

CORRELAÇÕES PARA DETERMINAR CONDUTIVIDADE TÉRMICA E VISCOSIDADE DE NANOFLUIDOS

Guilherme Azevedo Oliveira; Enio Pedone Bandarra Filho

O estudo sobre nanofluidos aumentou de forma significativa nos últimos anos, principalmente com relação a suas propriedades térmicas e aplicações em sistemas de refrigeração. O objetivo deste trabalho é expor um estudo sobre a condutividade térmica e viscosidade de nanofluidos, onde foram comparadas diversas correlações desenvolvidas para prever estas propriedades com resultados experimentais da literatura, com o objetivo de determinar quais as melhores correlações para prever estas propriedades para nanofluidos. São apresentados resultados numéricos para transferência de calor com nanofluidos, em que foi considerada esta análise das correlações. Foi observada uma discrepância entre os modelos teóricos e resultados experimentais para os nanofluidos analisados, e por este estudo, nenhum destes modelos consegue descrever o fenômeno físico que são os nanofluidos de forma satisfatória, sendo necessário aperfeiçoamento destes modelos.

Nanofluidos são dispersões de partículas de escala nanométrica (1 a 100nm) em fluidos comuns, denominados fluidos base. Devido ao potencial térmico apresentado, o estudo sobre nanofluidos aumentou gradativamente nos últimos anos. Na Fig. 1 podemos observar o aumento do número de publicações em periódicos envolvendo nanofluidos.

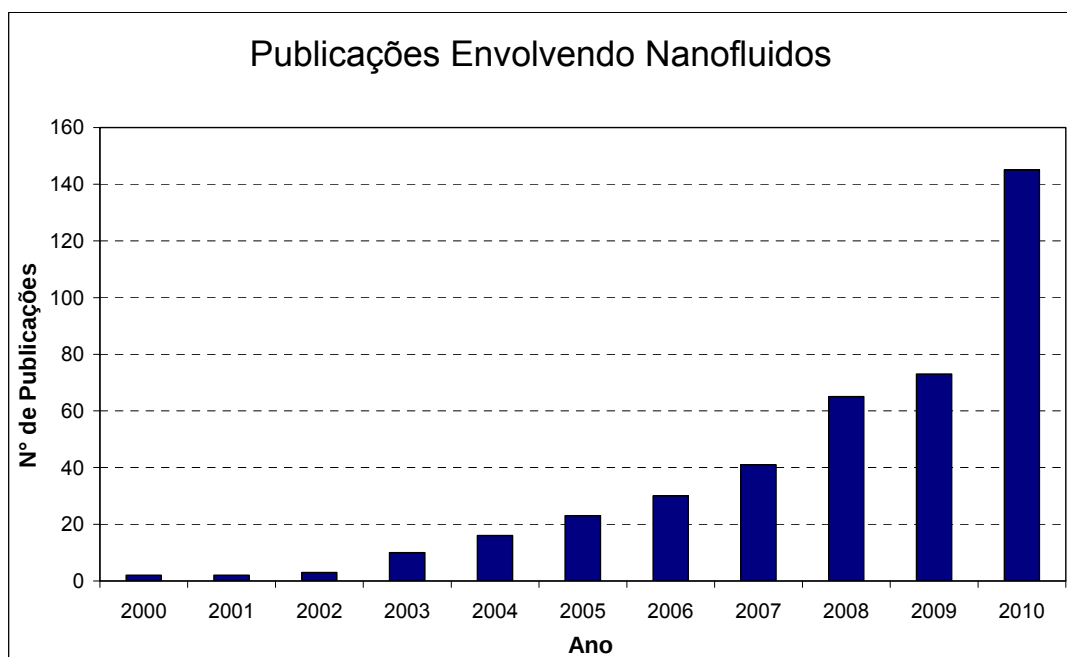


Figura1: Evolução das publicações envolvendo nanofluidos

Devido a elevada condutividade térmica das nanopartículas, os nanofluidos possuem uma condutividade térmica também maior do que os seus respectivos fluidos base. Assim, os nanofluidos possuem um grande potencial de transferência de calor, tanto em escoamento monofásico como em mudança de fase. Os nanofluidos também têm potencial em incrementar o fluxo crítico de calor, com uma diminuição pequena na transferência de calor, resultando em mais uma gama de aplicações. A seguir uma tabela que ilustra como a adição de nanopartículas pode incrementar a condutividade térmica dos fluidos. Em cinza, a condutividade térmica de alguns sólidos que são utilizados como nanopartículas, contra a condutividade de alguns líquidos (em sombreado de branco).

Material	k (W/m K)
Nanotubos de carbono (CNT)	3000
Prata	426
Ouro	317
Alumina (Al ₂ O ₃)	40
Óxido de Cobre (CuO)	18
Óxido de Titânio (TiO ₂)	13,7
Água	0,613
Etilenoglicol	0,253
Propilenoglicol	0,182
Óleo de Motor	0,145

Tabela 1: Condutividade térmica de alguns materiais

Por outro lado, a viscosidade dos nanofluidos também é elevada, o que resulta em um problema no processo de transferência de calor, visto que será necessário uma maior potência de bombeamento para manter o nível de troca térmica. Além disso, nanofluidos não são mantidos estáveis com facilidade. Por isso devem ser estudados com muito empenho para que possam ser aplicados em sistemas reais.

O estudo da condutividade térmica e da viscosidade dos nanofluidos é fundamental para determinar sua gama de aplicações. Por isso diversos pesquisadores têm medido estas propriedades, e também tentado desenvolver correlações para prever estas propriedades, principalmente para a condutividade térmica. Porém, os dados experimentais dos diversos autores se apresentam muitas vezes contraditórios, e discrepantes com relação aos modelos desenvolvidos.

Diversos modelos foram desenvolvidos nos últimos anos para determinar a condutividade térmica de nanofluidos. Alguns modelos antigos para a condutividade térmica de misturas são também frequentemente utilizados para determinar esta propriedade. Neste trabalho, o principal foco foi analisar os parâmetros que são levados em conta em cada modelo. Os modelos estão propostos, em princípio, para nanofluidos de nanopartículas esféricas, com exceção do modelo de Xué (2003).

As variáveis analisadas são as condutividades do fluido base e das nanopartículas, a concentração volumétrica de nanopartículas, a espessura de nanocamada, definida por alguns pesquisadores como uma interface entre o fluido base e as nanopartículas, a condutividade desta nanocamada, e o tamanho das nanopartículas.

Modelo de Gao e Feng (2006):

$$1 - \phi_p = \left[\frac{k_p - k_e}{k_p - k_f} \right] \cdot \left(\frac{k_f}{k_e} \right), \quad k_{eff} = \frac{k_e}{k_f} \quad (1)$$

Onde k_e , k_p e k_f são as condutividades do nanofluido, das nanopartículas e do fluido base, respectivamente, e ϕ_p é a concentração volumétrica de nanopartículas.

Modelo de Leong (2005)

$$k_{eff} = \frac{(k_p - k_{lr}) \cdot \phi_p \cdot k_{lr} \cdot (2\beta_1^3 - \beta^3 + 1) + (k_p + 2k_{lr}) \cdot \beta_1^3 \cdot (\phi_p \cdot \beta^3 \cdot (k_{lr} - k_f) + k_f)}{(\beta_1^3 \cdot (k_p + 2k_{lr}) - ((k_p - k_{lr}) \cdot \phi_p \cdot (\beta_1^3 + \beta^3 - 1))) \cdot k_f} \quad (2)$$

Onde: $\beta_1 = 1 + \frac{\gamma}{2}; \beta = 1 + \gamma; \gamma = \frac{h}{a}; k_{lr} = 3k_f$

A variável h representa a espessura da nanocamada (constante e igual a 1), a é o raio das nanopartículas, K_{lr} é a condutividade da nanocamada, K_f é a condutividade do fluido base, K_p a condutividade das nanopartículas, Φ_p a concentração volumétrica de nanopartículas.

Modelo de Xue e Xu (2005)

$$\left(1 - \frac{\phi_p}{\alpha}\right) \cdot \left(\frac{k_e - k_f}{2k_e + k_f}\right) + \frac{\phi_p}{\alpha} \cdot \left(\frac{(k_e - k_{lr}) \cdot (2k_{lr} + k_p) - (\alpha \cdot (k_p - k_{lr}) \cdot (2 \cdot k_{lr} + k_e))}{(2k_e + k_{lr}) \cdot (2k_{lr} + k_p) + 2 \cdot \alpha \cdot (k_p - k_{lr}) \cdot (k_{lr} - k_e)}\right) = 0 \quad (3)$$

$$\text{Onde } \alpha = \left(\frac{R}{R + T}\right)^3$$

K_{lr} é a condutividade da nanocamada (constante e igual a 5), K_e a condutividade do nanofluido, K_p a condutividade das nanopartículas, K_f a condutividade do fluido base, t a espessura da nanocamada (constante e igual a 3), R o raio das nanopartículas.

Modelo de Xie (2005)

$$k_{nf} = 1 + 3\theta \cdot \phi_t + 3\theta^2 \cdot \left(\frac{\phi_t^2}{1 - \theta \cdot \phi_t}\right) \quad (4)$$

Onde:

$$\phi_t = \phi(1 + \gamma)^3; \theta = \beta_{lf} \left(\frac{(1 + \gamma)^3 - \frac{\beta_{pl}}{\beta_{fl}}}{(1 + \gamma)^3 + 2\beta_{lf} \cdot \beta_{pl}} \right); \beta_{fl} = \frac{k_f - k_l}{k_f + 2k_l}; \beta_{pl} = \frac{k_p - k_l}{k_p + 2k_l}; \beta_{lf} = \frac{k_l - k_f}{k_l + 2k_f}; \gamma = \frac{\delta}{r_p}$$

$$M = \varepsilon(1 + \gamma) - 1; \varepsilon = \frac{k_p}{k_f}; k_l = \frac{M^2}{(M - \gamma) \cdot \ln(1 + M) + \gamma \cdot M}$$

δ é a espessura da nanocamada (constante e igual a 5), r_p o raio das nanopartículas, k_p a condutividade das nanopartículas, k_f a condutividade do fluido base, k_l = condutividade da nanocamada (depende de k_p , k_f , r_p , δ).

Modelo de Xue (2003): Baseado na teoria do Maxwell e na teoria de polarização média, Xué apresenta um modelo para determinar a condutividade térmica efetiva dos nanofluidos compostos por nanotubos/óleo e Al_2O_3 /água. Nos resultados teóricos conseguiu interpretar o incremento anômalo da condutividade de nanotubos/óleo e suas não linearidades ao aplicar uma quantidade específica destas partículas.

Neste modelo, k_e é a condutividade do nanofluido, k_m do fluido base, e v a concentração, λ um fator de forma e B um parâmetro auxiliar de forma.

$$9\left(1 - \frac{v}{\lambda}\right) \frac{k_e - k_m}{2k_e + k_m} + \frac{v}{\lambda} \left[\frac{k_e - k_{c,x}}{k_e + B_{2,x}(k_{c,x} - k_e)} + 4 \frac{k_e - k_{c,y}}{2k_e + (1 - B_{2,x})(k_{c,y} - k_e)} \right] = 0 \quad (5)$$

Modelo de Prasher (2006): Prasher et al. mostraram que a convecção devido ao movimento Browniano de nanopartículas é a principal causa do incremento da condutividade em nanofluidos coloidais. Neste modelo, eles comentam que devido à natureza convectiva da transferência de calor, qualquer modelo proposto tem uma essência semi-empírica incluída que necessita de simulação numérica. Neste trabalho, são considerados três possíveis mecanismos para descrever

a transferência de calor e energia em nanofluidos: o movimento de translação Browniano, a existência de um potencial entre as partículas e a convecção no líquido devido ao movimento browniano das partículas.

A correlação que representa o modelo de Prasher é apresentada na Eq. 6 .

$$\frac{k_{eff}}{k_m} = (1 + A Re^m Pr^{0.333} \phi) \left[\frac{(1 + 2\alpha) + 2\phi(1 - \alpha)}{(1 + 2\alpha) - \phi(1 - \alpha)} \right] \quad (6)$$

Modelo de Yu e Choi (2003): Yu e Choi desenvolveram um novo modelo para a predição da condutividade térmica de suspensões trifásicas de partículas elipsóides em líquido. A interface sólido/líquido é descrita como um elipsóide confocal com uma partícula sólida.

Este modelo, expressado matematicamente na Eq. 7 em termos de condutividade térmica equivalente e fração de volume equivalente de elipsóides complexos, prediz a condutividade de suspensões nanotubos/óleo, entretanto não permite prever o comportamento não linear da condutividade térmica do nanofluido. Para calcular a condutividade térmica efetiva de suspensões complexas (elipsóide – em – líquido) contendo elipsóides anisotrópicos de tamanho único de condutividade térmica equivalente k_{pj} (a,b,c) foi assumido que a condutividade térmica do fluido base K_1 , é isotrópico.

$$k_{eff} = \left(1 + \frac{n \cdot f_e A}{1 - f_{eA}} \right) \cdot k_l; A = \frac{1}{3} \sum_{j=a,b,c} \frac{k_{pj} - k_l}{k_{pj} + (n-1)k_l} \quad (7)$$

Onde n é o fator empírico de forma e f_e a concentração de volume equivalente dos elipsóides complexos.

Um fator empírico generalizado associado a um modelo modificado de Hamilton-Crosser é proposto para mostrar a importância que as interfaces sólido/líquido têm no aumento da condutividade. Os resultados do modelo de Yu e Choi determinaram que este novo modelo não é viável para prever o comportamento não linear da condutividade térmica do nanofluido

Modelo de Maxwell (1873): O modelo de Maxwell é um modelo clássico para a condutividade de misturas, que é usado até hoje. k_{nf} representa a condutividade do nanofluido, k_m do fluido base e k_p das nanopartículas, enquanto Φ é a concentração volumétrica de nanopartículas.

$$k_{nf} = k_m + 3\phi \left(\frac{k_p - k_m}{2k_m + k_p - \phi(k_p - k_m)} \right) \cdot k_m \quad (8)$$

Alguns pesquisadores utilizam correlações desenvolvidas para prever a viscosidade de misturas, para calcular a viscosidade de nanofluidos. Não há na literatura uma correlação específica para nanofluidos, considerando suas características intrínsecas, considera-se apenas a viscosidade do fluido base e concentração de nanopartículas. Nestas equações, μ_f denota a viscosidade do fluido base, μ_{nf} do nanofluido e Φ a concentração de nanopartículas, sendo a viscosidade relativa μ_{eff} :

$$\mu_{eff} = \frac{\mu_{nf}}{\mu_f}$$

Modelo de Einstein (1906):

$$\mu_{nf} = (1 + 2,5 \cdot \phi) \cdot \mu_f \quad (9)$$

Modelo de De Bruijin (1942):

$$\mu_{nf} = \left(\frac{1}{1 - 2,5 \cdot \phi + 1,552 \phi^2} \right) \cdot \mu_f \quad (10)$$

Modelo de Vand (1948):

$$\mu_{nf} = (1 + 2,5 \cdot \phi + 7,349 \phi^2) \cdot \mu_f \quad (11)$$

Modelo de Brinkman-Roscoe (1952):

$$\mu_{nf} = \frac{1}{(1 - \phi)^{2,5}} \cdot \mu_f \quad (12)$$

Modelo de Batchelor (1997):

$$\mu_{nf} = (1 + 2,5 \cdot \phi + 6,2 \phi^2) \cdot \mu_f \quad (13)$$

Para comparar os modelos teóricos com os resultados experimentais, primeiramente observamos quais são os parâmetros que cada modelo teórico considera para determinar a condutividade térmica. Na tabela 2 temos essa comparação de forma explícita.

Correlação Parâmetro	Xue (2003)	Yu e Choi (2003)	Prasher (2006) e Maxwell (1873)	Leong (2005)	Xue e Xu (2005)	Xie (2005)	Gao e Feng (2006)
concentração de nanopartículas	Sim	sim	Sim	sim	sim	sim	sim
Condutividade da nanopartícula	Sim	sim	Sim	sim	sim	sim	sim
condutividade do fluido base	Sim	sim	Sim	sim	sim	sim	sim
tamanho da nanopartícula	Sim	sim	Não	sim	sim	sim	não
Espessura de nanocamada	Sim	sim	Não	sim	sim	sim	não
Condutividade de nanocamada	Sim	não	Não	sim	sim	sim	não

Tabela 2: Parâmetros levados em conta nos modelos teóricos de condutividade térmica

Para comparar com resultados experimentais, deve-se ajustar os modelos de forma a tornar os dados comparáveis. Assim, em cada modelo, substituímos as variáveis pelos valores de cada experimento. Fazendo isso em todos os modelos, pode-se comparar cada resultado experimental com todas as correlações propostas. Vale ressaltar que alguns modelos não consideram parâmetros revelados nos experimentos, e que outros modelos consideram parâmetros difíceis de serem medidos, como a espessura e condutividade da nanocamada, que é uma interface que alguns pesquisadores dizem existir entre o fluido base e as nanopartículas. Nesse caso, foram mantidos os valores ajustados pelo autor do modelo. As comparações podem ser visualizadas nas Figs. 2,3,4.

Pode ser observado que há uma discordância entre os resultados experimentais e modelos teóricos, sendo que não há uma correlação que se aproxima mais do que as outras de todos os resultados experimentais. Nestas figuras, a correlação de Maxwell se sobrepõe a de Prasher, para a faixa de concentrações analisadas. Estas correlações coincidem com apenas um resultado experimental, mas discordando em todos os outros.

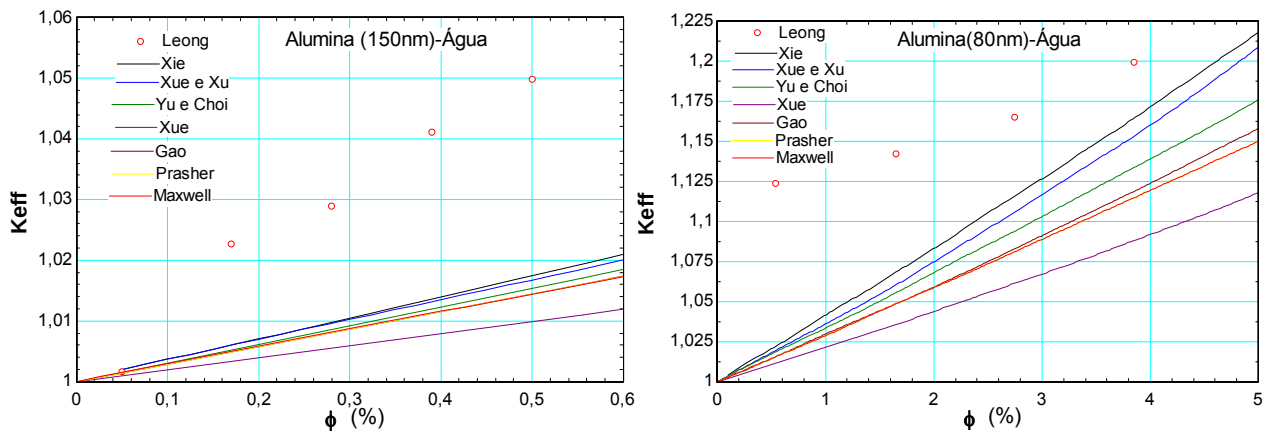


Figura 2: Comparação entre correlações e resultados experimentais para alumina em água

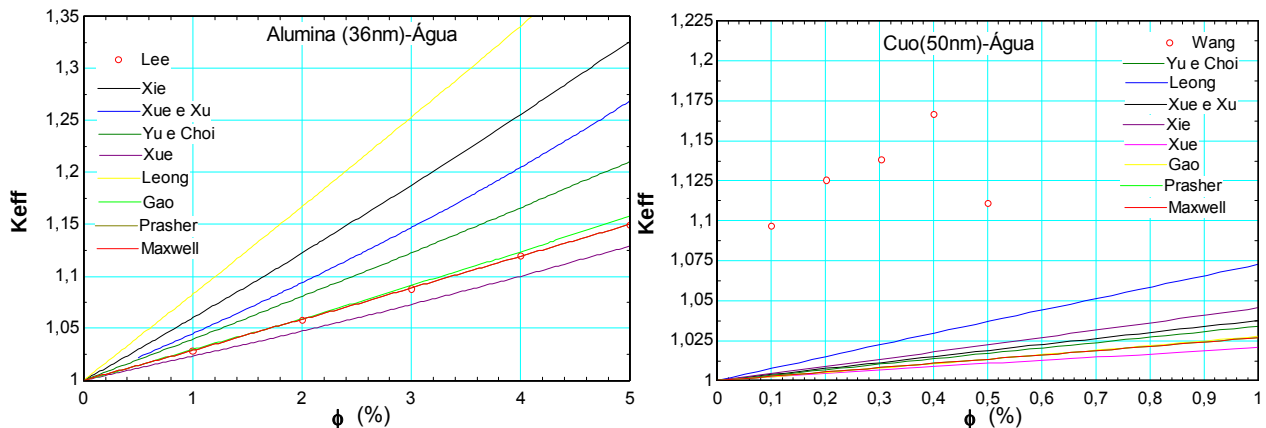


Figura 3: Comparações entre correlações e resultados experimentais para alumina e óxido de cobre em água

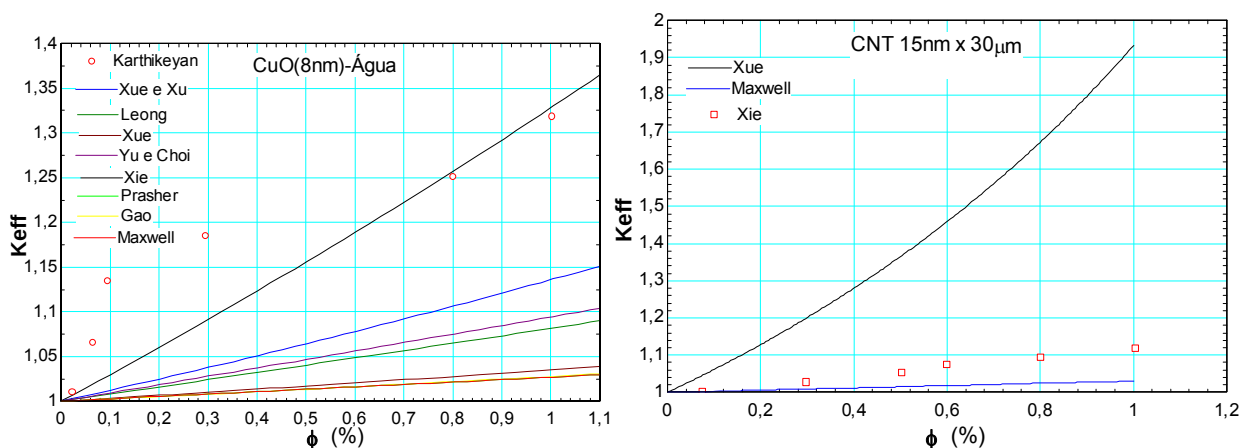


Figura 4: Comparações entre correlações e resultados experimentais para CNT e óxido de cobre em água

Vários pesquisadores consideram o tamanho das nanopartículas como um fator importante na determinação da condutividade térmica dos nanofluidos. Assim, fizemos uma análise desta influência, segundo os modelos que consideram este parâmetro. A idéia inicial é que para uma dada concentração, quanto menores as nanopartículas (esféricas), maior deve ser a

condutividade térmica, devido a maior área total de contato entre as nanopartículas e o fluido base.

Podemos ver na Fig. 5 que a condutividade diminui significativamente quando aumentamos o diâmetro das nanopartículas até 20 nm, mas depois deste valor esta diminuição fica cada vez menos acentuada e depois de 40nm de diâmetro praticamente não temos variação significativa na condutividade térmica, sendo que para algumas correlações este valor é ainda menor do que 40nm.

Assim, segundo os modelos, o tamanho só é importante neste parâmetro se as nanopartículas forem muito pequenas, o que representa uma contradição com a idéia que se tem na comunidade científica.

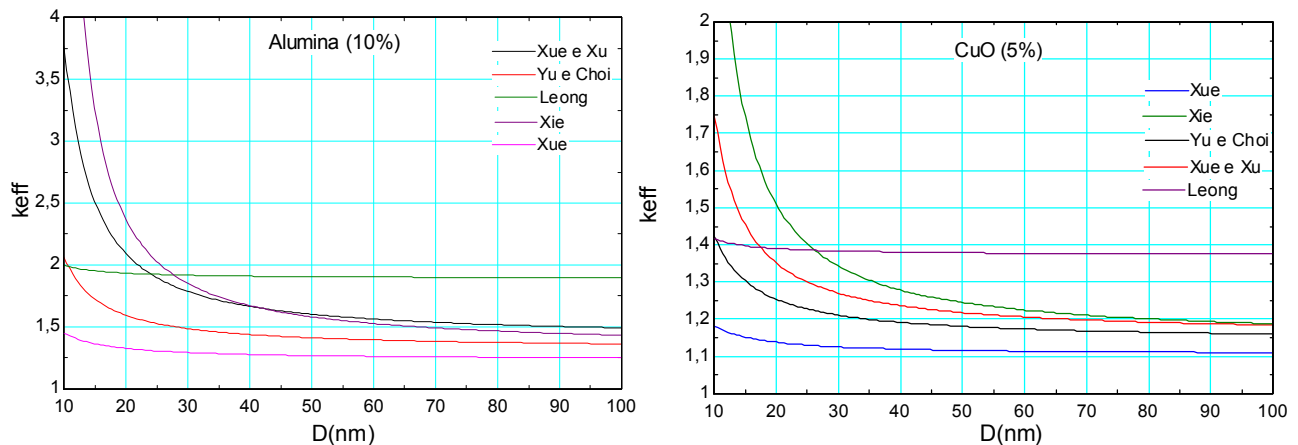


Figura 5: Influência do tamanho das nanopartículas na condutividade térmica de nanofluidos

Todas as correlações propostas para a viscosidade de misturas analisadas são anteriores a síntese de nanopartículas, portanto nenhuma delas considera características como espessura e condutividade de nanocamada, apenas a concentração e viscosidades do fluido base e partículas. Podemos ver na Fig. 6 que estas correlações também não representam bem os resultados experimentais já obtidos para a viscosidade de nanofluidos.

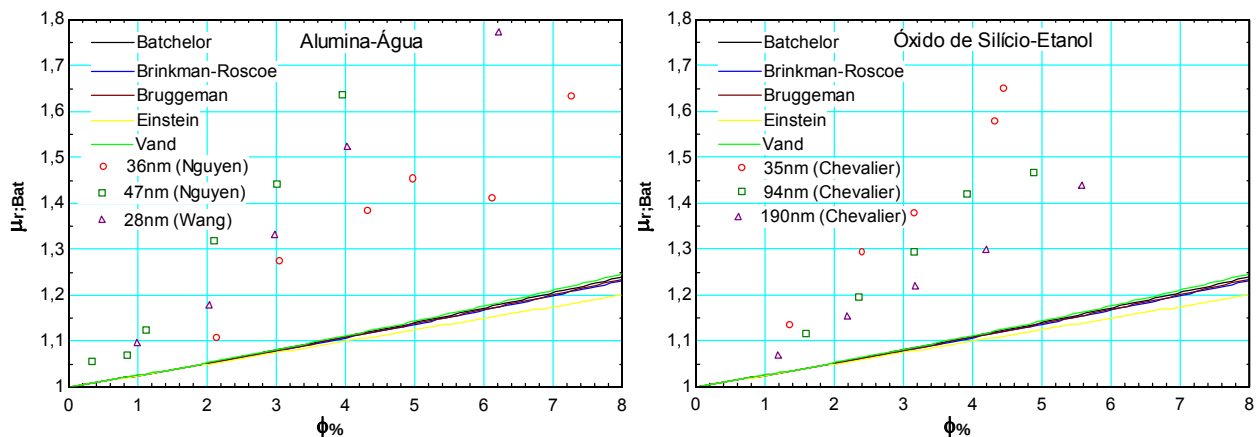


Figura 6: Comparações entre correlações e experimentos para a viscosidade de nanofluidos

Um dos objetivos de analisar as correlações apresentadas é prever com a maior precisão possível as propriedades térmicas dos nanofluidos, para utilizar estas propriedades como dados de entrada em simulações numéricas de nanofluidos em escoamento monofásico, com a finalidade de determinar o coeficiente de transferência de calor e a perda de carga para esta nova classe de fluidos. A seguir, serão descritas as primeiras simulações já realizadas.

A simulação consistiu em um tubo reto e horizontal, onde na seção de entrada o escoamento é termicamente e hidrodinamicamente desenvolvido. Foi imposto um fluxo de calor por unidade de área constante ao longo do tubo, e um número de Reynolds constante. A parede

do tubo foi considerada como de espessura nula, para desprezar o efeito da condução de calor. As condições de entrada foram velocidade uniforme e temperatura constante.

As correlações utilizadas na determinação das propriedades dos nanofluidos foram a de Maxwell para a condutividade térmica e de Batchelor para a viscosidade. Estas correlações foram escolhidas por 2 motivos: por simplicidade, já que não consideram muitos fatores cuja influência é difícil de determinar, e pelo fato de entre as correlações clássicas, a de Maxwell propor o menor ganho na condutividade térmica, e a de Batchelor prever o maior ganho para a viscosidade. Assim, a idéia é mostrar que mesmo com o menor ganho na condutividade térmica e o maior ganho na viscosidade, a transferência de calor é maior para os nanofluidos do que para os fluidos base, ou seja, mesmo com o menor fator de incremento, os nanofluidos são mais eficazes.

Para as outras propriedades dos nanofluidos, como o calor específico e a densidade, por não existir uma correlação específica para nanofluidos ou mesmo para suspensões, foi apenas feito um balanço de concentrações para determinar estas propriedades dos nanofluidos. Vale ressaltar que o nanofluido foi considerado como homogêneo, ou seja, apenas como sendo um fluido com propriedades modificadas, e não como uma suspensão coloidal, sendo este um passo posterior no projeto.

BANCO DE DADOS DOS NANOFLUIDOS						
Fluido Base	Nanopartícula	ϕ_{np} (%)	ρ (kg/m ³)	C_p (J/kg-K)	k (W/m-K)	μ (Pa-s)
F1 (ADI')	N1 (Prata)	1%	1092,03	3803,85	0,6127	9,13E-04
		2%	1186,96	3485,26	0,6311	9,35E-04
		5%	1471,75	2776,08	0,6883	1,00E-03
	N2 (Cobre)	1%	1076,33	3868,75	0,6127	9,13E-04
		2%	1155,56	3597,50	0,6311	9,35E-04
		5%	1393,25	2968,87	0,6883	1,00E-03
	N3 (Ferro)	1%	1065,87	3906,58	0,6124	9,13E-04
		2%	1134,64	3663,58	0,6304	9,35E-04
		5%	1340,95	3084,13	0,6865	1,00E-03
	N4 (Alumina)	1%	1025,73	4057,67	0,6120	9,13E-04
		2%	1054,36	3939,05	0,6296	9,35E-04
		5%	1140,25	3618,93	0,6844	1,00E-03
	N5 (Óxido de cobre)	1%	1050,23	3963,73	0,6124	9,13E-04
		2%	1103,36	3765,49	0,6304	9,35E-04
		5%	1262,75	3270,86	0,6864	1,00E-03

Tabela 3: Propriedades modificadas dos nanofluidos

Nas Figs. 7,8, e 9 são apresentados os resultados obtidos para alguns nanofluidos, para o coeficiente de transferência de calor (h) e perda de carga. Podemos observar que h foi maior para todos os nanofluidos do que para os respectivos fluidos base, sendo que a alumina foi a nanopartícula que mais incrementou o h, mesmo não sendo a nanopartícula com maior condutividade térmica. Por outro lado, para a maioria dos nanofluidos, a perda de carga foi significativamente maior que do fluido base. Assim, é necessário analisar a faixa de concentrações em que o fator de incremento dos nanofluidos é maior que 1, que é a faixa de interesse de aplicação dos nanofluidos.

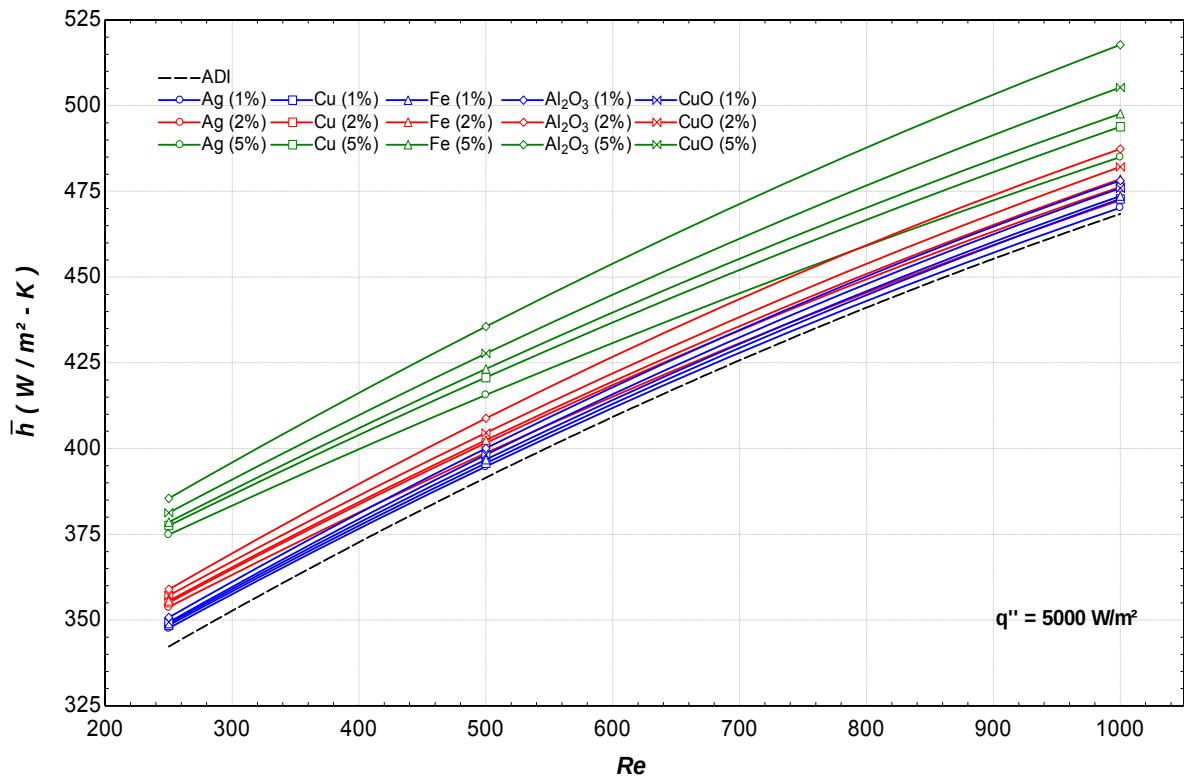


Figura 7: Valores de h para nanofluidos a base de água

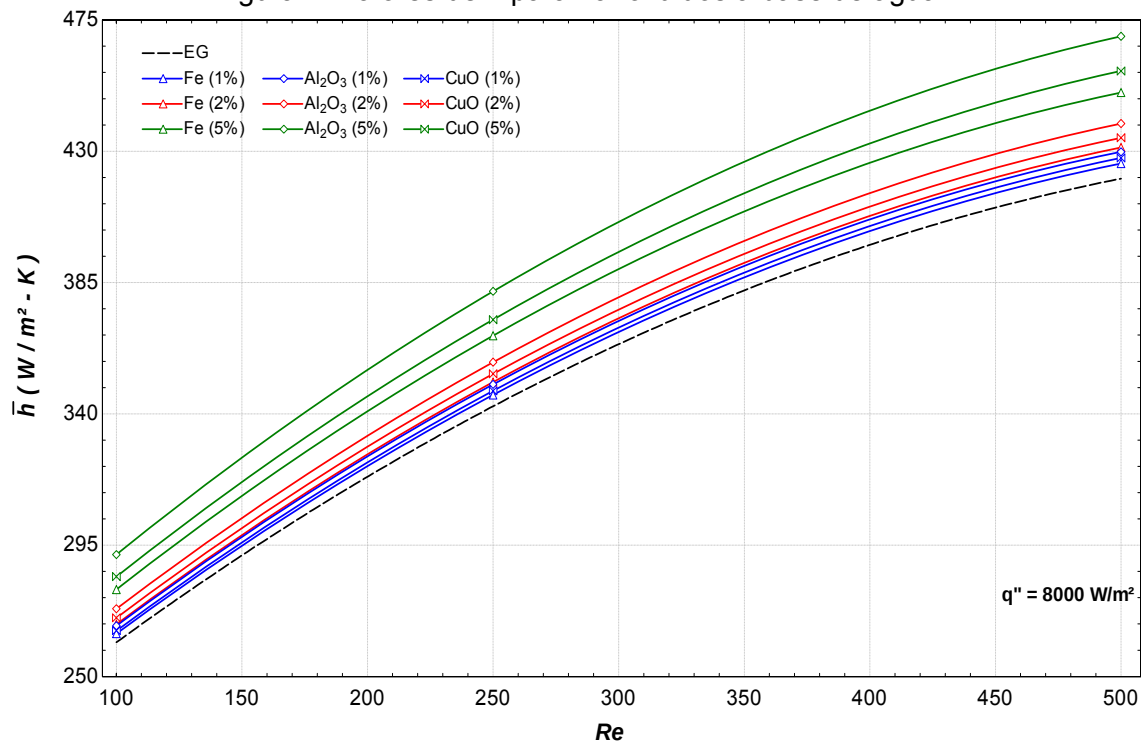


Figura 8: Valores de h para nanofluidos a base de etilenoglicol

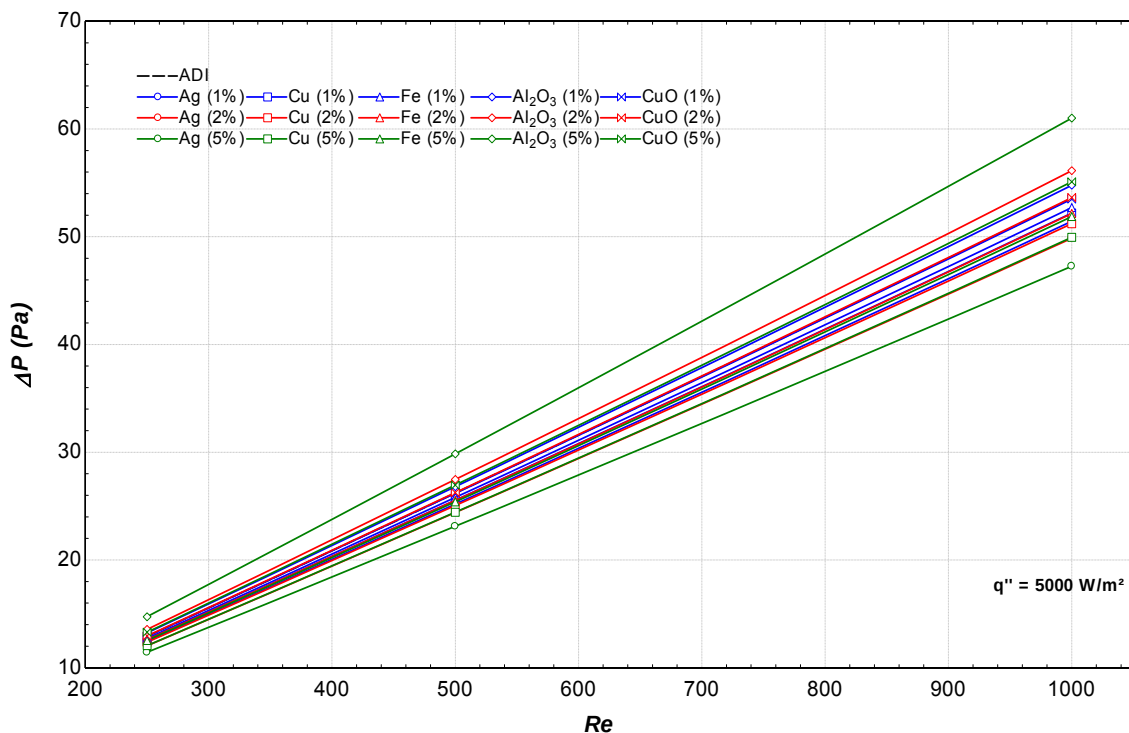


Figura 9: Valores de ΔP para nanofluidos a base de água

Nanofluidos demonstram ter um grande potencial em aplicações térmicas, mas para determinarmos a sua gama de aplicações precisamos determinar as suas propriedades de forma precisa. Neste sentido, muitos pesquisadores tem proposto correlações para determinar a condutividade térmica de nanofluidos, além da viscosidade e outras propriedades térmicas.

Vários parâmetros são mal analisados nestas correlações, como por exemplo a espessura e condutividade de nanocamada do nanofluido. Estes valores são determinados de forma arbitrária e sem explicação física ou matemática. Além disso, o tamanho das nanopartículas apresenta influência pouco significativa, visto que no tamanho onde essa influência seria grande quase não existem nanopartículas.

O estudo de modelos teóricos mostra que, embora sejam desenvolvidos baseados em detalhes microestruturais como tamanho, forma, composição e propriedades físicas das partículas conhecidas, existe disparidade entre eles e os resultados experimentais, portanto não existe um modelo generalizado para a determinação da condutividade térmica de nanofluidos. É claro, que uma causa disto, é o fato que as fontes de informação e a literatura nesta área compreendem uma ampla faixa de tópicos como transferência de calor, materiais, química, física e diversas áreas da engenharia.

Ao analisar os resultados, foram encontradas diferenças significativas, seja pela combinação de critérios como o movimento Browniano, o potencial e aglomeração das partículas, ou pelo tipo de ajustes feitos a cada curva. Tais diferenças poderiam ser reduzidas se técnicas de preparação dos nanofluidos fossem unificadas, com objetivo de controlar a forma, tamanho e propriedades das partículas utilizadas, técnicas de medição em nanoescala e a repetibilidade dos experimentos com condições controladas.

Um análise dos diferentes modelos teóricos existentes, para prever o aumento da condutividade térmica em nanofluidos e que foram comparados com resultados experimentais foi apresentado no presente trabalho, proporcionando uma sugestão de direcionamento para explorar os diferentes mecanismos que influenciam o fenômeno de transferência de calor em nanofluidos.

Os próximos trabalhos do grupo neste sentido consistem em fazer uma análise de erros, considerando as incertezas de cada parâmetro nos experimentos, além de aumentar o banco de dados experimental e teórico na tentativa de encontrar a forma ideal de correlacionar os parâmetros apresentados.

As simulações apresentadas também evidenciam o potencial de transferência de calor através do incremento do coeficiente de transferência de calor (h) e do número de Nusselt (Nu). Os resultados também reforçam a ideia de uma maior perda de carga para os nanofluidos do que para os fluidos base, conforme previsto por diversos pesquisadores.

Mais simulações são necessárias para obtenção de resultados mais consistentes, e também deve ser reduzido o número de simplificações da simulação, além de confrontar com resultados experimentais. Estas etapas fazem parte dos trabalhos futuros deste projeto.

REFERÊNCIAS

- M. J. ASSAEL, I. N. METAXA, K. KAKOSIMOS, AND D. CONSTANTINOU, **Thermal Conductivity of Nanofluids – Experimental and Theoretical**, International Journal of Thermophysics, Vol. 27, No. 4, July 2006 (© 2006)
- M. J. ASSAEL, C.-F. CHEN, I. METAXA, AND W. A. WAKEHAM, International Journal of Thermophysics. **25**:971 (2004).
- R.L. HAMILTON, O.K. CROSSER, **IEC Fundamentals** (1962) 187.
- S. U. S. CHOI, Z. G. ZHANG, W. YU, F. E. LOCKWOOD, AND E. A. GRULKE, Appl. Phys. Lett. **79**:2252 (2001).
- M. J. ASSAEL, I. N. METAXA, Y. ARVANITIDIS, D. CHRISTOFILOS, AND C. LIOUTAS, Int. J. Thermophys. **26**:647 (2005).
- J. A. EASTMAN, S. U. S. CHOI, S. LI, W. YU, AND L. J. THOMPSON, Appl. Phys. Lett. **78**:718 (2001).
- M. J. ASSAEL, C.-F. CHEN, I. METAXA, AND W. A. WAKEHAM, Proc. 27th Int. Therm. Conduct. Conf. (Knoxville, Tennessee, 2003).
- S. P. JANG AND S. U. S. CHOI, **Role of Brownian motion in the enhanced thermal conductivity of nanofluids**, Applied Physics. Letter, **84**:4316 (2004).
- R. PRASHER, P. BHATTACHARYA, AND P. E. PHELAN, **Thermal Conductivity of Nanoscale Colloidal Solutions (Nanofluids)**, Physics Review Letter **94**:025901 (2005).
- Q.-Z. XUE, **Model for effective thermal conductivity of nanofluids** Physics Letter. A, **307**:313 (2003).
- B. X. WANG, L. P. ZHOU, AND X. F. PENG, **A fractal model for predicting the effective thermal conductivity of liquid with suspension of nanoparticles**, International Journal Heat Mass Transfer **46**:2665 (2003).
- C KITTEL, Thermal Physics (Wiley, New York), 1969.
- P. L. KAPITZA, Journal of Physics, Moscow **4**, 181, 1941.
- W. YU AND S. U. S. CHOI, **The role of interfacial layers in the enhanced thermal conductivity of nanofluids: A renovated Hamilton–Crosser model**, Journal Nanoparticles Research **6**:355 (2004).
- J. KOO AND C. KLEINSTREUER, **A new thermal conductivity model for nanofluids**, Journal Nanoparticles Research, **6**:677 (2004).
- Q. XUE AND W. M. XU, **A model of thermal conductivity of nanofluids with interfacial shells**, Mater. Chem. Phys. **0**:298 (2005).MLA. 12 April 2003.
- K.C. LEONG, C. YANG AND S.M.S. MURSHED, **A model for the thermal conductivity of nanofluids – the effect of interfacial layer**, Journal of Nanoparticle Research (2006) **8**: 245–254.
- LEI GAO, XIAO FENG ZHOU, **Differential effective medium theory for thermal conductivity in nanofluids**, Physics Letters A **348** (2006) 355–360.
- JAESEON LEE, ISSAM MUDAWAR, **Assessment of the effectiveness of nanofluids for single-phase and two-phase heat transfer in micro-channels**, International Journal of Heat and Mass Transfer **50** (2007) 452–463.
- S.M.S. MURSHED, K.C. LEONG, C. YANG, **Investigations of thermal conductivity and viscosity of nanofluids**, International Journal of Thermal Sciences **47** (2008) 560–568.
- Y. HWANG, J.K. LEE, C.H. LEE, Y.M. JUNG, S.I. CHEONG, C.G. LEE, B.C. KU, S.P. JANG, **Stability and thermal conductivity characteristics of nanofluids**, Thermochemica Acta **455** (2007) 70–74.
- S. U. S. CHOI, Z. G. ZHANG, W. YU, F. E. LOCKWOOD, E. A. GRULKE, Applied Physics Letters **79** (2001) 2252–2254.
- CHEVALIER, J.; TILLEMENT, O.; AYELA, F.; **Rheological properties of nanofluids flowing through microchannels**, Applied Physics Letters Vol. **91**, 233103, 2007.

C.T. NGUYEN, F. DESGRANGES, N. GALANIS, G. ROYA, T. MARÉD, S. BOUCHER, H. ANGUE MINTSA, **Viscosity data for Al₂O₃-water nanofluid—hysteresis: is heat transfer enhancement using nanofluids reliable?**, International Journal of Thermal Sciences 47 (2008) 103–111

X. WANG, X. XU, S.U.-S. CHOI, **Thermal conductivity of nanoparticles– fluid mixture**, J. Thermophysics and Heat Transfer 13 (4) (1999) 474–480.

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

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

JAESEON LEE, ISSAM MUDAWAR, **Assessment of the effectiveness of nanofluids for single-phase and two-phase heat transfer in micro-channels**, International Journal of Heat and Mass Transfer 50 (2007) páginas 452–463.

N. R. KARTHIKEYAN, JOHN PHILIP, BALDEV RAJ, Materials Chemistry and Physics 109 (2008) páginas 50–55.

HUAQING XIE, HOHYUN LEE, WONJIN YOUN, AND MANSOO CHOIB, **Nanofluids containing multiwalled carbon nanotubes and their enhanced thermal conductivities**, Journal of Applied Physics 94 (2003) páginas 4967-4971

HUAQING XIE, MOTOO FUJII, XING ZHANG, **Effect of interfacial nanolayer on the effective thermal conductivity of nanoparticle-fluid mixture**, International Journal of Heat and Mass Transfer 48 (2005) 2926–2932.