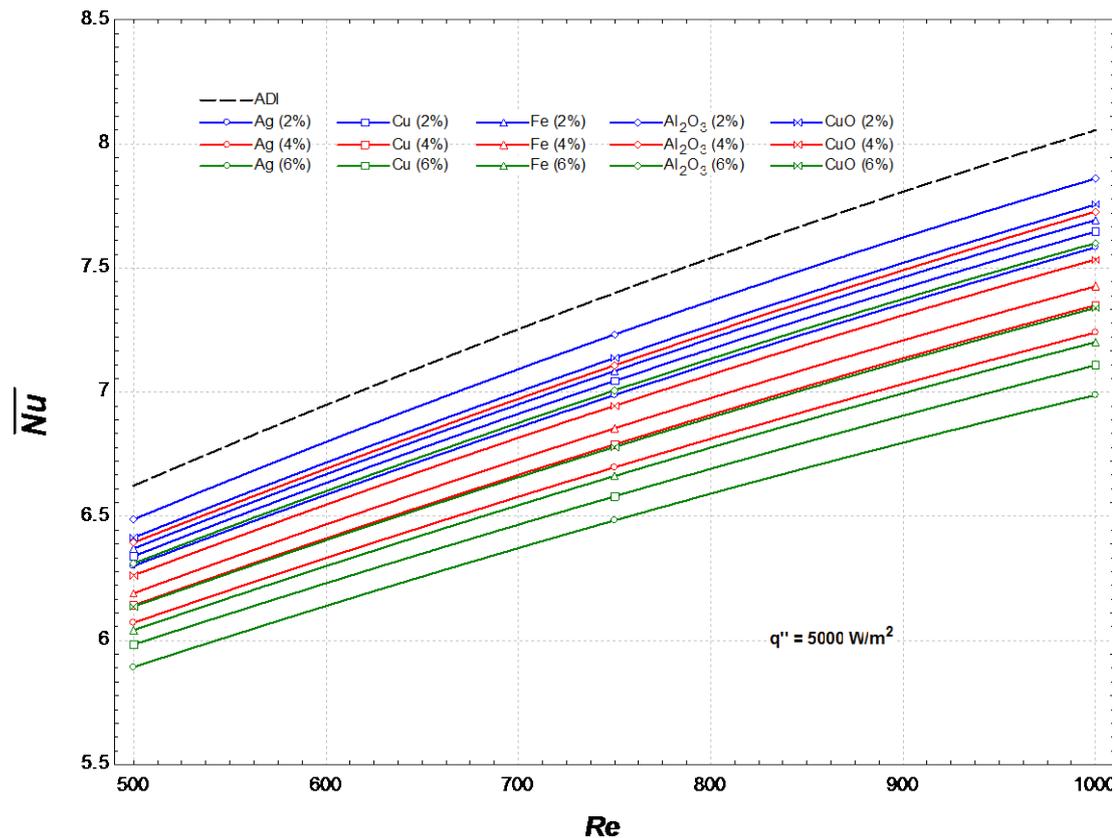


Figura 4.45. Tendencia de \overline{Nu} para los nanofluidos basados en agua (en régimen laminar).

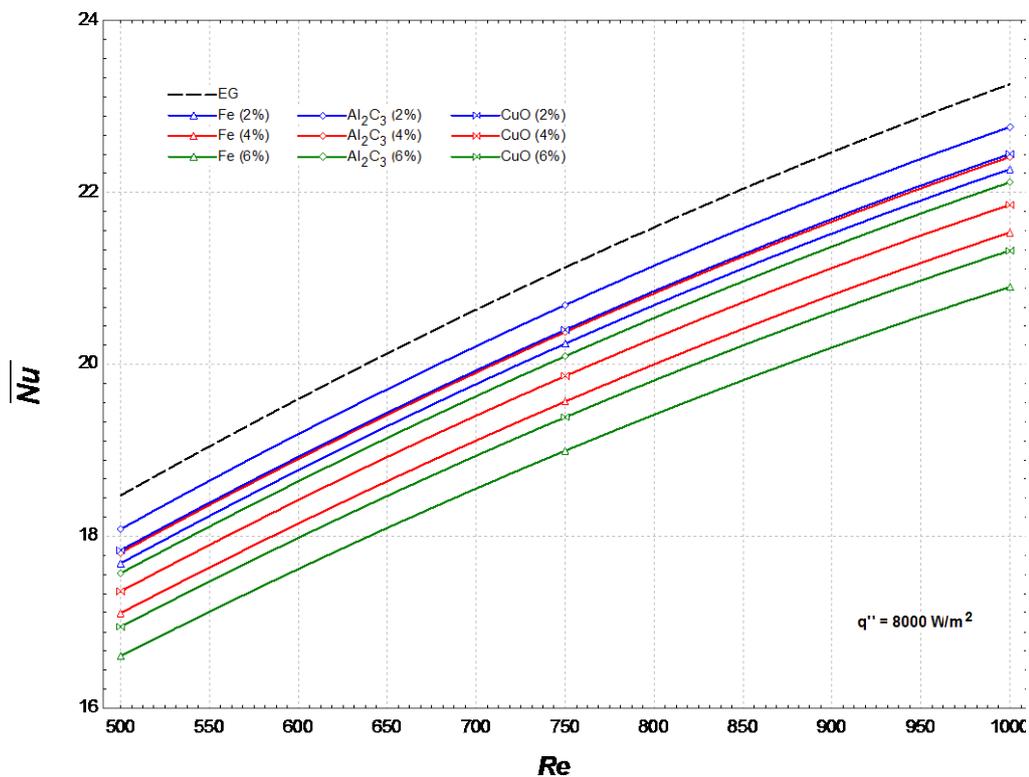


Figura 4.46. Tendencia de \overline{Nu} para los nanofluidos basados en etileno glicol (en régimen laminar).

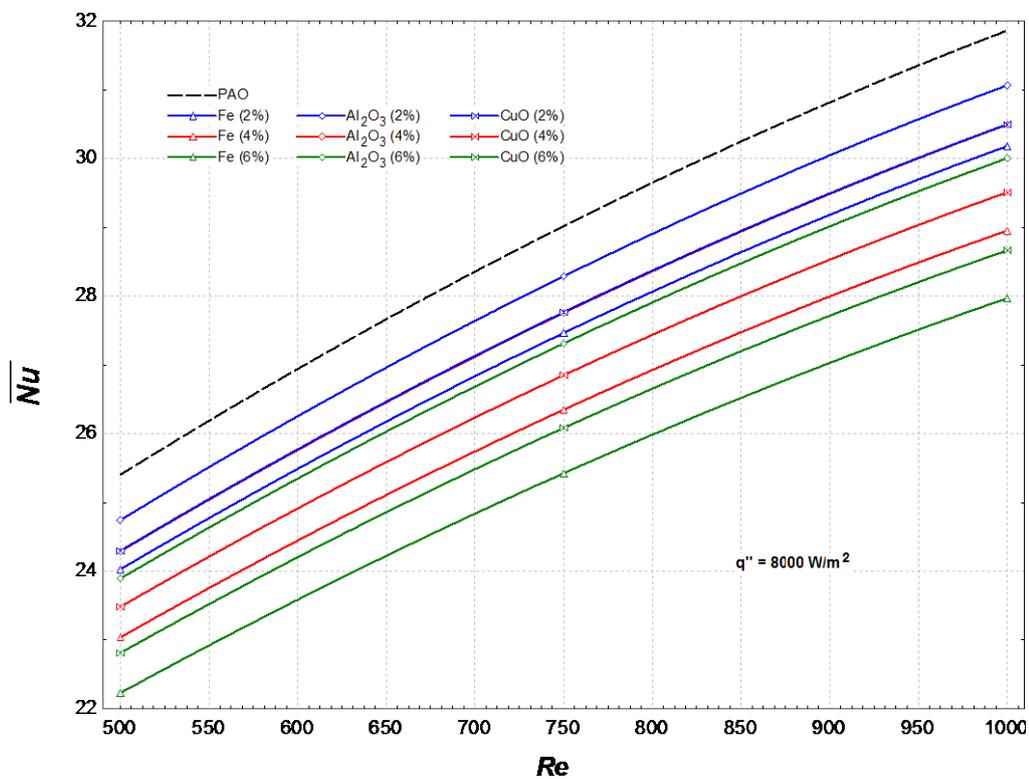


Figura 4.47. Tendencia de \overline{Nu} para los nanofluidos basados en poli-alfa-olefín (en régimen laminar).

La tendencia observada en todos los casos es la disminución del \overline{Nu} con el incremento de la concentración volumétrica para un valor de Re definido. Por otro lado, el \overline{Nu} se incrementa con el aumento del Re en todos los casos.

En régimen turbulento, las tendencias se mantienen, como es ilustrado en las Figs. 4.48, 4.49 y 4.50 para nanofluidos basados en agua, etileno glicol y poli-alfa-olefín, respectivamente.

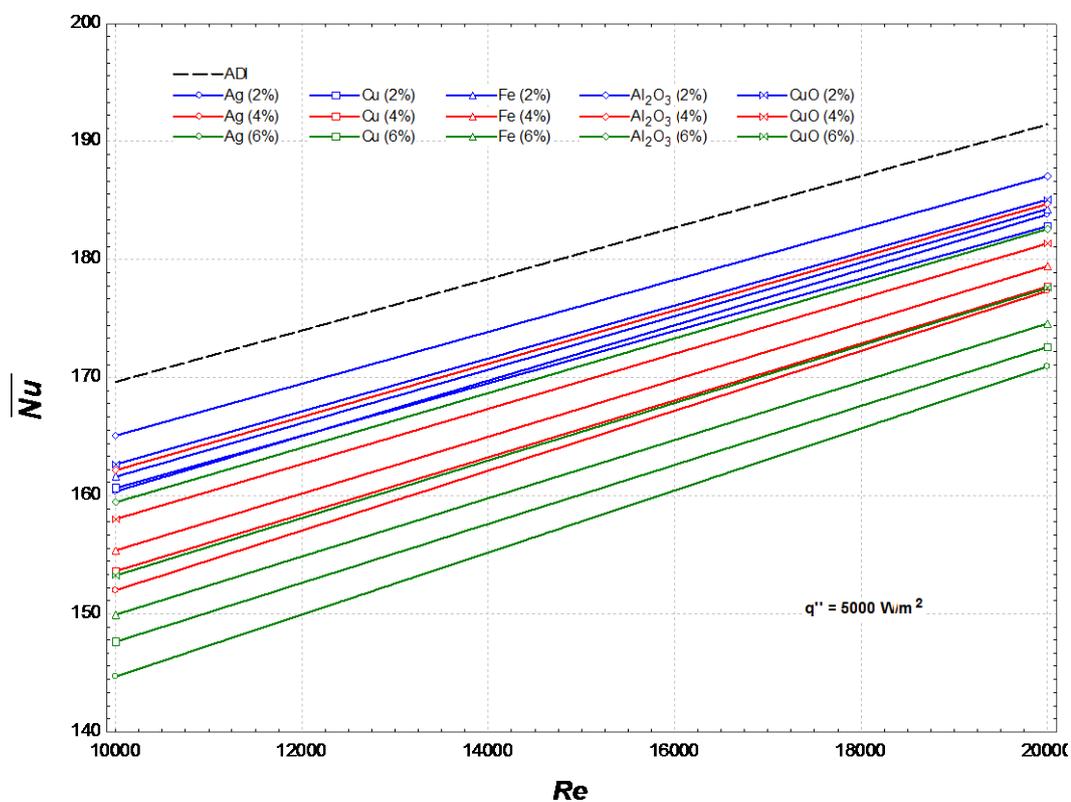


Figura 4.48. Tendencia de \overline{Nu} para nanofluidos basados en agua (régimen turbulento).

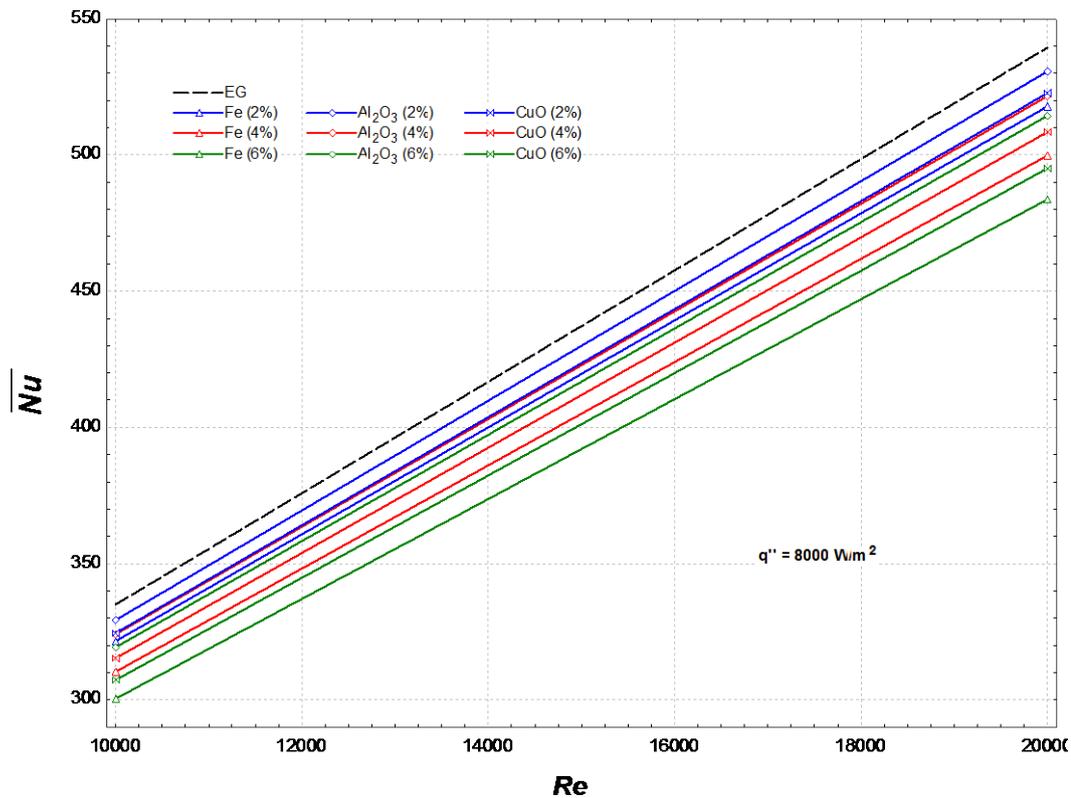


Figura 4.49. Tendencia de \overline{Nu} para nanofluidos basados en etileno glicol (régimen turbulento).

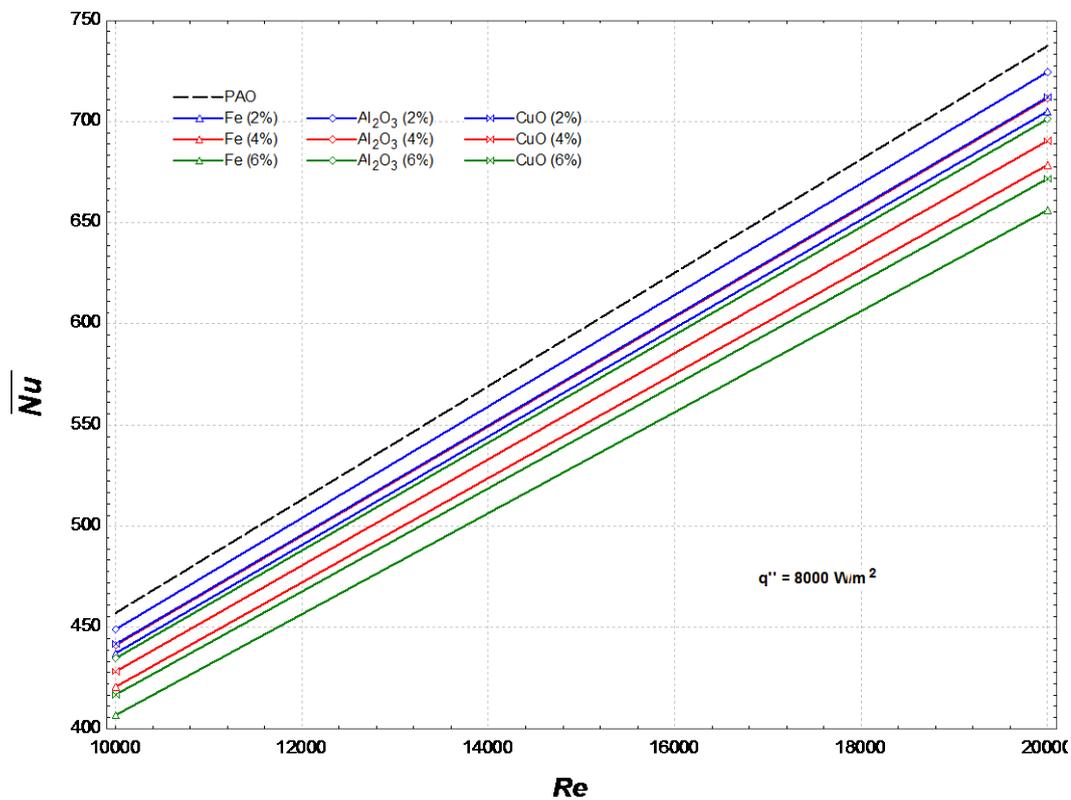


Figura 4.50. Tendencia de \overline{Nu} para nanofluidos basados en poli-alfa-olefín (régimen turbulento).

Los resultados para el número de Nusselt medio en relación con la concentración volumétrica de nanopartículas siguen una tendencia que parece discordante con el fenómeno de intensificación del coeficiente de transferencia de calor por convección. Pero haciendo un análisis con base en la correlación de Pak y Cho (1998) para convección de nanofluidos, mostrada en la Ec. (4.7), se tiene que, para un determinado número de Reynolds predefinido y fijo, el número de Nusselt es función solamente del número de Prandtl.

$$Nu_{nf} = 0,021Re^{0,8}Pr^{0,5} \quad (4.7)$$

Como fue detallado en la sub sección 4.2.1, con los modelos seleccionadas para cada propiedad, se observó que el Pr tiende a disminuir con el incremento de la concentración volumétrica de las nanopartículas. Por tanto, el número de Nusselt calculado por la correlación de Pak y Cho también presentará la misma tendencia a la disminución.

Una consecuencia del efecto de la concentración volumétrica sobre el número de Nusselt puede ser obtenida a partir de la comparación de los números de Nusselt del nanofluido y del fluido base, como es mostrado en la Ec. (4.8).

$$\frac{Nu_{nf}}{Nu_{fb}} = \frac{\frac{h_{nf}D}{k_{nf}}}{\frac{h_{fb}D}{k_{fb}}} = \frac{h_{nf}/h_{fb}}{k_{nf}/k_{fb}} \quad (4.8)$$

De los resultados mostrados en las Figs. 4.45 a 4.50 es evidente que para todos los casos, el número de Nusselt del fluido base es superior al de los nanofluidos ($Nu_{fb} > Nu_{nf}$), esto es: $\frac{Nu_{nf}}{Nu_{fb}} < 1$. De ese modo, y como fue determinado anteriormente en la Ec. (4.8), se obtiene la Ec. (4.9).

$$\frac{h_{nf}/h_{fb}}{k_{nf}/k_{fb}} < 1 \quad (4.9)$$

Lo que indica esta relación es que la intensificación del coeficiente de transferencia de calor por convección es menor que la intensificación de la conductividad térmica. Esta tendencia puede ser comprobada inclusive para aquellos casos en los cuales el valor de h disminuye (conforme lo observado en la sub sección anterior). Es importante destacar que esta conclusión tiene como base la hipótesis de que las propiedades de los nanofluidos obedecen a las estimativas dadas por los modelos seleccionados.

4.5. Caída de presión

Los valores de caída de presión fueron obtenidos como resultado de la simulación para el campo de presiones en el dominio estudiado. En la Fig. 4.51 es mostrada la tendencia de la caída de presión en régimen laminar para los nanofluidos basados en agua.

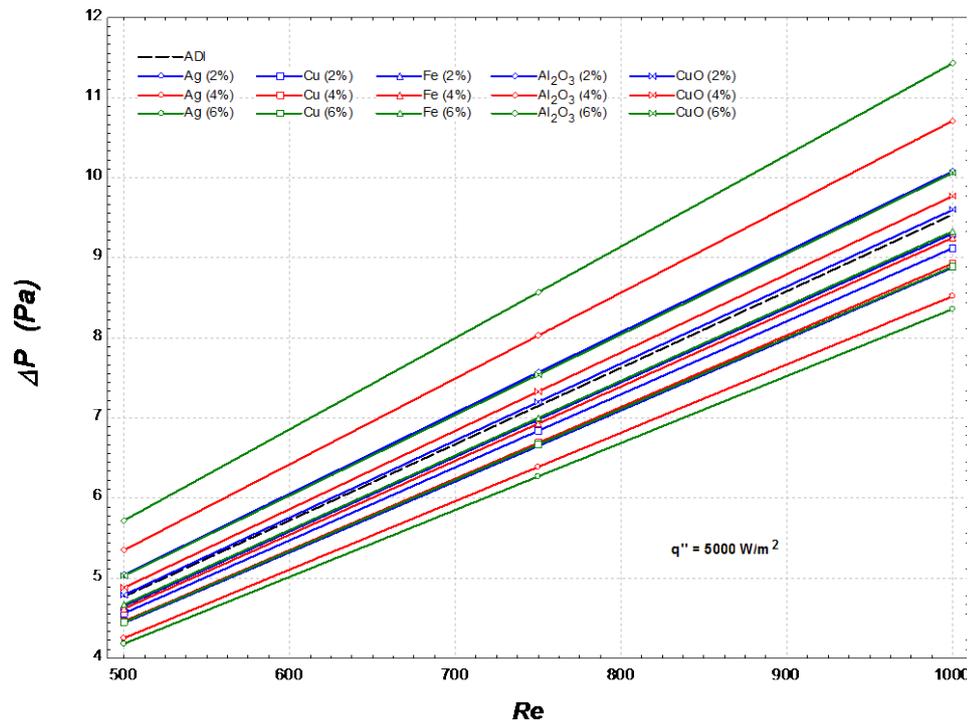


Figura 4.51. Tendencia de la caída de presión para los nanofluidos basados en agua (régimen laminar).

La Fig. 4.63 muestra en destaque el comportamiento de la tendencia de la caída de presión en régimen laminar para los nanofluidos basados en agua. Es interesante destacar que existe un incremento de la caída de presión para los nanofluidos que contienen nanopartículas de alúmina y óxido de cobre (óxidos metálicos) y una disminución de la caída de presión para las nanopartículas de plata, cobre y hierro (metales).

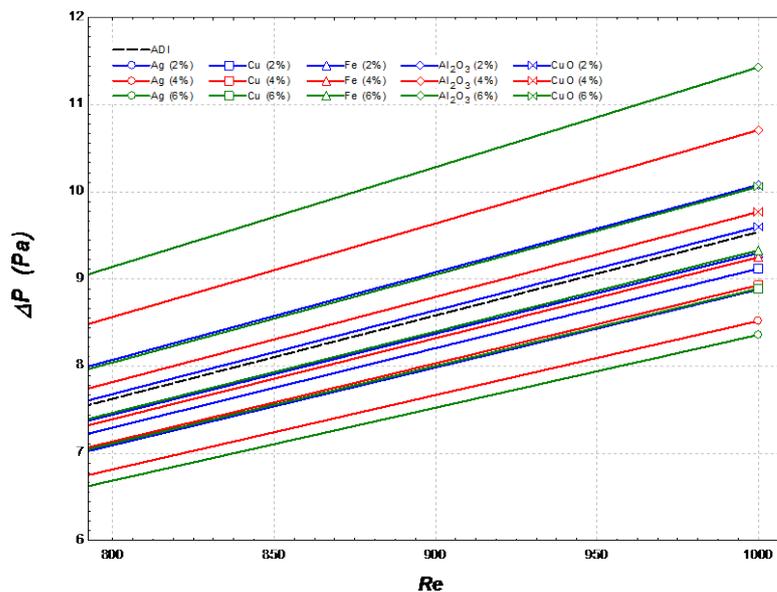


Figura 4.52. Destaque de la tendencia de la caída de presión para los nanofluidos basados en agua (régimen laminar).

Una tendencia similar es observada en la Fig. 4.64, para el caso de los nanofluidos basados en etileno glicol, en régimen laminar.

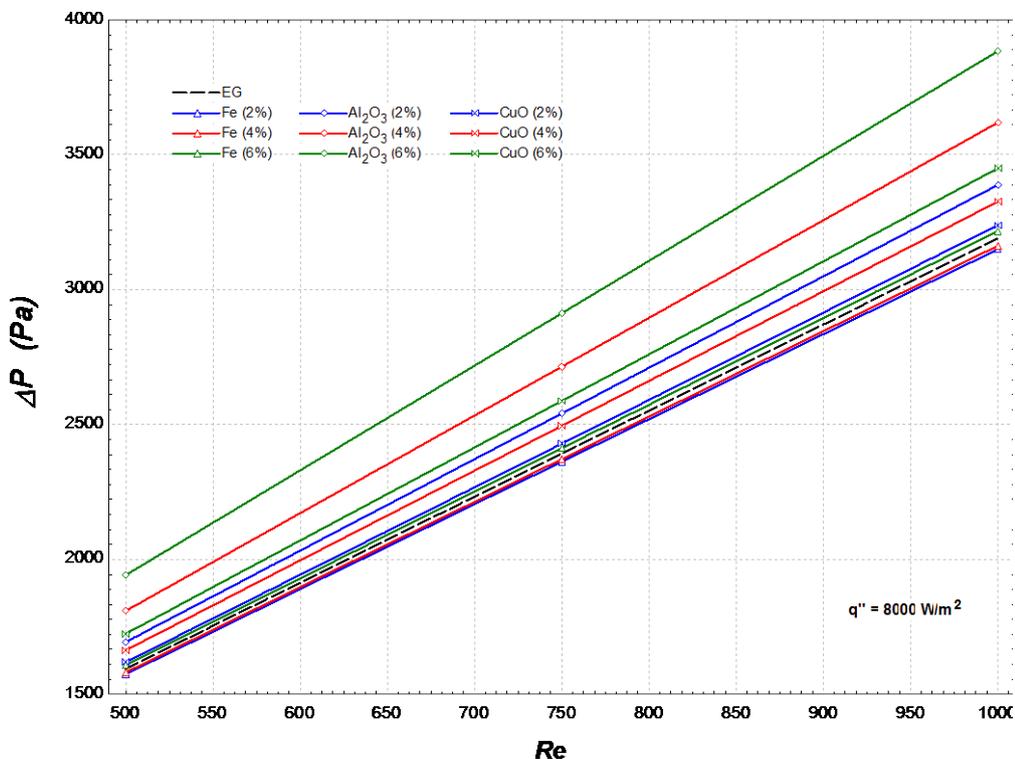


Figura 4.53. Tendencia de la caída de presión para los nanofluidos basados en etileno glicol (régimen laminar).

Para el caso de los nanofluidos basados en poli-alfa-olefín, la tendencia se mantiene para aquellos que contienen nanopartículas de alúmina, conforme lo mostrado en la fig. 4.54. En este caso, los nanofluidos que contienen óxido de cobre también muestran una disminución en la caída de presión.

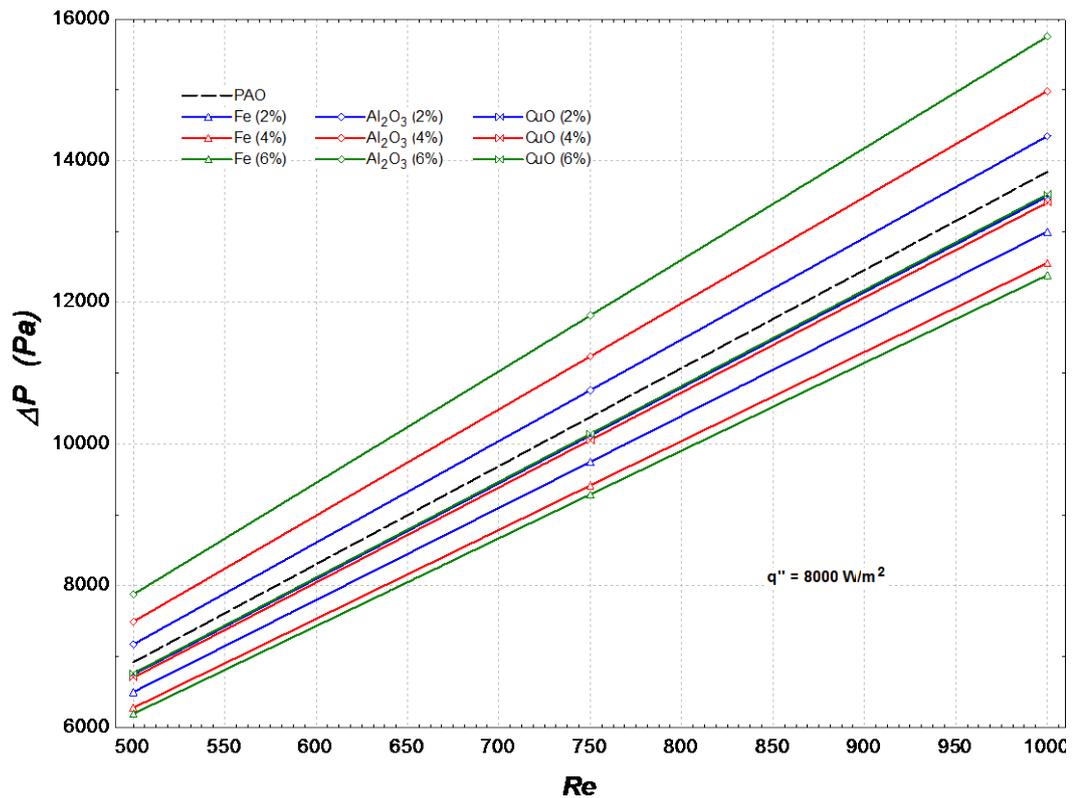


Figura 4.54. Tendencia de la caída de presión para los nanofluidos basados en poli-alfa-olefín (régimen laminar).

En régimen turbulento, los nanofluidos basados en agua muestran un comportamiento en relación con la caída de presión conforme lo ilustrado en la Fig. 4.55.

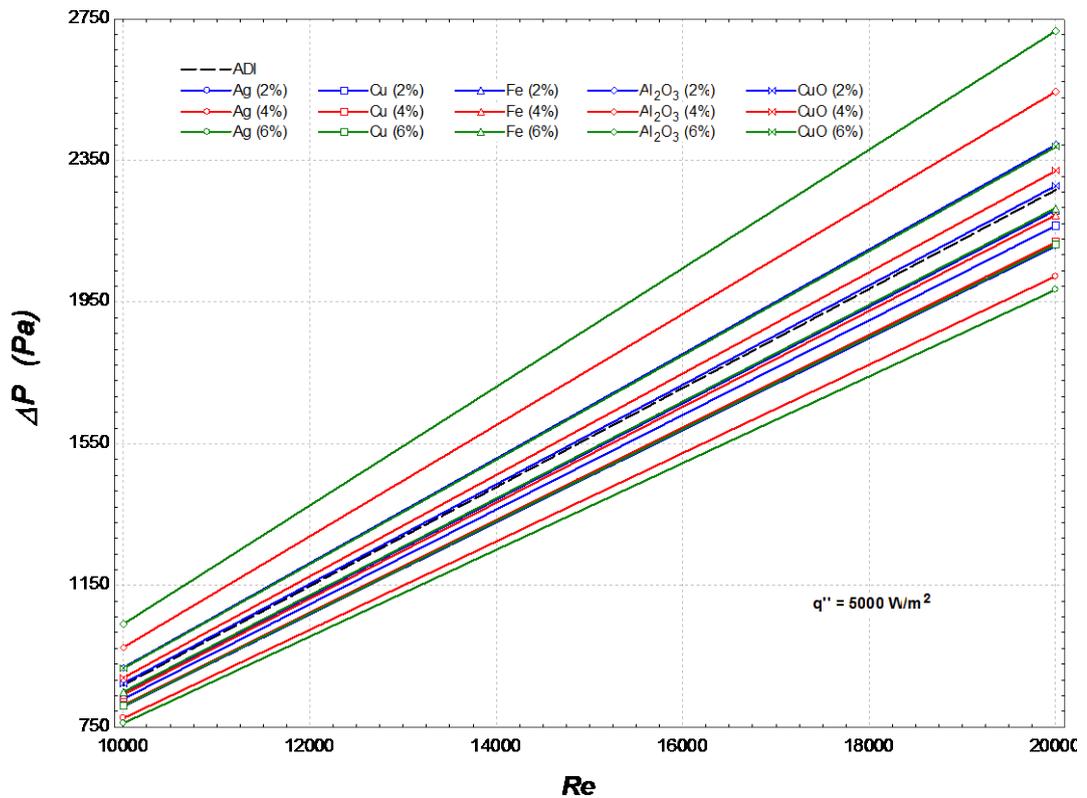


Figura 4.55. Tendencia de la caída de presión para los nanofluidos basados en agua (régimen turbulento).

En la Fig. 4.56 es mostrada en destaque la tendencia de la caída de presión para los nanofluidos basados en agua para régimen turbulento. En ella, es observado un comportamiento similar al mostrado para los mismos nanofluidos fluyendo en régimen laminar, con incrementos en la caída de presión apenas para los casos de los nanofluidos que contienen nanopartículas de óxidos metálicos.

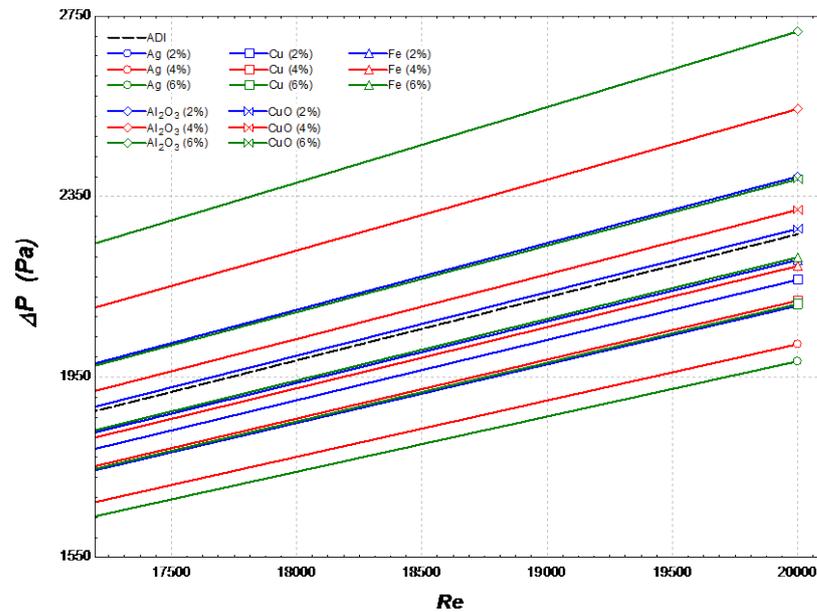


Figura 4.56. Destaque de la tendencia de la caída de presión para los nanofluidos basados en agua (régimen turbulento).

Para los nanofluidos basados en etileno glicol fluyendo en régimen turbulento, la tendencia también es similar al caso en régimen laminar, conforme lo mostrado en la Fig. 4.57.

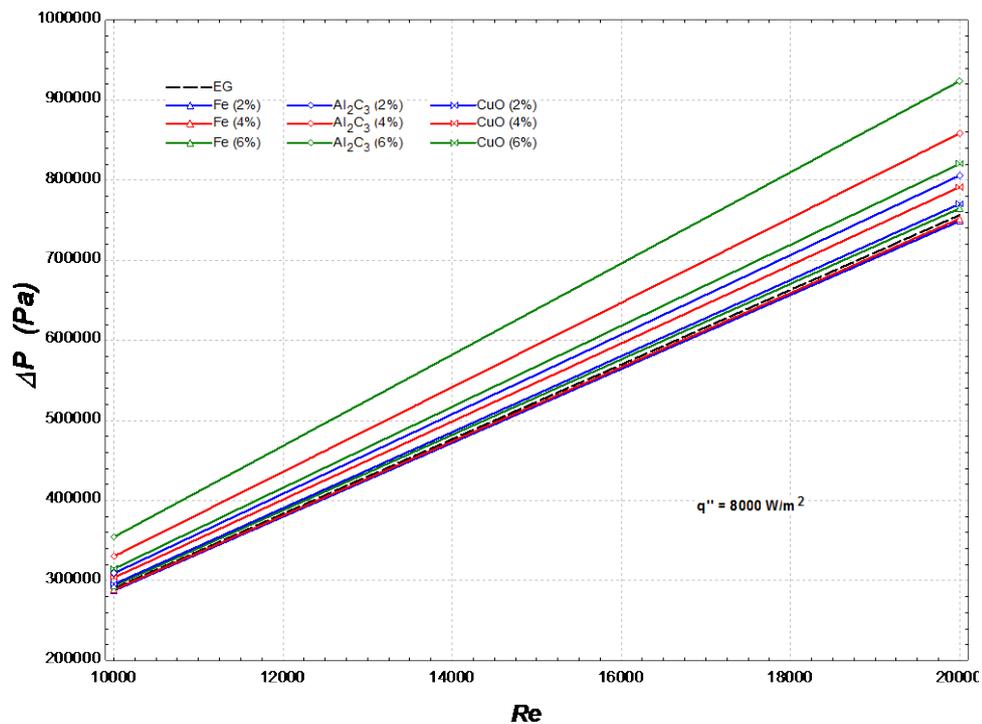


Figura 4.57. Tendencia de la caída de presión para los nanofluidos basados en etileno glicol (régimen turbulento).

En el caso de los nanofluidos basados en poli-alfa-olefín fluyendo en régimen turbulento, la tendencia mostrada en régimen laminar persiste, presentando incrementos en la caída de presión apenas para aquellos nanofluidos que contienen nanopartículas de alúmina, como es ilustrado en la Fig. 4.58.

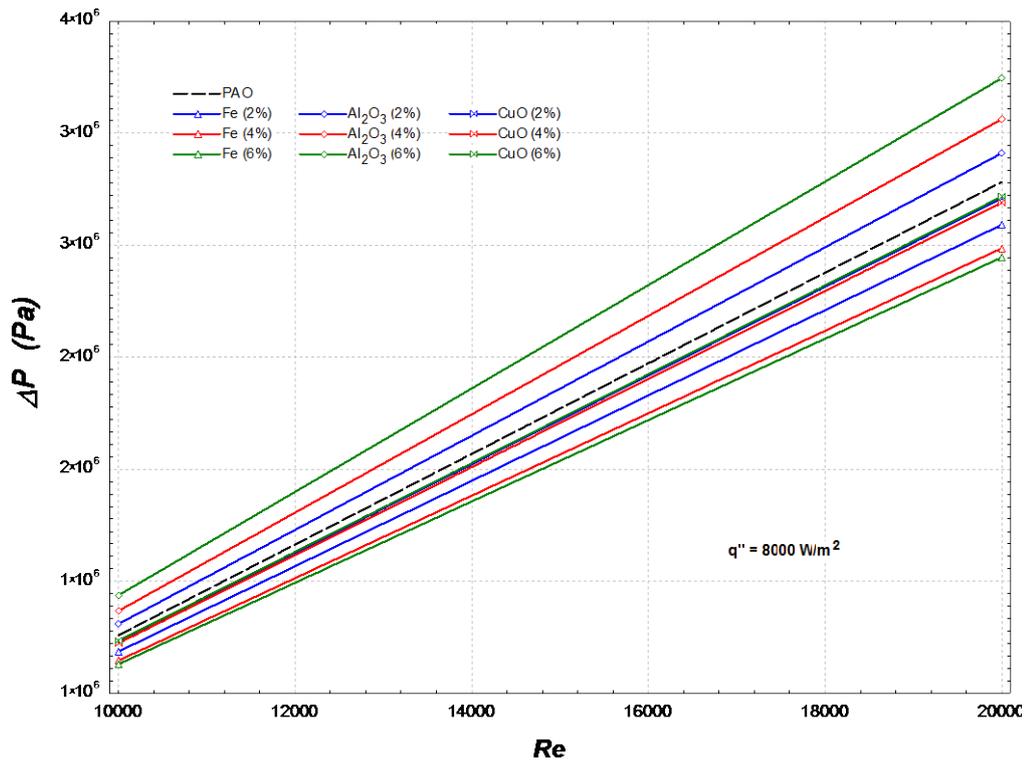


Figura 4.58. Tendencia de la caída de presión para los nanofluidos basados en poli-alfa-olefín (régimen turbulento).

Es importante destacar las altas caídas de presión observadas en régimen laminar, con valores de casi 4 kPa para los nanofluidos basados en etileno glicol y cerca de 16 kPa para nanofluidos basados en poli-alfa-olefín. En régimen turbulento la caída de presión alcanza valores máximos de poco menos de 1 MPa para los nanofluidos basados en etileno glicol y casi 4 MPa para los nanofluidos basados en poli-alfa-olefín. Tales presiones son debidas a los elevados valores de la viscosidad de los fluidos base mencionados. En ese sentido, también es

importante destacar la gran influencia que el número de Reynolds posee sobre la caída de presión.

En las Figs. 4.51 a 4.58 se observa un comportamiento aparentemente heterogéneo, tanto con el aumento de la concentración volumétrica como con la naturaleza de las nanopartículas y sus propiedades. Sin embargo, si se analiza la correlación de Darcy para el cálculo de la caída de la presión, Ec. (4.10), tanto en régimen laminar como turbulento, se puede obtener una explicación de lo observado en las figuras precedentes.

$$\Delta p = f \frac{L}{D} \frac{\rho u_m^2}{2} \quad (4.10)$$

El valor del factor de fricción puede ser determinado por la Ecs. (4.11) y (4.12) para régimen laminar y turbulento, respectivamente.

$$f = \frac{64}{Re_D} \quad (4.11)$$

$$f = [0,790 \ln(Re_D) - 1,64]^{-2}, \quad \text{para } 3000 \gtrsim Re_D \gtrsim 5 \times 10^6 \quad (4.12)$$

Siendo que para ambos casos, el factor de fricción es función del Re solamente y desarrollando la velocidad u_m también en función del Re, es obtenida la caída de presión como es mostrada en la Ec. (4.13):

$$\Delta p = f_{(Re)} \frac{L}{D} \frac{\rho \left(\frac{Re \mu}{\rho D}\right)^2}{2} = f_{(Re)} \frac{L}{D^3} \frac{Re^2 \mu^2}{2 \rho} \quad (4.13)$$

Cuando son comparadas las caídas de presión del fluido base y los nanofluidos para una determinada geometría y Re , es obtenida la expresión dada por la Ec. (4.14):

$$\frac{\Delta p_{nf}}{\Delta p_{fb}} = \frac{(\mu_{nf}/\mu_{fb})^2}{\rho_{nf}/\rho_{fb}} \quad (4.14)$$

Finalmente, se torna evidente que ocurrirá un incremento en la caída de presión siempre que la intensificación de la viscosidad sea superior al incremento de la masa específica del nanofluido. Si tal incremento fuese menor ocurrirá una disminución de la caída de presión. Este comportamiento, además de haber sido observado en las figuras de esta sección, fue comprobado a través del cálculo y comparación de las intensificaciones de la viscosidad y de la masa específica.

4.6. Resumen de los resultados

A continuación es presentado un resumen de los principales resultados obtenidos en el presente trabajo. En la Tab. 4.2 son mostrados los valores porcentuales de intensificación para la masa específica, conductividad térmica y viscosidad de los nanofluidos, así como también los porcentajes de disminución para el caso del calor específico, con base en las propiedades calculadas a partir de los modelos seleccionados en la sub sección 3.2.

Tabla 4.2. Variaciones de las propiedades de los nanofluidos.

VARIACIONES DE LAS PROPIEDADES DE LOS NANOFUIDOS						
Fluido Base	Nanopartícula	ϕ_{np} (%)	ρ (kg/m ³)	C_p (J/kg-K)	k (W/m-K)	μ (Pa-s)
F1 (ADI ¹)	N1 (Plata)	2%	19,04%	-16,68%	6,10%	5,26%
		4%	38,08%	-28,76%	12,45%	11,04%
		6%	57,12%	-37,92%	19,06%	17,34%
	N2 (Cobre)	2%	15,89%	-14,00%	6,09%	5,26%
		4%	31,78%	-24,62%	12,44%	11,04%
		6%	47,68%	-32,96%	19,06%	17,34%
	N3 (Hierro)	2%	13,79%	-12,42%	5,98%	5,26%
		4%	27,59%	-22,15%	12,21%	11,04%
		6%	41,38%	-29,99%	18,70%	17,34%
	N4 (Alúmina)	2%	5,74%	-5,83%	5,85%	5,26%
		4%	11,48%	-11,07%	11,94%	11,04%
		6%	17,23%	-15,79%	18,27%	17,34%
	N5 (Óxido de cobre)	2%	10,66%	-9,98%	5,98%	5,26%
		4%	21,31%	-18,21%	12,20%	11,04%
		6%	31,97%	-25,11%	18,68%	17,34%
F2 (EG ²)	N3 (Hierro)	2%	12,16%	-10,32%	6,06%	5,26%
		4%	24,32%	-18,62%	12,38%	11,04%
		6%	36,48%	-25,44%	18,96%	17,34%
	N4 (Alúmina)	2%	4,94%	-4,28%	6,01%	5,26%
		4%	9,88%	-8,18%	12,26%	11,04%
		6%	14,83%	-11,74%	18,77%	17,34%
	N5 (Óxido de cobre)	2%	9,35%	-8,09%	6,06%	5,26%
		4%	18,70%	-14,90%	12,37%	11,04%
		6%	28,04%	-20,72%	18,95%	17,34%
F3 (PAO ³)	N3 (Hierro)	2%	17,94%	-13,54%	6,09%	5,26%
		4%	35,88%	-23,50%	12,42%	11,04%
		6%	53,82%	-31,14%	19,03%	17,34%
	N4 (Alúmina)	2%	7,77%	-5,58%	6,05%	5,26%
		4%	15,55%	-10,41%	12,35%	11,04%
		6%	23,32%	-14,63%	18,91%	17,34%
	N5 (Óxido de cobre)	2%	13,98%	-10,64%	6,08%	5,26%
		4%	27,96%	-18,96%	12,42%	11,04%
		6%	41,94%	-25,64%	19,02%	17,34%

¹ ADI: agua deionizada; ² EG: etileno glicol; ³ PAO: poli-alfa-oleofin.

Finalmente, en las Tabs. 4.3, 4.4 y 4.5, son mostrados los porcentajes de intensificación del coeficiente medio de transferencia de calor por convección para los nanofluidos basados en agua, etileno glicol y poli-alfa-olefín, respectivamente.

Tabla 4.3. Intensificación del valor de \bar{h} para los nanofluidos basados en agua, agrupados por tipo de nanopartícula utilizada.

Re	$\Delta\bar{h}$ (%)														
	Plata			Cobre			Hierro			Alúmina			Óxido de cobre		
	$\phi_{np}=2\%$	$\phi_{np}=4\%$	$\phi_{np}=6\%$	$\phi_{np}=2\%$	$\phi_{np}=4\%$	$\phi_{np}=6\%$	$\phi_{np}=2\%$	$\phi_{np}=4\%$	$\phi_{np}=6\%$	$\phi_{np}=2\%$	$\phi_{np}=4\%$	$\phi_{np}=6\%$	$\phi_{np}=2\%$	$\phi_{np}=4\%$	$\phi_{np}=6\%$
500	0,92%	3,08%	5,92%	1,55%	4,26%	7,55%	1,94%	4,88%	8,27%	3,68%	8,07%	12,69%	2,63%	6,09%	9,95%
750	0,20%	1,77%	4,31%	1,01%	3,16%	5,87%	1,48%	3,94%	6,88%	3,46%	7,53%	12,01%	2,22%	5,31%	8,72%
1000	-0,12%	1,07%	3,29%	0,71%	2,61%	5,06%	1,22%	3,46%	6,12%	3,29%	7,38%	11,59%	2,03%	4,94%	8,13%
10000	0,30%	0,74%	1,55%	0,47%	1,82%	3,61%	0,98%	2,78%	4,91%	3,01%	7,01%	11,16%	1,62%	4,52%	7,21%
20000	1,88%	4,16%	6,32%	1,33%	4,38%	7,34%	2,02%	5,18%	8,25%	3,44%	8,00%	12,80%	2,45%	6,29%	10,10%

Tabla 4.4. Intensificación del valor de \bar{h} para los nanofluidos basados en etileno glicol, agrupados por tipo de nanopartícula utilizada.

Re	$\Delta\bar{h}$ (%)								
	Hierro			Alúmina			Óxido de cobre		
	$\phi_{np}=2\%$	$\phi_{np}=4\%$	$\phi_{np}=6\%$	$\phi_{np}=2\%$	$\phi_{np}=4\%$	$\phi_{np}=6\%$	$\phi_{np}=2\%$	$\phi_{np}=4\%$	$\phi_{np}=6\%$
500	1,53%	4,05%	6,93%	3,76%	8,21%	12,94%	2,40%	5,58%	9,11%
750	1,62%	4,08%	6,96%	3,81%	8,26%	12,97%	2,42%	5,66%	9,14%
1000	1,55%	4,04%	6,89%	3,73%	8,16%	12,94%	2,35%	5,58%	9,04%
10000	1,80%	4,10%	6,68%	4,19%	8,60%	13,20%	2,73%	5,77%	9,10%
20000	1,82%	4,12%	6,67%	4,29%	8,55%	13,26%	2,78%	5,91%	9,17%

Tabla 4.5. Intensificación del valor de \bar{h} para los nanofluidos basados en poli-alfa-oleofín, agrupados por tipo de nanopartícula utilizada.

Re	$\Delta \bar{h}$ (%)								
	Hierro			Alúmina			Óxido de cobre		
	$\phi_{np}=2\%$	$\phi_{np}=4\%$	$\phi_{np}=6\%$	$\phi_{np}=2\%$	$\phi_{np}=4\%$	$\phi_{np}=6\%$	$\phi_{np}=2\%$	$\phi_{np}=4\%$	$\phi_{np}=6\%$
500	0,34%	1,95%	4,17%	3,29%	7,42%	11,84%	1,46%	3,92%	6,88%
750	0,41%	2,08%	4,29%	3,38%	7,46%	11,92%	1,51%	4,02%	6,99%
1000	0,49%	2,16%	4,49%	3,40%	7,52%	11,98%	1,54%	4,12%	7,08%
10000	1,45%	3,44%	5,88%	4,16%	8,44%	13,08%	2,50%	5,29%	8,51%
20000	1,44%	3,45%	5,93%	4,19%	8,40%	13,07%	2,43%	5,27%	8,43%

De la Tab. 4.3, se nota que la mayor intensificación de la transferencia de calor, en ambos regímenes laminar y turbulento, ocurre con el uso del nanofluido de agua y nanopartículas de alúmina, seguido por los nanofluidos de agua con nanopartículas de óxido de cobre, hierro, cobre y plata, respectivamente. En general, es apreciado el incremento de las intensificaciones con el aumento de la concentración volumétrica de las nanopartículas.

En el caso de los nanofluidos con nanopartículas de plata fluyendo en régimen laminar, fue obtenida una disminución en la intensificación de la transferencia de calor. Esto puede deberse, principalmente, al efecto de su gran masa específica, cuando es comparada con la de las demás nanopartículas.

En la Tab. 4.4 también son visibles las mayores intensificaciones en la transferencia de calor en los nanofluidos basados en etileno glicol con nanopartículas de alúmina. En segundo lugar están los nanofluidos con óxido de cobre, y finalmente los nanofluidos con nanopartículas de hierro. En estos nanofluidos las intensificaciones aumentan con el incremento de la concentración volumétrica de las nanopartículas.

En la Tab. 4.5 se notan mayores intensificaciones en los casos de los nanofluidos basados en poli-alfa-olefín con nanopartículas de alúmina, seguidos por los nanofluidos con nanopartículas de óxido de cobre y hierro, respectivamente. En este caso es importante destacar la alta viscosidad del poli-alfa-olefín (sobre todo en comparación con el agua).

Para los casos de nanofluidos en régimen laminar presentados en las Tabs. 4.3 a 4.5, se notaron intensificaciones de la transferencia de calor con el aumento de la concentración volumétrica de nanopartículas y con el aumento del Re . En régimen turbulento, la tendencia de aumento de la intensificación también es mantenida con esas mismas premisas.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Para todos los nanofluidos estudiados, y con base en los modelos descritos en el desarrollo del presente trabajo, se observaron los siguientes efectos sobre sus propiedades en el rango de concentraciones dado:

- La intensificación de la masa específica fue superior para los nanofluidos que contienen nanopartículas metálicas (plata, cobre y hierro), en comparación con los nanofluidos que utilizan nanopartículas de óxido metálicos (óxido de cobre y alúmina), y se ve incrementada con el aumento de la concentración volumétrica de las nanopartículas. El mayor valor obtenido fue de 57,12% de intensificación de la masa específica para el nanofluido con agua como fluido base y nanopartículas de plata al 6% de concentración volumétrica.
- La disminución del calor específico se mostró mayor para los nanofluidos compuestos por nanopartículas metálicas, con tendencia a decrecer con el incremento de la concentración volumétrica. Como ejemplo, las nanopartículas de hierro consiguieron disminuciones máximas de 30%, 25,44% y 31,14% para los nanofluidos basados en agua, etileno glicol y poli-alfa-olefín, respectivamente. En contraste, las disminuciones debidas a la dispersión de

nanopartículas de alúmina fueron de 15,79%, 11,74% y 14,63% para los mismos fluidos base, a la misma concentración volumétrica de 6%.

- La intensificación de la conductividad térmica alcanzó valores próximos entre sí, sobre todo en los casos que presentan conductividades térmicas relativas similares, y tiende a aumentar con el incremento de la concentración volumétrica de nanopartículas. Así, todos los nanofluidos presentaron intensificaciones cercanas a 6%, 12% y 19%, en el orden correspondiente al aumento de la concentración volumétrica de nanopartículas, esto es, 2%, 4% y 6%.
- La intensificación de la viscosidad mantiene la tendencia de incremento con el aumento de la concentración volumétrica de nanopartículas. Este puede ser el resultado menos consistente, pues el modelo utilizado desconsidera la naturaleza de la fase sólida de los nanofluidos.

A pesar de que la gran mayoría de investigaciones trata el efecto aislado del incremento de la conductividad térmica sobre la intensificación de la transferencia de calor, durante el desarrollo de este trabajo, fue evidente que tal intensificación se debió también a las variaciones de las demás propiedades de los nanofluidos. En ese sentido, es interesante resaltar la importancia de números adimensionales como el Pr y otros parámetros como la difusividad térmica, en la tentativa de determinar el efecto combinado de las variaciones de las propiedades de los nanofluidos.

Referido al coeficiente de transferencia de calor por convección, para todas las simulaciones realizadas fue obtenida la mayor intensificación con el uso de nanofluidos que contenían nanopartículas de alúmina. Tal intensificación tiende a

disminuir para los nanofluidos compuestos por nanopartículas de óxido de cobre, hierro, cobre y plata, en ese orden.

Este comportamiento difiere de la consideración inicial que apuntaba a la intensificación del coeficiente de transferencia de calor por convección como consecuencia directa del incremento de la conductividad térmica. En tal sentido, la influencia de la masa específica y del calor específico, como factores relevantes en la transferencia de calor por convección bajo las condiciones del presente trabajo, parece ser mayor de lo esperado. Un análisis más detallado es necesario para confirmar esta hipótesis. Es importante destacar que el calor específico sigue el mismo orden de aumento que el coeficiente de transferencia de calor, mientras que la masa específica sigue el orden inverso.

Se debe tomar en consideración que la base para el desarrollo de este trabajo se encuentra en los modelos utilizados para la determinación de las propiedades modificadas de los nanofluidos (siendo estos los más conservadores), y que las simulaciones numéricas fueron realizadas sobre la hipótesis de un flujo monofásico (sin interacción entre las fases del nanofluido).

En relación al comportamiento dinámico de los flujos, la intensificación del coeficiente de calor por convección tiende a aumentar ligeramente con el incremento del número de Reynolds. Este comportamiento es más visible para los nanofluidos basados en agua y etileno glicol, mientras que para los nanofluidos basados en poli-alfa-olefín, aunque mantenida, la tendencia es mucho menos acentuada.

También es importante destacar que la intensificación de la conductividad térmica fue mayor que la intensificación del coeficiente de transferencia de calor por convección en todos los casos estudiados. Esto confirma lo explicado en el capítulo anterior acerca de la influencia en la disminución del número de Nusselt.

En lo que respecta a la caída de presión, se destaca la intensificación obtenida para todos los nanofluidos con nanopartículas de alúmina. Este comportamiento es consistente con lo esperado y solamente es replicado para los nanofluidos basados en agua y etileno glicol con nanopartículas de óxido de cobre. Sin embargo, y conforme a lo desarrollado en la parte final del capítulo anterior para las condiciones definidas del problema, la variación de la caída de presión es función del cuadrado de la intensificación de la viscosidad y del inverso de la intensificación de la masa específica.

Para futuros trabajos, se sugieren las siguientes consideraciones, con el fin de ampliar los objetivos del presente trabajo:

- En lo posible, adoptar la estructura general de la metodología usada en el presente trabajo; esto es: determinación de las propiedades modificadas de los nanofluidos y construcción de un *banco de propiedades*, definición de las condiciones físicas del problema a analizar, simulación de los flujos, procesamiento de datos y variación de las condiciones físicas y propiedades de los nanofluidos.
- Utilizar modelos más complejos para la determinación de las propiedades de los nanofluidos, que permitan una mejor descripción de los fenómenos físicos que ocurren en la intensificación de las mismas, especialmente para la conductividad térmica y la viscosidad y, de ser posible, emplear valores medidos experimentalmente para fines de comparación.
- Simular el flujo de nanofluidos bajo diferentes condiciones de entrada, como por ejemplo: flujo volumétrico constante, velocidad de entrada constante. En estos casos, es esperado que la variación en el número de Reynolds no sea tan drástica, y se obtengan valores de caída de presión más coherentes.

- Validar los resultados del presente trabajo mediante la utilización de un banco de experimentación según las condiciones presentadas aquí, con la intención de obtener un modelo semi-empírico de cálculo de la transferencia de calor.

BIBLIOGRAFÍA

ANSYS. **CFX-Pre User's Guide**. Release 12.0. ANSYS, Inc. abr, 2009.

BATCHELOR, G.K. The Effect of Brownian Motion on the Bulk Stress in a Suspension of Spherical Particles, **Journal of Fluid Mechanics**, V.83, p. 97-117, 1977.

BENVENSITE, Y., Effective Thermal Conductivity of Composites with a Thermal Contact Resistance between the Constituents: Nondilute Case, **Journal of Applied Physics**, v.61, p. 2840-2843, 1987.

BHATTI, M.S.; SHAH, R.K. **Handbook of Single-phase Convective Heat Transfer**, c.4, Ed. Wiley-Interscience, New York, 1987.

BIANCO, V.; CHIACCHIO, F.; MANCA, O.; NARDINI, S. Numerical investigation of nanofluids forced convection in circular tubes, **Applied Thermal Engineering**, v.29, n.18, p. 3632 – 3642, jun. 2009.

BRINKMANN, H. C. The viscosity of concentrated suspensions and solutions. **The Journal of Chemical Physics**, v.20, p. 571-573, mai. 1952.

BRUGGEMAN, D.A.G. Berechnung Verschiedener Physikalischer Konstanten von Heterogenen Substanzen, I. Dielektrizitätskonstanten und Leitfähigkeiten der Mischkörper aus Isotropen Substanzen. **Annalen der Physik**, v.24, p. 636–679, 1935.

BRUIJIN, H. The viscosity of suspensions of spherical particles, **Recueil des Travaux Chimiques des Pays-Bas**, v.61, p. 863-874, abr. 1942.

BUONGIORNO, J.; HU, L.W.; APOSTOLAKIS, G.; HANNINK, R.; LUCAS, T.; CHUPIN, A. A feasibility assessment of the use of nanofluids to enhance the in-

vessel retention capability in light-water reactors, **Nuclear Engineering and Design**, v.239, n.5, p. 831-964, mai. 2009.

BUONGIORNO, J.; et. al. (2010). The international nanofluid property benchmark exercise. **Journal of Applied Physics**, v.106, n. 0943121, p. 1-14, fev. 2010.

ÇENGEL, Y.A. **Transferência de calor e massa: uma abordagem prática**, 3.ed., São Paulo, McGraw-Hill, 2009.

CHANG H.; TSUNG, T.T.; CHEN, L.C.; TANG Y.C.; LIN, H.M.; LIN, C.K.; JWO, C.S. Nanoparticle suspension preparation using the arc spray nanoparticle synthesis system combined with ultrasonic vibration and rotating electrode. **The international journal of advanced manufacturing technology**, v.26, p. 552-558, nov. 2003.

CHEN, H., YANG, W., HE, Y., DING, Y., ZHANG, L., TAN, C., LAPKIN, A., BAVYKIN, D., Heat transfer and flow behaviour of aqueous suspensions of titanate nanotubes (nanofluids), **Powder Technology**, v.183, p. 63-72, 2008.

CHEN, J.; HAMON, M.A.; HU, H.; CHEN, Y.; RAO, A.M.; EKLUND, P.E; HADDON, R.C. Solution Properties of Single-Walled Carbon Nanotubes, **Science**, v.2, n.5386, p.95-98, 1998.

CHEVALIER, J.; TILLEMENT, O.; AYELA, F. Rheological properties of nanofluids flowing through microchannels. **Applied Physics Letters**, v.91, n.23, p. 233103, jan. 2007.

CHOI, S.U.S.; ZHANG, Z. G.; YU, W.; LOCKWOOD, F. E.; GRULKE, E. A. Anomalous thermal conductivity enhancement in nanotube suspensions. **Applied Physics Letters**, v.79, n.14, p.2252, 2001.

COLBURN, A.P. A method of correlating forced convection heat transfer data and a comparison with liquid fraction. **Transactions of the AIChE**, v.29, p. 174–210, 1933.

EASTMAN, J.A.; CHOI, S.U.S., Anomalous increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles, **Applied Physics Letters**, v.78, p. 718-720, out. 2001.

EASTMAN, J.A.; PHILLPOT, S.R.; CHOI, S.U.S.; KEBLINSKI, P. Thermal Transport in Nanofluids1. **Annual Review of Materials Research**, v.34, n.1, p. 219-246, 2004.

EIJKEL, J.C.T.; BERG, A. Nanofluidics: what is it and what can we expect from it? **Microfluid. Nanofluid.** v.1 p. 249–267, 2005.

EINSTEIN, A.; Eine neue Bestimmung der Moleküldimensionen, **Ann. Der Physik**, v.19, p. 289, dec. 1906.

DITTUS F. W.; BOELTER L. M. K. Heat Transfer in Automobile Radiators of Tubular Type, University of California Publications in Engineering 2, p. 443, 1930.

FEYNMAN, R.P. There's plenty of room at the bottom. In: ANNUAL MEETING OF THE AMERICAN PHYSICAL SOCIETY, 1959. **Journal of Microelectromechanical Systems**, v.1, n.1, p. 60-66, mar. 1992.

FLUENT INC. **Fluent 6 User's Guide**. New York, 2006.

FOTUKIAN, S.M., ESFAHANY, M.N., Experimental study of turbulent convective heat transfer and pressure drop of dilute CuO/water nanofluid inside a circular tube”, **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v.37, p. 214–219, 2010.

FONSECA, H.M. **Caracterização termofísica de nanofluidos**, 2010, 93 f., Dissertação de mestrado –Universidade Federal do Rio de Janeiro.

FRICKE, H. A Mathematical treatment of the Electric Conductivity and Capacity of Disperse Systems: I. The Electric Conductivity of a suspension of Homogeneous Spheroids, **Physical Review**, v.24, p. 575-587, 1924.

GRANQVIST, C.G.; HUNDERI, O. Conductivity of Inhomogeneous Materials: Effective-Medium Theory with Dipole-Dipole Interaction, **Physical Review B**, v.18, p. 1554-1562, 1978.

GUO, Z.; LIANG, X.; PEREIRA, T.; SCAFFARO, H.; HAHN, T. CuO nanoparticle filled vinyl-ester resin nanocomposites: Fabrication, characterization and property analysis. **Composites Science and Technology**, v.67, p. 2036-2044, jan. 2007.

HAMILTON, R. L.; CROSSER, O. K. Thermal conductivity of heterogeneous two-component systems, **I & EC Fundamentals I**, 1962.

HENDERSON, J.R.; SWOL, F.V. On the interface between a fluid and a planar wall: theory and simulations of a hard sphere fluid at a hard wall. **Molecular Physics**. v.51, p.991-1010, 1984.

HERIS, S.Z.; ESFAHANY, N.M.; ETEMAD, S.G. Experimental investigation of convective heat transfer of Al₂O₃/water nanofluid in circular tube. **International Journal of Heat and Fluid Flow**, v.28, p. 203-210, 2007.

HOLM, C.; WEIS, J.-J. The structure of ferrofluids: A status report. **Current Opinion in Colloid and Interface Science**, v.10, p. 133-140, ago. 2005.

INCROPERA, F.P.; DEWITT, D.P. **Fundamentos de Transferência de calor e Massa**, 6. ed., LTC, New York, 2002.

JANG, S.P.; CHOI, S.U.S. Role of Brownian motion in the enhanced thermal conductivity of nanofluids. **Applied Physics Letters**, v.84, p. 4316-4318, 2004.

JOSHI, A.A.; MAJUMDAR, A. Transient ballistic and diffusive phonon heat transport in thin films. **Journal of Applied physics**, v.74, p. 31-39, 1993.

KEBLINSKI, P., EASTMAN, J., CAHILL, D. Nanofluids for thermal transport. **Materials today**, v.8, n.6, p. 36-44, jun. 2005.

KEBLINSKI, P., PHILLPOT, S.R., CHOI S.U.S., EASTMAN, J.A. Mechanisms of heat flow in suspensions of nano-sized particles (nanofluids). **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v.45, n.4, p. 855-863, jan. 2002.

KERNER, E.H. The Electrical Conductivity of Composite Media. **Proceedings of the Physical Society**, B69, p. 802-807, 1956.

KOO, J.; KLEINSTREUER, C. A new thermal conductivity model for nanofluids. **Nanoparticles Research**, v.6, p. 577-588, 2005.

KUMAR, D.H; PATEL, H.E.; KUMAR, V.R.R.; SUNDARARAJAN, T.; PRADEEP, T.; DAS, K.D. Model for heat conduction in nanofluids, **Physical Review Letters**, v.93, n.14, p. 144301-1:4, out. 2004.

LAMB, W., WOOD, D.M., ASHCROFT, N.W., Optical properties of small particle composites: Theories and applications, ed. Garland & Tanner, **American Institute of Physics**, New York, p. 240-255, 1978.

LEONG, K.C.; YANG, C.; MURSHED, S.M.S. A model for the thermal conductivity of nanofluids – the effect of interfacial layer. **Journal of Nanoparticle Research**, v.8, n.2, p. 245-254, 2006.

LI, C.; PETERSON, G. Mixing effect on the enhancement of the effective thermal conductivity of nanoparticle suspensions (nanofluids). **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v.50, p.4668-4677, 2007.

LIU, M.-S., LIN, M.-C., TSAI, C.Y., WANG, C.-C., Enhancement of thermal conductivity with Cu of nanofluids using chemical reduction method, **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v.21, p. 58-64, ago. 2006.

LO, C.H., TSUNG, T.T., CHEN, L.C. Shaped-controlled synthesis of Cu-based nanofluid using submerged arc nanoparticle synthesis system (SANSS). **Journal of Crystal Growth**, v. 277, p. 636-642, abr. 2005a.

LO, C.H., TSUNG, T.T., CHEN, L.C., SU, C.H., LIN, H.M. Fabrication of copper oxide nanofluid using submerged arc nanoparticle synthesis system (SANSS). **Journal of Nanoparticle Research**, v.7, n.2, pp. 313-320, jun. 2005b.

MAXWELL, J.C., **A treatise on Electricity and Magnetism**, 2nd. Ed., Oxford University Press, Cambridge, 1873.

MAÏGA, S.E.B; NGUYEN, C.T.; GALANIS, N.; ROY, G. Heat transfer behaviours of nanofluids in a uniformly heated tube. **Superlattices and Microstructures**, v.35, n.3, p. 543 – 557, 2004.

MURSHED, S.M.S.; LEONG, K.C.; YANG, C. Enhanced thermal conductivity of TiO₂-water based nanofluids. **International Journal of Thermal Sciences**, v.44, n.4, p. 367-373, 2005.

MURSHED, S.M.S.; LEONG, K.C.; YANG, C. Thermophysical and electrokinetic properties of nanofluids – A critical review. **Applied Thermal Engineering**, v.28, n.17, p. 2109-2125, jan. 2008.

NI, F., GU, G.Q., CHEN, K.M. Effective Thermal Conductivity of nonlinear composite media with contact resistance, **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 40, n.4, p. 943-949, 1997.

PAK, B.C.; CHO, Y.I. Hydrodynamic and Heat Transfer Study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particle, **Experimental Heat Transfer**, v.11, p.151-170, 1998.

PATEL, H.E.; DAS, S.K.; SUNDARARAJAN, T.; SREEKUMARAN, N.A.; GEORGE, B.; PRADEEP, T. Thermal conductivities of naked and monolayer protected metal nanoparticle based nanofluids: Manifestation of anomalous enhancement and chemical effects. **Applied Physics Letters**, v.83, n.14, p. 2931, 2003.

PETUKHOV B. S. Heat Transfer and Fluid Friction in Turbulent Pipe Flow with Variable Physical Properties, **Advanced Heat Transfer**, v.6, p. 503-264, 1970.

PHUOC, T. X.; MASSOUDI, M. Experimental observations of the effects of shear rates and particle concentration on the viscosity of Fe₂O₃-deionized water nanofluids. **International Journal of Thermal Sciences**, v.48, n.7, p. 1294-1301, dec. 2008.

PRASHER, R.; EVANS, W.; MEAKIN, P.; FISH, J.; PHELAN, P.; KEBLINSKI, P. Effect of aggregation on thermal conduction in colloidal nanofluids. **Applied Physics Letters**, v. 89, n.14, p. 143119, out. 2006a.

PRASHER, R.; BATTACHARYA, P.; PHELAN, P.E. Brownian-motion-based convective-conductive model for the thermal conductivity of nanofluids. **Transactions of the ASME, Journal of Heat Transfer**, v.128, n.6, p. 588-596, jun. 2006b.

RAYLEIGH, L. On the influence of obstacles arranged in rectangular order upon the properties of a medium, **Philosophy Magazine**, v.34, p. 481, 1892.

REA, U.; MCKRELL, T.; HU, L.-W.; BUONGIORNO, J. Laminar convective heat transfer and viscous pressure loss of alumina-water and zirconia-water nanofluids. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v.52, p.2042-2048, 2009.

ROETZEL, W., XUAN, Y., Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids, **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v.43, p. 3701-3707, 2000.

SIEDER, E.N.; TATE, G.E. Heat Transfer and Pressure Drops of Liquids in Tubes, **Ind. Eng. Chem.**, v.28, p. 1429-1436, 1936.

SQUIRES, T.M.; QUAKE, S.R. Microfluidics: fluid physics at the nanoliter scale. **Review of Modern Physics**, v.77, p. 126-977, 2005.

TSUNG, T.T.; CHANG, H.; CHEN, L.C.; HAN, L.L.; LO, C.H.; LIU, M.K. Development of pressure control technique of an arc-submerged nanoparticle

synthesis system (ASNSS) for copper nanoparticle fabrication. **Materials Transactions**, v.44, n.6, p.1138-1142, mai. 2003.

VALDERRAMA, E. R. **Modelagem do uso de nanofluidos no sistema de arrefecimento de motores a combustão interna**, 2010, 97 f., Dissertação de mestrado – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

VENERUS, D.C.; ET AL. (2010). Viscosity Measurements on Colloidal Dispersions (Nanofluids) for Heat Transfer Application. **Applied Rheology**, v.20, n.4, 44582, 1-7, fev. 2010.

VAND, V. Viscosity of Solutions and Suspensions I: Theory, **Journal of Physical and Colloid Chemistry**, v.52, p. 277-299, out. 1948.

WANG, X.; XU, X.; CHOI, S.U.S. Thermal conductivity of nanoparticle-fluid mixture. **Journal of Thermophysics and Heat Transfer**, v.13, n.4, p. 474-480, out. 1999.

WANG, B.-X.; ZHOU, L.-P.; PENG, X.-F. A fractal model for predicting the effective thermal conductivity of liquid with suspension of nanoparticles. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v.46, n.14, p. 2665-2672, jul. 2003.

WEN D.; LIN G.; VAFAEI S.; ZHANG K. Review of nanofluids for heat transfer applications. **Particuology**, v.7, n.2, p. 141–150, 2009.

WIENER, O., Die Theorie des Mischkörpers für das Feld der stationären Strömung. **Der Abhandlungen der Mathematisch-Physischen Klass der Königlich Sächsischen Gesellschaft der Wissenschaften**, v.32, pp. 507-604, 1912.

XIE, H.; FUJII, M.; ZHANG, X. Effect of interfacial nanolayer on the effective thermal conductivity of nanoparticle-fluid mixture. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v.48, n.14, p. 2926-2932, 2005.

XUAN, Y.; LI, Q. Heat transfer enhancement of nanofluids, **International Journal of Heat and Fluid Transfer**, v.21, p.58–64, 2000.

XUAN, Y.; LI, Q.; HU, W. Aggregation structure and thermal conductivity of nanofluids. **American Institute of Chemical Engineers Journal**, v.49, n.4, abr. 2003.

XUE, Q.Z. Model for effective thermal conductivity of nanofluids, **Physics Letters A**, v.307, p. 313 – 317, 2003.

XUE, Q.; XU, W.-M. A model of thermal conductivity of nanofluids with interfacial shells. **Materials Chemistry and Physics**, v.90, p. 298-301, 2005.

YU, W.; CHOI, S.U.S. The role of interfacial layers in the enhanced thermal conductivity of nanofluids: A renovated Maxwell model. **Journal of Nanoparticle Research**, v.5, p. 167-171, fev. 2003.

YU, C.-J.; RICHTER, A.G.; DATTA, A.; DURBIN, M.K.; DUTTA, P. Molecular layering in a liquid on a solid substrate: an X-ray reflectivity study. **Physica B**, v.31, p.283:27, 2000.

ZHOU, L.-P., WANG, B.-X, PENG, X.-F., DU, X.-Z., YANG, Y.-P., On the specific heat capacity of CuO nanofluid, **Advances in Mechanical Engineering**, v.2010:172085, 2010.

ZHU, H.; LIN, Y.; YIN, Y. A novel one-step chemical method for preparation of copper nanofluids. **Journal of Colloid and Interface Science**, v.277, n.1, set. 2004.

ZHU, Y.; ZHAO, W.; CHEN, H.; SHI, J. A Simple One-Pot Self-Assembly Route to Nanoporous and Monodispersed Fe₃O₄ Particles with Oriented Attachment Structure and Magnetic Property, **Journal of Physical Chemistry C**, v.111, n.14, p. 5281–5285, 2007.