

5

Simulação

Aplicou-se o modelo matemático desenvolvido para a simulação do sistema de refrigeração com circuito secundário.

5.1

Modelo matemático

A Tabela 2 resume as equações de balanço para cada componente do sistema secundário de refrigeração, descritas em detalhe no Capítulo 3. Para completar a solução termodinâmica do sistema são aplicadas equações de troca de calor, queda de pressão nos trocadores, eficiência mecânica do compressor em função da velocidade de rotação, entre outras, segundo as características de cada subsistema analisado.

5.2

Solução numérica

A seguir, apresenta-se, de maneira resumida o algoritmo adotado para a solução do sistema de equações. Uma versão mais detalhada aparece no Apêndice.

- 1) Ler os dados de entrada ao programa
- 2) Calcular ciclo de referência para o fluido-base
- 3) Calcular parâmetros do circuito primário
- 4) Calcular circuito secundário de referência
- 5) Calcular circuito secundário

Tabela 2. Equações de balanço e irreversibilidades para os componentes do sistema

Sub-sistema	Balanço de massa	Balanço de energia	Balanço de exergia	Irreversibilidade
Compressor	$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}_{ref}$	$\dot{W}_{COMP} = \frac{\dot{m}_{ref}(h_2 - h_1)}{\eta_{e,m}}$ $h_2 = \frac{h_{2,s} - h_1}{\eta_s} + h_1$	$\Delta \dot{E}_{ref,1,2} = \dot{m}_{ref} [(h_1 - h_2) - T_0 (s_1 - s_2)]$	$\dot{I}_{COMP} = T_0 [\dot{m}_{ref} (s_2 - s_1)]$
Condensador	$\dot{m}_2 = \dot{m}_3 = \dot{m}_{ref}$	$\dot{Q}_{CON} = \dot{m}_{ref} (h_2 - h_3)$ $\dot{E}_0^Q = 0$	$\dot{E}_{ref,2} = \dot{E}_{ref,3} + \dot{E}_0^Q + \dot{I}_{CON}$	$\dot{I}_{CON} = \dot{m}_{ref} [(h_2 - h_3) + T_0 (s_2 - s_3)]$
Evaporador	$\dot{m}_4 = \dot{m}_1 = \dot{m}_{ref}$ $\dot{m}_5 = \dot{m}_6 = \dot{m}_{sf}$	$\dot{Q}_{EVA} = \dot{Q}_C = \dot{m}_{ref} (h_1 - h_4)$ $\dot{Q}_{EVA} = \dot{m}_{sf} \Delta h_{6,5}$	$\dot{E}_{sf,5} + \dot{E}_{ref,4} = \dot{E}_{sf,6} + \dot{E}_{ref,1} + \dot{I}_{EVA}$	$\dot{I}_{EVA} = \dot{m}_{ref} [(h_4 - h_1) - T_0 (s_4 - s_1)]$ $+ \dot{m}_{sf} [(h_{sf,5} - h_{sf,6}) - T_0 (s_{sf,5} - s_{sf,6})]$
Dispositivo de expansão	$\dot{m}_3 = \dot{m}_4 = \dot{m}_{ref}$	$h_4 = h_3$	$\dot{E}_{ref,3} = \dot{E}_{ref,4} + \dot{I}_{EXP}$	$\dot{I}_{EXP} = T_0 [\dot{m}_{ref} (s_4 - s_3)]$
Bomba de líquido	$\dot{m}_6 = \dot{m}_7 = \dot{m}_{sf}$	$\dot{W}_{PUMP} = (P_7 - P_6) \frac{\dot{m}_{sf}}{\rho_{sf} \eta_{PUMP}}$	$\dot{W}_{PUMP} + \dot{E}_{sf,6} = \dot{E}_{sf,7} + \dot{I}_{PUMP}$	$\dot{I}_{PUMP} = \dot{W}_{PUMP} - \dot{m}_{sf} T_0 (s_6 - s_7)$
Trocador secundário	$\dot{m}_7 = \dot{m}_5 = \dot{m}_{sf}$	$\dot{Q}_C = \dot{Q}_{SEC} = \dot{m}_{sf} \Delta h_{5,7}$	$\dot{E}_{sf,7} = \dot{E}_C^Q + \dot{E}_{sf,5} + \dot{I}_{SEC}$	$\dot{I}_{SEC} = \dot{m}_{sf} [(h_7 - h_5) - T_0 (s_7 - s_5)] - \dot{E}_C^Q$

- 6) Calcular coeficiente estrutural
- 7) Repetir para cada nanofluido, para cada critério e para cada concentração volumétrica:
 - 7.1) Calcular a vazão mássica do fluido secundário
 - 7.2) Calcular o parâmetro constante segundo o critério de comparação
 - 7.3) Calcular circuito primário: como no ponto (3)
 - 7.4) Calcular circuito secundário: como no ponto (5)
 - 7.5) Calcular coeficiente estrutural: como no ponto (6)
 - 7.6) Fim da repetição
- 8) Mostrar Resultados
- 9) Fim

5.3

Validação do modelo do ciclo termodinâmico com dados experimentais

O algoritmo acima descrito foi implementado em um código computacional em linguagem FORTRAN. O sistema foi avaliado para vários pontos de operação, variando a concentração volumétrica de partículas. Condições como diâmetro de partículas, temperatura de referência e geometrias dos trocadores foram mantidas constantes.

O programa computacional foi alimentado com dados experimentais de Bingming et al (2009), que inclui as temperaturas de evaporação e condensação, assim como os graus de superaquecimento e sub-resfriamento. No referido trabalho, que estuda um sistema de refrigeração em cascata de NH_3/CO_2 , são fornecidas separadamente as medições experimentais para o ciclo de amônia. Os resultados obtidos pelo programa foram comparados com o coeficiente de desempenho do ciclo experimental. O gráfico levantado é apresentado na Figura 12.

As incertezas máximas para o COP do ciclo de amônia foram estimadas em 1,71%, segundo Bingming et al (2009), e estão representadas na Figura 12.

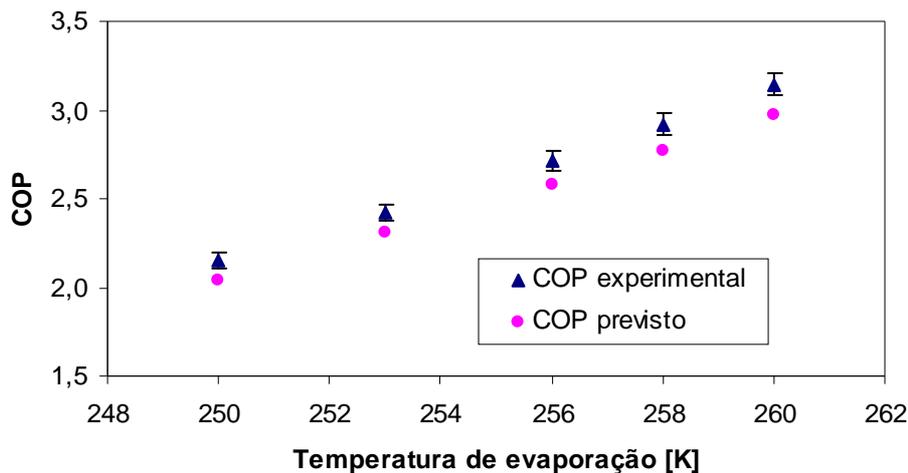


Figura 12. Comparação do desempenho experimental e calculado para o ciclo de amônia

Quando comparados, na Figura 12, os valores experimentais do coeficiente de desempenho, $COP_{experimental}$, com os valores obtidos pelo modelo, $COP_{previsto}$, pode-se concluir que o modelo termodinâmico prevê satisfatoriamente o desempenho do sistema. As discrepâncias observadas têm forma de um erro sistemático e este se encontra entre 5 e 6%. Estas se devem, provavelmente, à diferença entre os compressores estudados, pois o usado por Bingming et al (2009) foi um compressor aberto tipo parafuso duplo (sobre o qual pouca informação foi fornecida) e no programa se simulou um compressor tipo pistão.

Os dados dos pontos experimentais de Bingming et al (2009), fornecidos como entrada ao programa computacional, aparecem detalhados na Tabela 3.

Tabela 3. Dados experimentais (Bingming et al, 2009)

<i>Temperatura de condensação</i>	<i>Temperatura de evaporação</i>	<i>Grau de superaquecimento</i>	<i>Grau de sub-resfriamento</i>
(°C)	(°C)	(°C)	(°C)
40	-23	2	5
40	-20	2	5
40	-17	2	5
40	-15	2	5
40	-13	2	5

5.4

Estudo de caso

O programa computacional resultante foi aplicado em um estudo de caso, descrito a seguir. Os estados termodinâmicos nos principais pontos do ciclo, tanto pelo lado do refrigerante como pelo lado do fluido secundário, foram definidos a partir dos balanços de massa e energia resumidos na Tabela 2 e detalhados no Capítulo 3. A Tabela 4 descreve as características e dados de operação do sistema estudado.

Tabela 4. Dados de entrada para o estudo de caso

Parâmetros	Símbolo	Valor
<u>Características do sistema</u>		
Refrigerante		Amônia
Compressor		Tipo alternativo
Condensador, evaporador e trocador secundário		Trocadores de tubo duplo
Bomba		Deslocamento positivo
Fluido secundário (água ou nanofluido)		Óxido de alumínio + água
Fluido refrigerado		Água
<u>Dados geométricos</u>		
Diâmetro do tubo interior (evaporador)	$D_{t,EVA}$	0,03184 m
Diâmetro do tubo interior (trocador secundário)	$D_{t,SEC}$	0,03184 m
Comprimento do trocador secundário	L_{SEC}	25 m
Diâmetro das tubulações de interligação circuito secundário	D_{tub}	0,03184 m
Comprimento das tubulações de interligação circuito secundário ¹	L_{tub}	0; 10 m; 100 m
<u>Dados operacionais</u>		
Temperatura do meio ambiente	T_0	298 K
Temperatura global do fluido refrigerado	T_L	293 K

¹ Por causa da grande influência que o comprimento das tubulações do circuito secundário tem nas análises termodinâmica e econômica, foram analisados três comprimentos diferentes.

Grau de superaquecimento	ΔT_{sh}	2 K
Grau de sub-resfriamento	ΔT_{sc}	10 K
Temperatura do fluido refrigerado à entrada do trocador secundário	$T_{fw,SEC,in}$	297 K
Temperatura do fluido secundário à entrada do evaporador	$T_{sf,EVA,in}$	293 K
Pressão do fluido secundário à entrada do evaporador	$P_{sf,EVA,in}$	101,3 kPa
Temperatura da água de entrada ao condensador	$T_{w,CON,in}$	298 K
Pressão da água de entrada ao condensador	$P_{w,CON,in}$	101,3 kPa
Variação de temperatura no condensador	ΔT_{CON}	10 K
Eficiência da bomba	η_{PUMP}	70%
Concentração volumétrica de partículas no fluido secundário	φ	0 – 9%

Propriedades das nanopartículas

Diâmetro de nanopartícula	d_{np}	20 nm
Condutividade	k_{np}	0,040 kW/(m,K) (Velagapudi et al, 2008)
Calor específico	$c_{p,np}$	0,765 kJ/(kgK) (Velagapudi et al, 2008)
Massa específica	ρ_{np}	3970 kg/m ³ (Velagapudi et al, 2008)

Dados econômicos

Custo de aquisição das nanopartículas: Óxido de alumínio tipo gamma, 99%, 20 nm (NANOAMOR, 2012)	C_{np}	210 \$USD/kg
Custo da energia elétrica	C_{op}	0,47095 R\$/kWh
Tarifas de baixa tensão, não residencial, Março/2012 (LIGHT, 2012) ²		
Taxa de câmbio vigente, cotação de fechamento do dólar no dia 16/03/2012 (BCB, 2012)	$F_{R\$/USD}$	1,8012 R\$/USD
Tempo anual de operação ³	t_{op}	8760 h; 5840 h; 2920h

² O custo da energia elétrica responde a uma estrutura de tarifas que depende da tensão da rede fornecedora e do contrato específico estabelecido com o consumidor. Este pode apresentar tarifas diferenciadas para as diferentes estações do ano e segundo a distribuição diária de carga. No presente estudo, à maneira de simplificação, será considerado um valor constante da tarifa de energia elétrica.

³ Devido à grande influência do tempo anual de operação, foram analisados três diferentes números de horas operadas por ano.

5.4.1

Resultados da simulação

Os parâmetros de saída obtidos pelo programa são listados a seguir:

- Temperatura de saída do fluido refrigerado, $T_{fw,SEC,out}$
- Coeficiente de desempenho do ciclo refrigerante, COP_{ciclo}
- Coeficiente de desempenho do sistema indireto de refrigeração, COP_{total}
- Eficiência racional, ψ_{TOTAL}
- Taxa de irreversibilidade total, \dot{I}_{TOTAL}
- Taxa de irreversibilidade nos componentes do sistema, $\dot{I}_{COMP}, \dot{I}_{CON}, \dot{I}_{VAL}, \dot{I}_{EVA},$

$$\dot{I}_{SEC}, \dot{I}_{PUMP}$$

Tabela 5. Resultados numéricos para o sistema base operando com água como fluido secundário, para um comprimento do circuito secundário de 10m

Parâmetro	Unidade	Valor	Parâmetro	Unidade	Valor
T_1	K	280	Re_{SEC}	(-)	12070
T_2	K	390	$\alpha_{sf,EVA}$	kW/m ² K	1,516
T_3	K	308	$\alpha_{sf,SEC}$	kW/m ² K	1,867
T_4	K	278	$\alpha_{fw,SEC}$	kW/m ² K	0,763
T_{EVA}	K	278	U_{SEC}	kW/m ² K	0,542
T_{CON}	K	318	\dot{Q}_{EVA}	kW	11,1
$T_{sf,EVA,in}$	K	288	\dot{Q}_{CON}	kW	13,4
$T_{sf,EVA,out}$	K	281	\dot{W}_{PUMP}	kW	0,069
$T_{sf,SEC,out}$	K	288	\dot{W}_{COMP}	kW	2,518
$T_{sf,SEC,in}$	K	281	\dot{I}_{COMP}	kW	0,378
$T_{fw,SEC,out}$	K	290	\dot{I}_{CON}	kW	1,026
$T_{w,CON,in}$	K	298	\dot{I}_{VAL}	kW	0,101
$T_{w,CON,out}$	K	305	\dot{I}_{EVA}	kW	0,290

\dot{m}_{ref}	kg/s	0,010	\dot{I}_{SEC}	kW	0,333
\dot{m}_{sf}	kg/s	0,377	\dot{I}_{PUMP}	kW	0,021
$\dot{m}_{w,CON}$	kg/s	0,457	\dot{I}_{TOTAL}	kW	2,149
\dot{m}_{fw}	kg/s	0,388	\dot{E}_{Qc}	kW	0,190
$P_{sf,SEC,in}$	kPa	228	ε_{SEC}	(-)	0,464
$P_{sf,SEC,out}$	kPa	225	COP_{ciclo}	(-)	4,420
$P_{sf,EVA,out}$	kPa	100	COP	(-)	4,302
V_{EVA}	m ³	0,037	ψ	(-)	0,073
V_{SEC}	m ³	0,080			
V_{tub}	m ³	0,032			

A seguir, apresenta-se um conjunto de curvas obtidas a partir da simulação, observando-se o efeito da variação da concentração de nanopartículas em diversos indicadores de desempenho. A faixa estudada para a concentração é de 0 a 9%, a qual coincide com a faixa de validade das correlações usadas para o cálculo da viscosidade (2.13) e (2.14). É importante destacar que todas as análises são realizadas considerando um produto exergético (exergia do frio produzido) constante e que as comparações entre os diferentes casos se fazem para iguais números de Reynolds no fluido secundário.

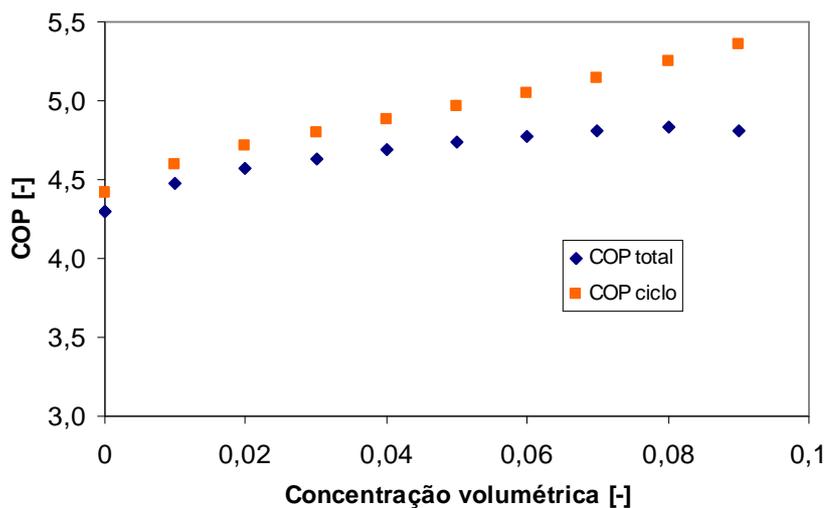


Figura 13. Efeito da concentração volumétrica de nanopartículas no desempenho do ciclo e no desempenho global. Para $Re = 13000$ e um comprimento do circuito secundário de 10 m

A Figura 13 mostra o comportamento do COP_{total} , o qual leva em consideração tanto o trabalho de compressão quanto o trabalho de bombeamento e do COP_{ciclo} , que contempla, apenas o trabalho do compressor.

As Figuras 14 e 15 mostram que o aumento da concentração volumétrica beneficia tanto os coeficientes de desempenho quanto a eficiência racional do sistema indireto de refrigeração.

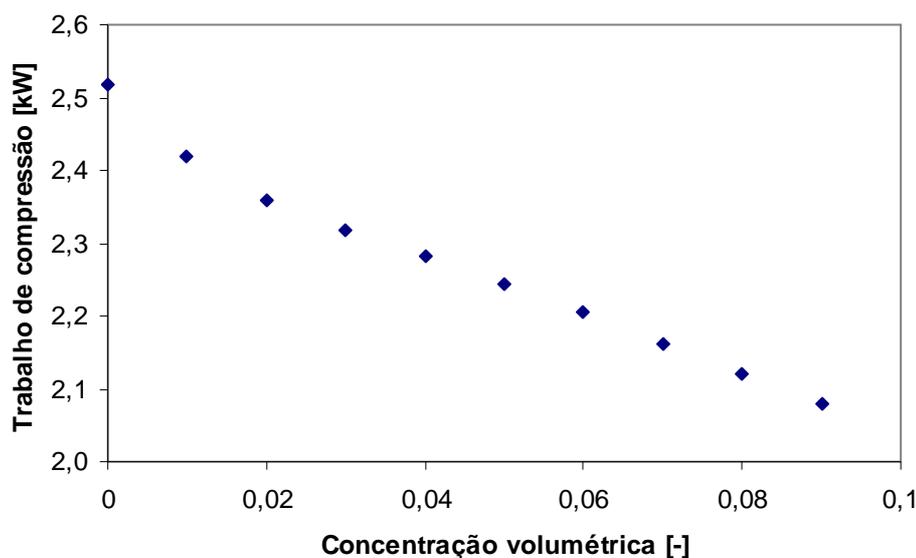


Figura 14. Efeito da concentração volumétrica de nanopartículas no trabalho de compressão. Para $Re = 13000$

Para uma dada carga térmica, quando diminui a energia consumida, como mostrado na Figura 14, o coeficiente de desempenho do sistema de refrigeração aumenta com a concentração de partículas. O trabalho de compressão diminui com a concentração porque a pressão de evaporação aumenta (Figura 15) e, para uma pressão de condensação constante, a relação de compressão diminui. Portanto, para uma maior concentração de partículas, o ciclo demanda menos potência.

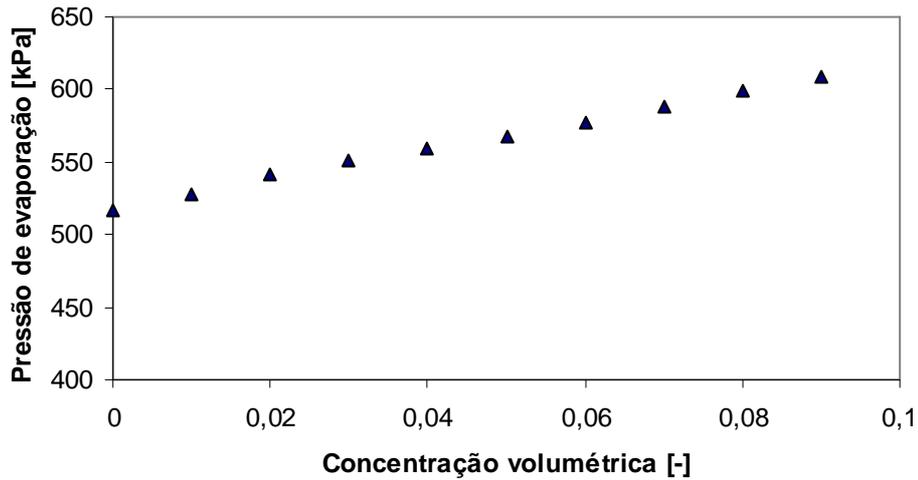


Figura 15. Efeito da concentração volumétrica de nanopartículas na pressão de evaporação. Para $Re = 13000$

Ao comparar ambos coeficientes de desempenho da Figura 13, pode-se observar que o COP do ciclo é sempre superior ao COP do sistema como um todo. Isto é devido ao fato de, sobre este último, atuar a potência de bombeamento, a qual aumenta com a concentração volumétrica de partículas, como mostrado na Figura 16 para vários comprimentos do circuito secundário.

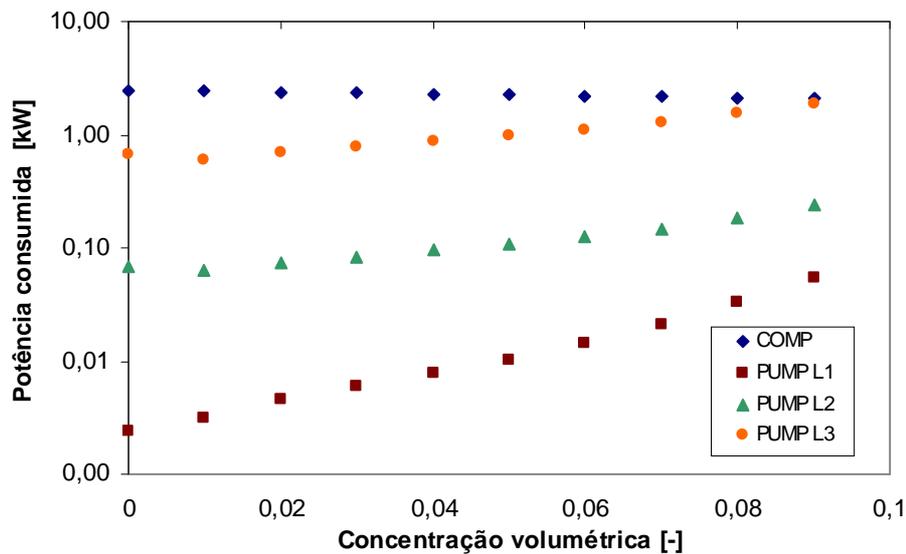


Figura 16. Efeito da concentração volumétrica de nanopartículas na potência de compressão e de bombeamento para três comprimentos equivalentes deferentes: $L1=0m$; $L2=10m$; $L3=100$

Por sua parte, a eficiência racional também exibe um aumento com a concentração de nanopartículas. Como mostrado na Figura 17, para um comprimento equivalente do circuito secundário de 10m.

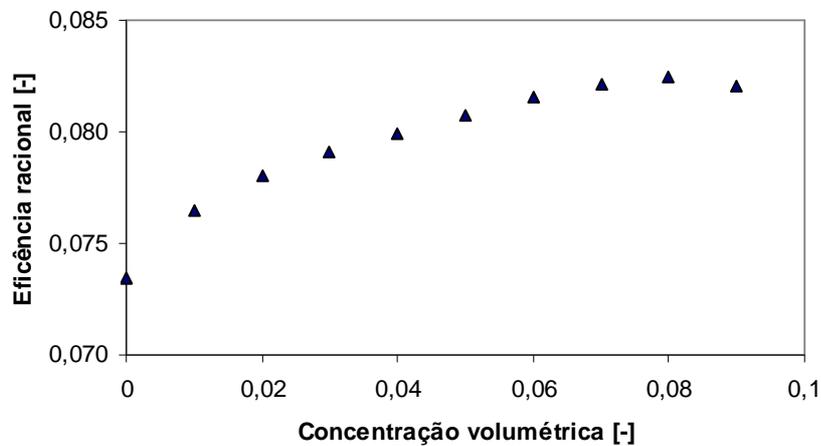


Figura 17. Efeito da concentração volumétrica de nanopartículas na eficiência racional global. Para $Re = 13000$ e um comprimento do circuito secundário de 10 m

Para um produto exergético constante, no caso a exergia do frio produzido, ao diminuir a exergia de entrada a eficiência racional aumenta. Ela apresenta diferentes pontos de máximo para os diferentes comprimentos, como aparece na Figura 18, sendo aproximadamente de 8% para o comprimento de 10 m, L2, e de 1% para o comprimento de 100m, L3. As curvas referentes ao COP total e do ciclo, Figura 13, não mostraram nenhum ponto ótimo na faixa de concentração estudada no presente trabalho de 0 a 9%.

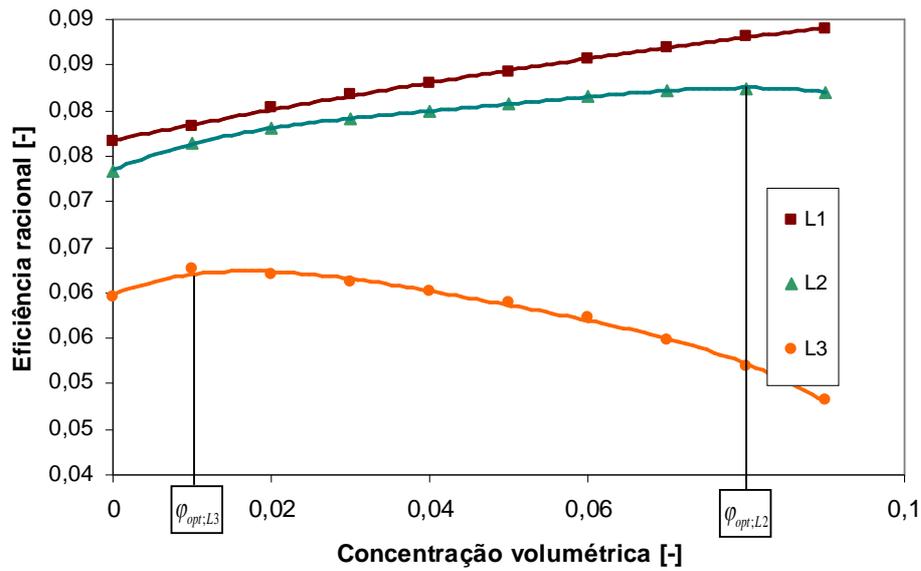


Figura 18. Efeito da concentração volumétrica de nanopartículas na eficiência racional global. Para $Re = 13000$ e para três comprimentos equivalentes diferentes: $L1=0m$; $L2=10m$; $L3=100$

Na Figura 19 são comparadas as irreversibilidades de todos os componentes do sistema em função da concentração de nanopartículas.

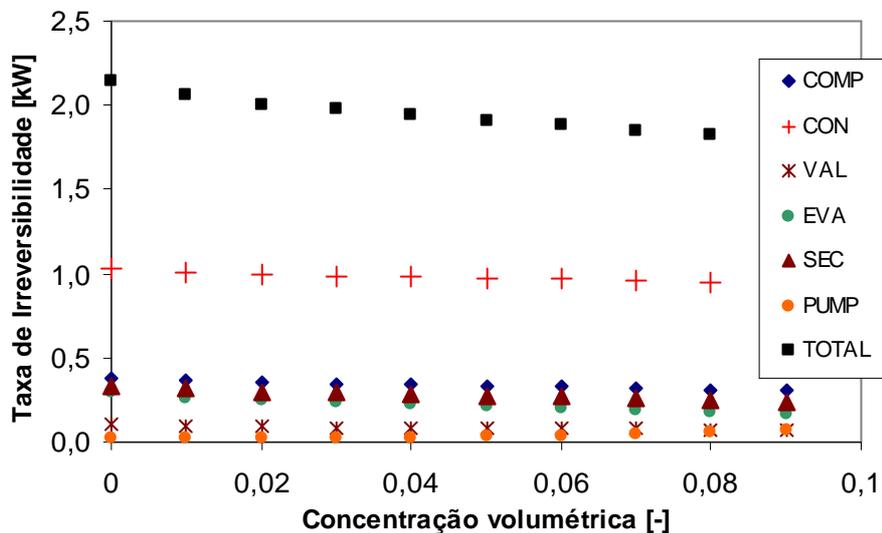


Figura 19. Irreversibilidades dos componentes do sistema variando a concentração volumétrica de nanopartículas. Para $Re = 13000$ e um comprimento do circuito secundário de 10 m

Como pode ser observado na Figura 19, as irreversibilidades de quase todos os componentes diminuem moderadamente com a concentração volumétrica pois, ao aumentar a concentração, o efeito da diminuição da irreversibilidade térmica domina o efeito da irreversibilidade mecânica. Esta última somente predomina na bomba de fluido secundário como apresentado na Figura 20, na qual se comparam apenas os subsistemas do circuito secundário.

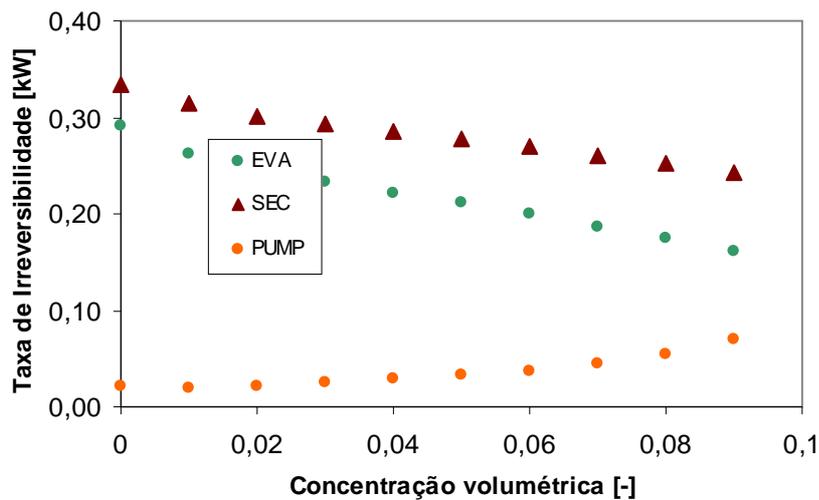


Figura 20. Irreversibilidades dos componentes do circuito secundário variando a concentração volumétrica de nanopartículas. Para $Re = 13000$ e um comprimento do circuito secundário de 10 m

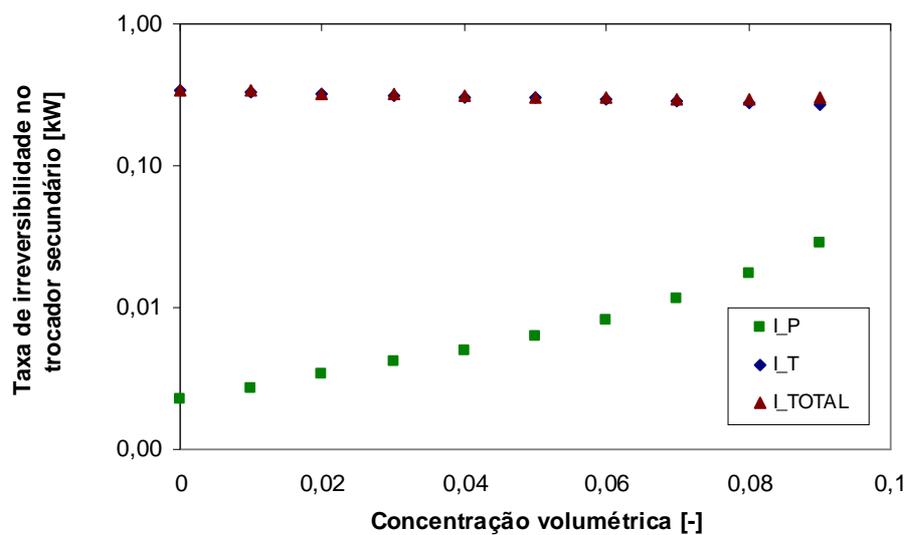


Figura 21. Irreversibilidades do trocador secundário variando a concentração volumétrica de nanopartículas. Para $Re = 13000$

Na Figura 21 são quantificadas as irreversibilidades térmica e mecânica para o trocador secundário. A competição entre o aumento da transferência de calor e a queda de pressão, provocada pelo uso de nanofluidos, e especificamente pelo aumento da concentração, é mostrada. Como pode ser apreciado, no caso do trocador secundário a irreversibilidade térmica tem um efeito predominante e diminui enquanto a mecânica aumenta, sendo esta última de uma a duas ordens de grandeza inferior.

A diminuição da irreversibilidade térmica se deve à redução da diferença de temperatura à qual se troca calor, como aparece ilustrado na Figura 22, para o trocador secundário e para o evaporador.

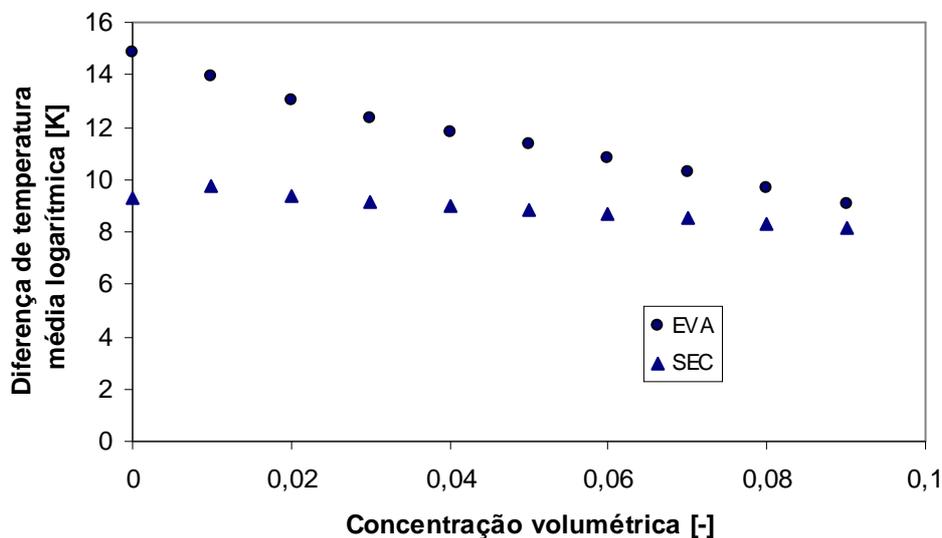


Figura 22. Efeito da concentração volumétrica de nanopartículas na diferença de temperaturas média logarítmica no evaporador e no trocador secundário. Para $Re = 13000$

A irreversibilidade da bomba aumenta em várias vezes com o aumento da concentração (Figura 20). Por outro lado, nota-se que o valor relativo da mesma em comparação com as irreversibilidades dos trocadores é pequeno e a diferença entre eles diminui à medida que a concentração aumenta. Este aumento da irreversibilidade mecânica é motivado, principalmente, pelo aumento da viscosidade e da vazão mássica do fluido secundário, como ilustrado na Figura 23.

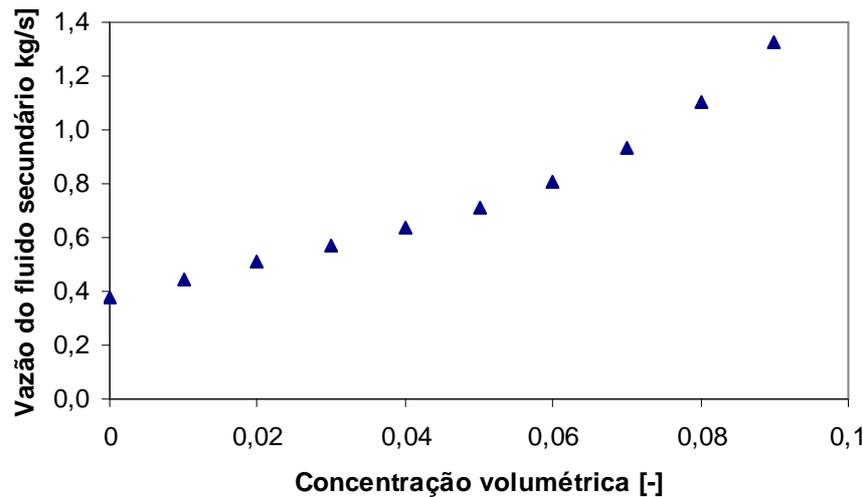


Figura 23. Vazão de fluido secundário em função da concentração volumétrica de nanopartículas, para $Re = 13000$

Pelo método dos coeficientes estruturais, apresentado no Capítulo 4, foram determinados os coeficientes da concentração volumétrica para cada um dos componentes do circuito secundário e são listados na Tabela 6, para um comprimento de 10m do circuito secundário e considerando fixa a exergia de saída do sistema.

Tabela 6. Coeficientes estruturais para os componentes do circuito secundário. Comprimento equivalente do circuito secundário igual a 10m

Componente	Coefficiente estrutural	Equação
Evaporador	2,0610	$\sigma_{EVA,\varphi} = \left(\frac{\partial \dot{I}_{TOTAL}}{\partial \dot{I}_{EVA}} \right)_{\varphi}$
Trocador secundário	3,6386	$\sigma_{SEC,\varphi} = \left(\frac{\partial \dot{I}_{TOTAL}}{\partial \dot{I}_{SEC}} \right)_{\varphi}$
Bomba	Variando linearmente com φ	$\sigma_{PUMP,\varphi} = \left(\frac{\partial \dot{I}_{TOTAL}}{\partial \dot{I}_{PUMP}} \right)_{\varphi}$

Como se pode observar na Tabela 6, o trocador secundário apresenta um coeficiente estrutural da concentração volumétrica positivo e de maior módulo. Em virtude disso, é considerado o subsistema que, para o comprimento de 10m,

provoca maior impacto positivo na irreversibilidade total do sistema. Pelo mesmo motivo, será analisado mais detidamente.

A seguir, são apresentados os resultados obtidos na determinação do coeficiente estrutural para trocador secundário.

Na Figura 24 são apresentados três gráficos, os quais correspondem a diferentes comprimentos das tubulações do circuito secundário, a saber: L1, comprimento desprezível; L2, dez metros de comprimento e L3, cem metros de comprimento. Em ela aparecem as curvas aproximadas de ajuste com as equações correspondentes.

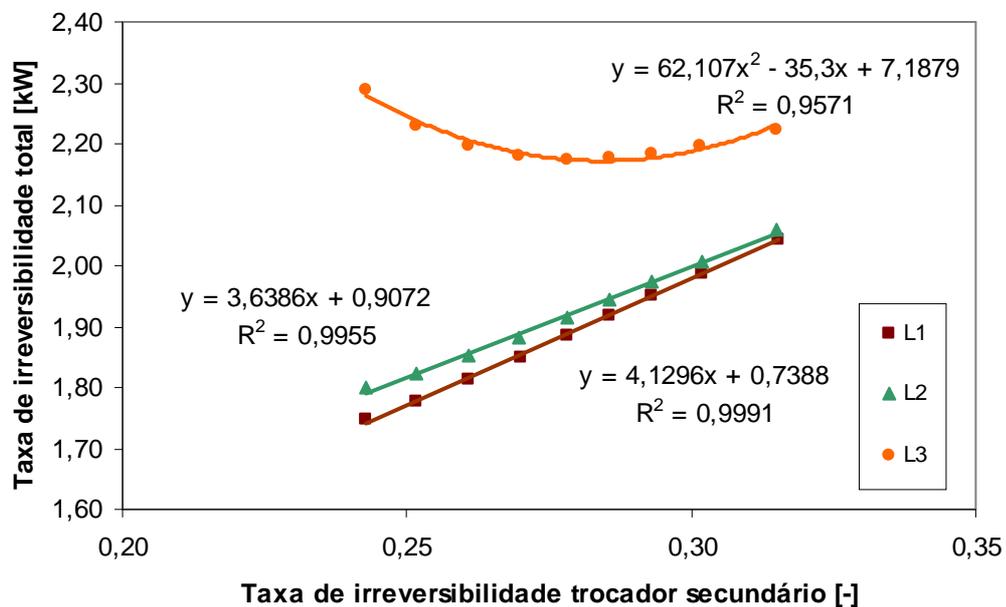


Figura 24. Coeficiente estrutural para o trocador secundário. L1=0m; L2=10m; L3=100

O coeficiente estrutural relativo ao trocador secundário pela variação da concentração volumétrica é, segundo a equação (4.16), igual a:

$$\sigma_{SEC,\varphi} = \left(\frac{\partial \dot{I}_{TOTAL}}{\partial \dot{I}_{SEC}} \right)_{\varphi} \quad (4.16)$$

De acordo com a equação (4.16), o valor numérico deste coeficiente é a derivada da irreversibilidade total em função da irreversibilidade do secundário. No presente estudo, para casos de comprimento L1 e L2, a função é uma reta e sua derivada é constante e igual ao coeficiente angular da mesma:

$$\sigma_{SEC,\varphi,L1} = 4,1296 ; \sigma_{SEC,\varphi,L2} = 3,6386$$

O fato de o coeficiente ser maior que zero indica que o aumento da concentração de nanopartículas causa um impacto favorável na eficiência global do sistema. O valor numérico significa que, para o caso em estudo, qualquer redução da taxa de irreversibilidade no trocador secundário reduziria a irreversibilidade total em um valor aproximadamente 4 vezes maior que aquela redução. Isto é, de 4,13 para o caso L1 e de 3,64 para o caso L2. Ademais, pode-se estabelecer que qualquer redução na irreversibilidade local reduz nessa mesma proporção o consumo de exergia da planta para o caso estudado.

Para o comprimento das tubulações do circuito secundário igual a cem metros, representado por L3, pode-se observar que a função que relaciona a irreversibilidade total à do trocador secundário tem uma tendência quadrática. Portanto sua derivada não será mais um valor constante e sim uma função que é crescente linearmente. O valor do coeficiente estrutural variando com a taxa de irreversibilidade no trocador secundário e com a concentração, para este caso, é representado na Figuras 25 e 26, respectivamente.

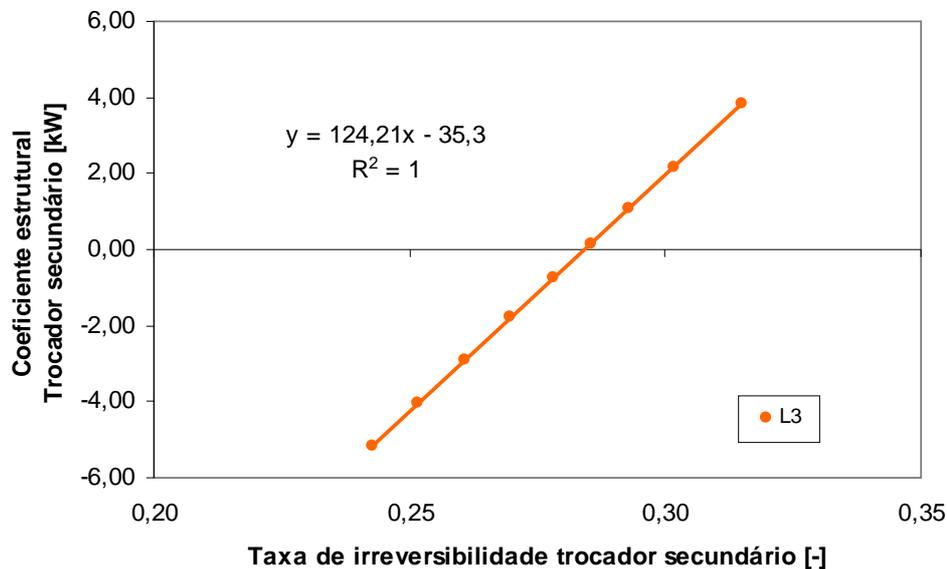


Figura 25. Variação do coeficiente estrutural do trocador secundário com sua taxa de irreversibilidade. Comprimento das tubulações do circuito secundário 100m

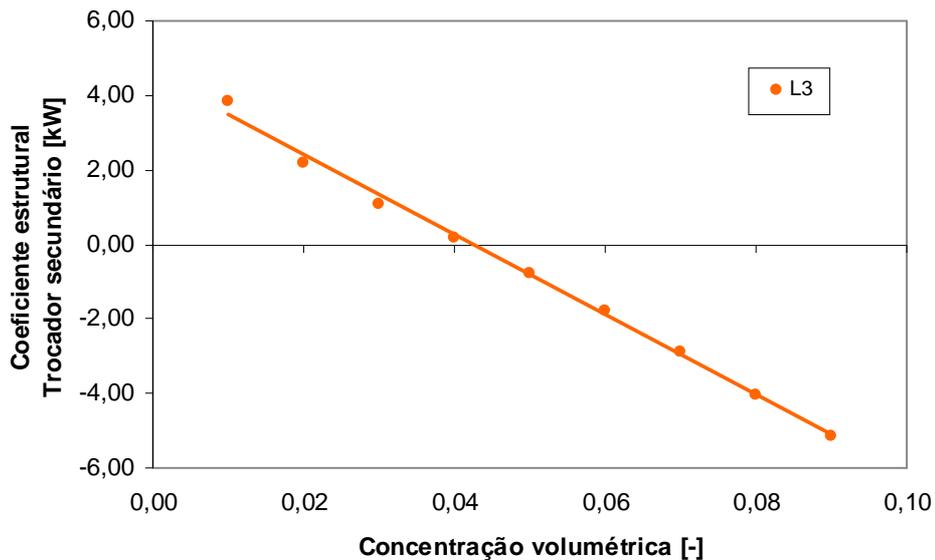


Figura 26. Variação do coeficiente estrutural do trocador secundário com a concentração volumétrica de nanopartículas. Comprimento das tubulações do circuito secundário 100m

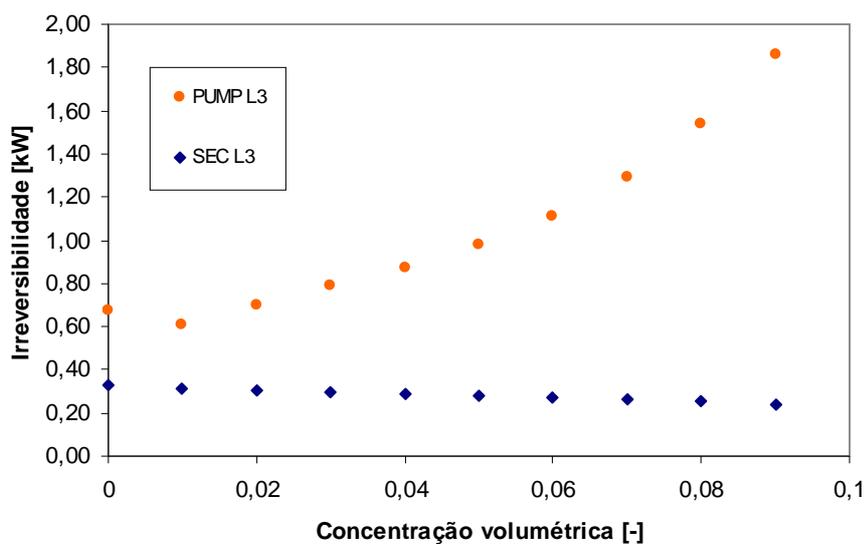


Figura 27. Variação das irreversibilidades do trocador secundário e da bomba com a concentração volumétrica de nanopartículas. Comprimento das tubulações do circuito secundário 100m

Conforme observado na Figura 26, para o comprimento de cem metros, a tendência é que quanto maior a concentração, mais negativo é o coeficiente estrutural do trocador secundário. Portanto, uma melhora no trocador secundário (como o aumento da concentração) tem menos repercussão no desempenho global do sistema. Isto é, para grande comprimentos das tubulações, o trocador

secundário deixa de ter importância na determinação da irreversibilidade global, já que a queda de pressão será muito maior no comprimento da tubulação do que no trocador propriamente dito. Este fato se reflete na Figura 27 onde são comparadas as irreversibilidades da bomba e do trocador secundário para o comprimento L3.

Para o comprimento de cem metros, a variação da irreversibilidade com a concentração volumétrica de nanopartículas no trocador secundário é desprezível quando comparada com a variação que tem lugar na bomba. Esta é uma das razões pelas quais, para este comprimento, o coeficiente estrutural do trocador secundário toma valores de positivos a negativos, passando por zero. Indica, assim, que somente para concentrações menores que 4% (Figura 26), o trocador secundário tem impacto positivo na irreversibilidade global.

5.4.2

Análise econômica

São apresentados nesta seção os aspectos econômicos aplicados a vários casos caracterizados por diferentes comprimentos equivalentes do circuito secundário e diferentes tempos de operação anual.

5.4.2.1

Custos monetários

Como definiu-se na equação (4.18), o custo monetário total tem uma componente variável com a concentração, C_{var} , que pode calcular-se como:

$$C_{var} = C_{np}(\varphi) + C_{op}(\varphi) \quad (4.18)$$

considerando o custo de aquisição das nanopartículas como sendo:

$$C_{np} = \kappa \mathcal{V}_{nf} \varphi \quad (4.20)$$

Os valores de κ e \mathcal{V}_{nf} , os quais dependem, respectivamente, dos preços do mercado e das características do circuito secundário, serão determinados a seguir.

Para o presente estudo, a constante de proporcionalidade κ pode ser obtida pela substituição dos dados fornecidos pela Tabela 4 na equação (4.21):

$$\kappa = 210 \frac{USD}{kg(np)} \times 1,80 \frac{R\$}{USD} \times 3970 \frac{kg(np)}{m^3(np)} = 1,5 \times 10^6 \frac{R\$}{m^3(np)} \quad (5.1)$$

O inventário volumétrico anual de nanofluido, V_{nf} , é calculado em função do volume dos componentes do circuito secundário e do volume das tubulações de interligação entre eles.

No presente estudo, considera-se que será feita reposição do nanofluido para fins de manutenção da instalação à frequência de uma vez por ano⁴, portanto:

$$N_r = 1 \quad (5.2)$$

Assim,

$$V_{nf} = V_{SEC} \quad (5.3)$$

onde:

$$V_{SEC} = V_{EVA} + V_{TSEC} + V_{PUMP} + V_{tub} \quad (5.4)$$

Desprezando o volume da bomba e substituindo na equação (5.4) os volumes calculados a partir dos dados fornecidos na Tabela 4, pode-se determinar o inventário anual de nanofluido. Cada um dos casos, com diferentes comprimentos de tubulações do circuito secundário, terá um valor de V_{tub} . No caso do comprimento equivalente igual a dez metros, L2, o inventário será obtido como:

$$V_{nf} = 0,037 + 0,080 + 0,032 = 0,149 \text{ m}^3 \quad (5.5)$$

O custo de operação representado pelo custo da energia elétrica, em reais por ano, segundo a equação (4.24) é igual a:

$$C_{op} = \dot{E}_{in} t_{op} C_{el} \quad (4.24)$$

onde os valores de C_{el} e t_{op} são dados de entrada, fornecidos pela Tabela 4.

A composição da componente variável do custo, C_{var} , é apresentada na Figura 28 para o caso do comprimento do circuito equivalente de 10m e para um tempo de operação de 8760 horas anuais. Levantaram-se separadamente curvas para o custo da aquisição de nanopartículas C_{np} e do custo operacional, C_{op} .

⁴ A frequência anual de reposição do nanofluido é um parâmetro que somente a experiência com instalações operando com nanofluidos irá fornecer. Na prática, pode ser determinada segundo uma análise periódica das propriedades do nanofluido. Será necessário repô-lo quando estas mudarem apreciavelmente com respeito às originais do início da operação.

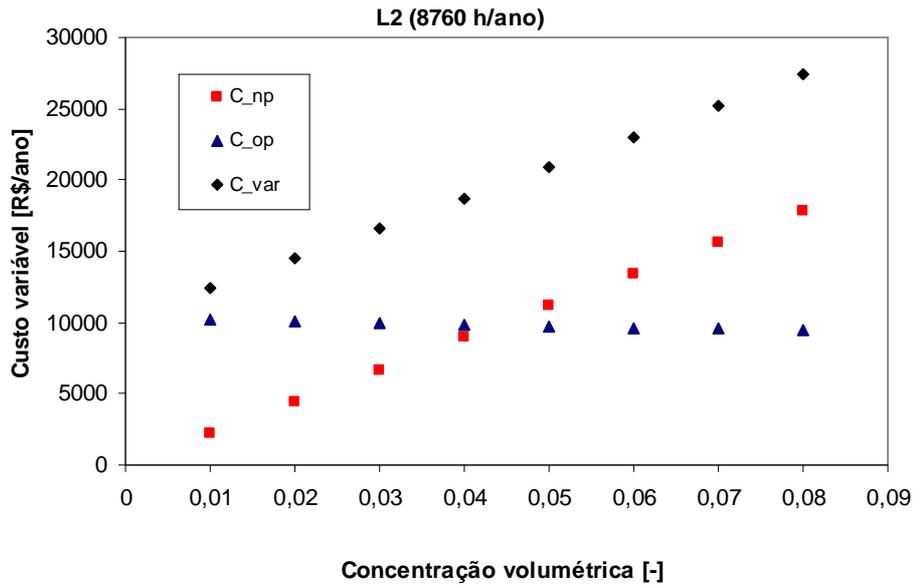


Figura 28. Componentes do custo variável para um tempo de operação de 8760 h/ano, comprimento equivalente do circuito secundário de 10m

Na Figura 28 pode-se observar como, enquanto o custo de operação tem uma discreta diminuição com o aumento da concentração, o custo de nanopartículas aumenta apreciavelmente com esta, tendo uma grande influência na componente variável do custo monetário.

No custo de operação incide diretamente a concorrência presente nos nanofluidos entre o aumento da transferência de calor e a queda de pressão, a qual vem sendo analisada ao longo do presente estudo. Assim sendo, o custo operacional será analisado, separadamente, na Figura 29. Na mesma figura, é levantado o comportamento do custo de operação, C_{op} , em função do aumento da concentração volumétrica de nanopartículas para três comprimentos equivalentes diferentes do circuito secundário e um mesmo tempo de operação anual.

É necessário frisar, também, que os altos valores obtidos para os custos monetários anuais associados à operação com nanofluidos no sistema indireto de refrigeração analisado respondem, sobre tudo, aos altos custos atuais de obtenção de nanopartículas. Sendo este um material em atual fase de pesquisa e desenvolvimento, é de esperar que, num futuro próximo, com a aparição de novas tecnologias, esses custos diminuam consideravelmente. Esse barateamento faria realmente viável o tipo de aplicação analisada para os nanofluidos.

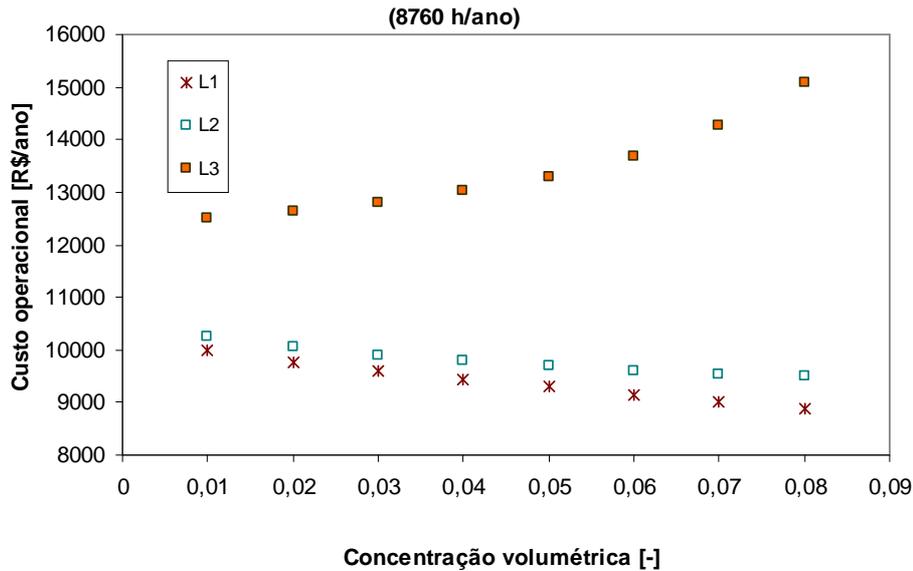


Figura 29. Custo de operação para um período de operação de 8760 h/ano, comprimentos L1=0, L2=10m e L3=100m

Verifica-se que, para comprimentos do circuito equivalente desprezível ou igual a dez metros, se produz uma diminuição do custo monetário de operação, devido a que a potência elétrica consumida para obter o produto exergético diminui com o aumento da concentração. Em outras palavras: a melhora térmica do sistema supera o gasto por aumento do atrito. Por sua parte, o circuito com comprimento equivalente igual a cem metros exibe um aumento do custo de operação com a concentração de nanopartículas, devido a que a potência de bombeamento requerida supera as melhoras térmicas do sistema. Existe, portanto, um comprimento equivalente do circuito secundário entre dez e cem metros a partir do qual o aumento da concentração de nanopartículas não mais representa uma economia de energia elétrica e sim um aumento do consumo.

5.4.2.2

Otimização termoeconômica

Para determinar o ponto de ótimo termoeconômico da concentração volumétrica é preciso encontrar a solução da equação (4.32) abaixo, obtida a partir da derivação da equação do custo total, a qual fornece a condição de ótimo:

$$\frac{\kappa V_{nf}}{t_{op} C_{el} \sigma_{SEC}} = -\frac{\partial \dot{I}_{SEC}}{\partial \varphi} \quad (4.32)$$

O coeficiente estrutural, σ_{SEC} , pode ser determinado como descrito no Capítulo 4.

Nas figuras apresentadas a seguir, levantam-se, separadamente, as curvas de ambos os termos da equação (4.32). São apresentados nove casos, dados pelas combinações dos três comprimentos equivalentes das tubulações do circuito secundário com os três tempos de operação anual, alocados na Tabela 4, isto é, 8760, 5840 e 2920 horas por ano, respectivamente.

Nas Figuras 30a e 30b, o lado direito da condição de ótimo, $MDE = -\frac{\partial \dot{I}_{SEC}}{\partial \varphi}$,

o qual representa a variação da taxa de irreversibilidade do trocador secundário, permanece com a mesma variação, pois a irreversibilidade deste trocador não depende do comprimento das tubulações. O lado esquerdo da equação,

$MEE = \frac{\kappa V_{nf}}{t_{op} C_{el} \sigma_{SEC}}$, é levantado em gráfico para cada comprimento.

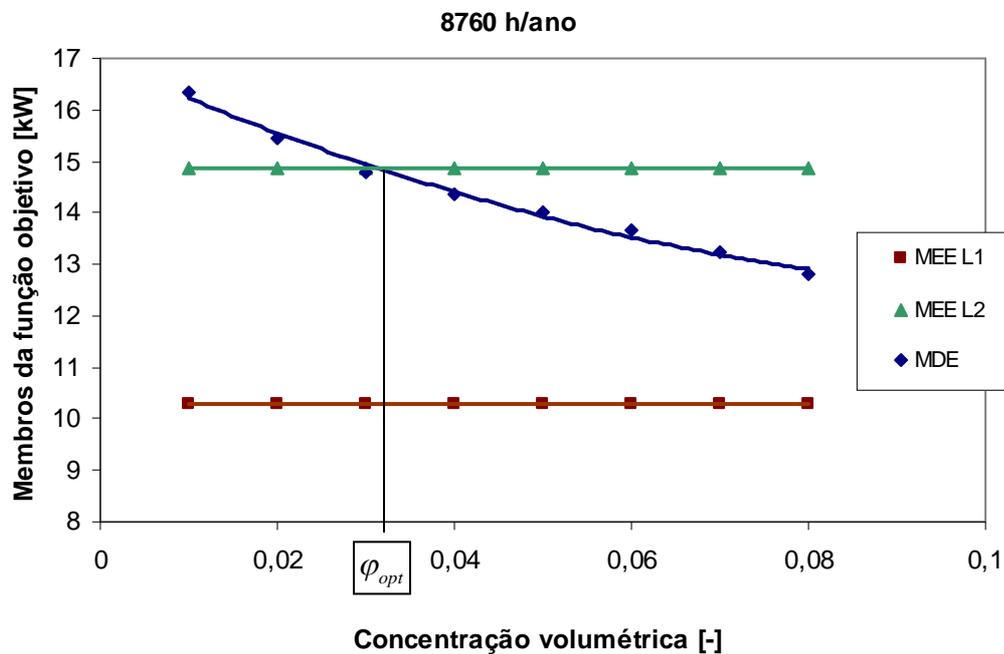


Figura 30a. Otimização gráfica para um tempo de operação de 8760 h/ano, comprimentos L1=0 e L2=10m

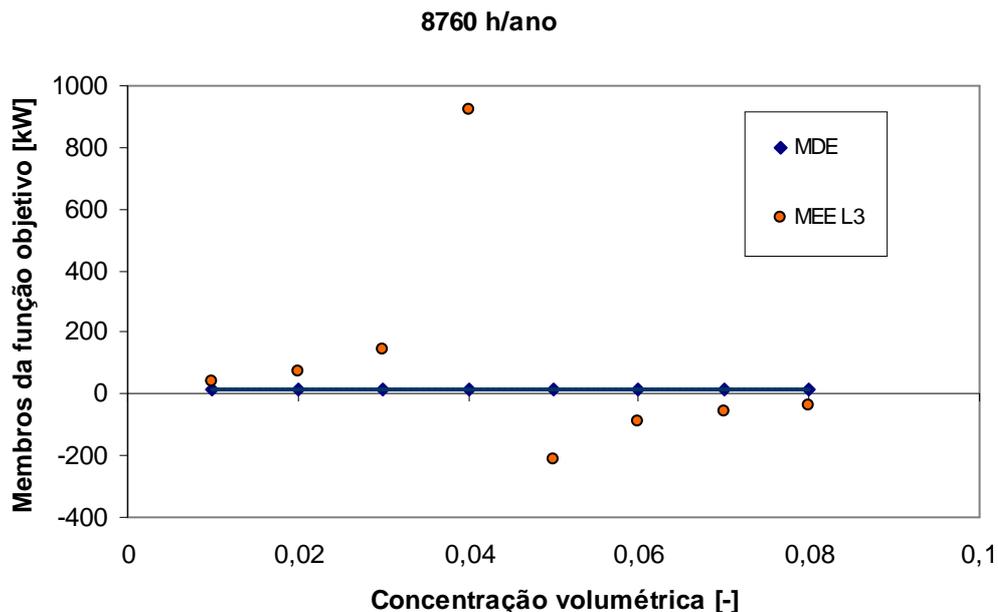


Figura 30b. Otimização gráfica para um tempo de operação de 8760 h/ano, comprimento $L_3=100\text{m}$

Para um tempo de operação de vinte e quatro horas por dia (8760h/ano), somente o comprimento L_2 , dez metros, apresenta um ponto de ótimo correspondente a uma concentração de nanopartículas de, aproximadamente, 3,2%. É de se notar que este ponto de ótimo tem um valor diferente do determinado para a eficiência racional, de 8%, para as mesmas condições (Figura 18). Este resultado indica que nem sempre o ponto de ótimo exergético coincide com o ponto de ótimo para mínimo custo de operação. Este resultado é coerente com a afirmação, feita no início do Capítulo 4, de que as medidas tomadas para aumentar o rendimento térmico de um sistema podem trazer consigo a elevação do custo total. Assim sendo, quando se levam em consideração, simultaneamente, os fatores econômicos e térmicos, o ponto ótimo termoeconômico encontra-se deslocado porque contempla uma relação custo-benefício que vai além do meramente energético.

Verifica-se na Figura 30b que, para o comprimento de cem metros, o membro esquerdo da condição de ótimo (MEE) apresenta uma assíntota vertical para um valor da concentração de 0,042, valor no qual o coeficiente estrutural do trocador secundário toma o valor zero (Figura 25). De acordo com Kotas (1995), $\sigma_{k,i} = 0$ representa um caso particular onde a melhora no desempenho do

elemento k -ésimo é contrabalançada por uma igual redução em desempenho de outros elementos. O resultado é nenhum efeito líquido sobre a eficiência geral da planta.

A seguir, são apresentadas as figuras que mostram, para cada um dos três comprimentos analisados, a otimização termoeconômica para três diferentes períodos anuais de operação.

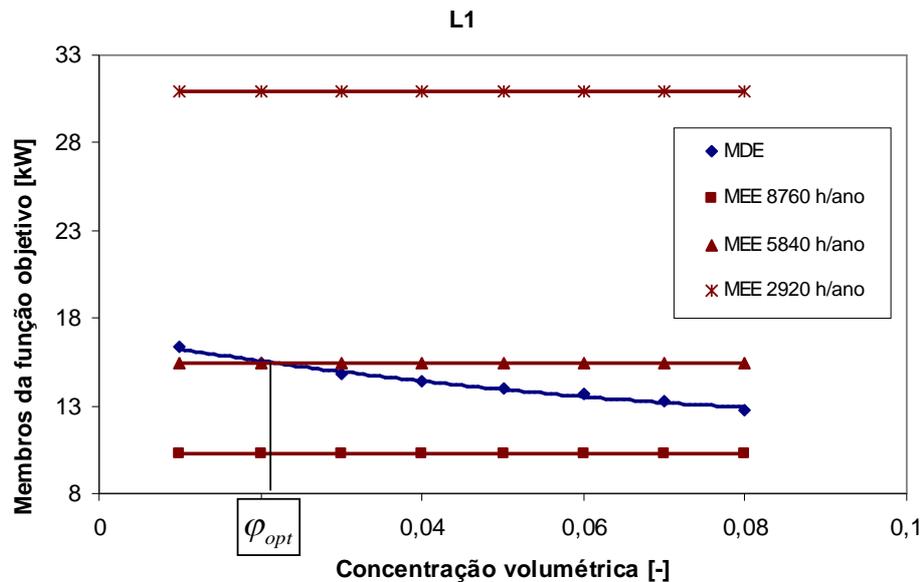


Figura 31a. Otimização gráfica para um comprimento desprezível das tubulações do circuito secundário

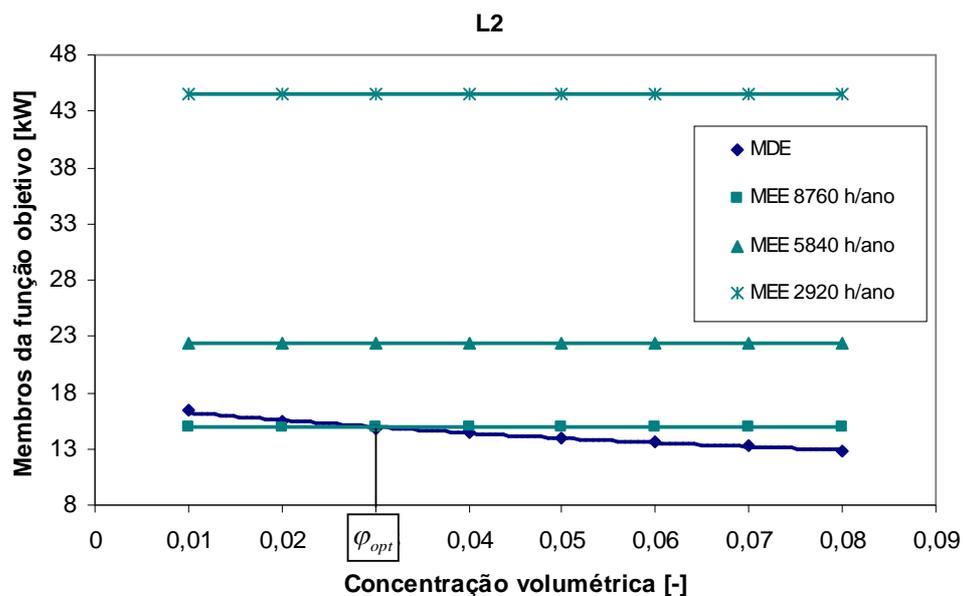


Figura 31b. Otimização gráfica para um comprimento das tubulações do circuito secundário igual a 10 m

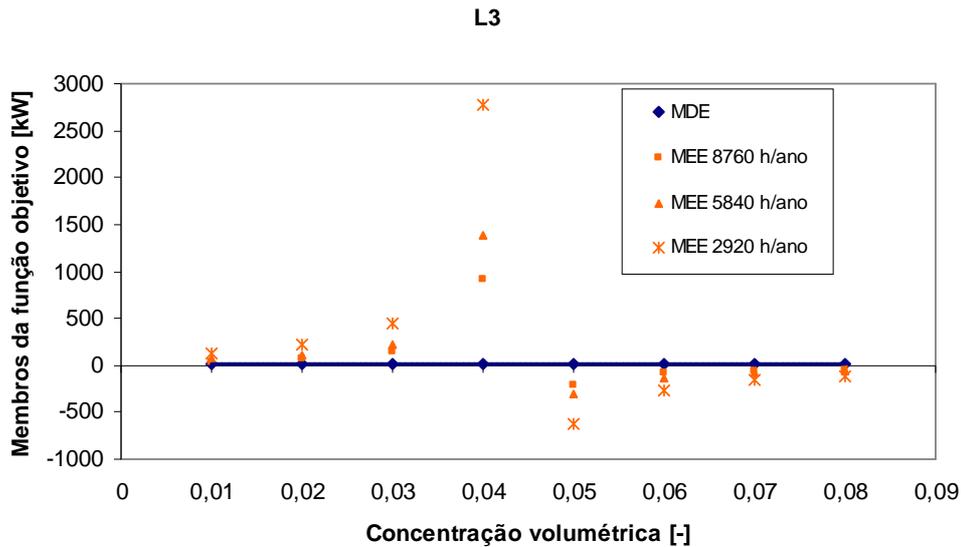


Figura 31c. Otimização gráfica para um comprimento das tubulações do circuito secundário igual a 100 m

As Figuras 31 a, b e c mostram que, se o período de funcionamento do sistema aumenta, diminui o valor do membro esquerdo da condição de ótimo, o qual está relacionado com os custos monetários. Por outro lado, elas apontam para diferentes valores do ponto de concentração volumétrica ótima para diferentes comprimentos equivalentes, os quais se dão para tempos de operação anual distintos.

No caso do comprimento de cem metros (Figura 31c), os valores da componente de custo de operação apresentam um comportamento assintótico em todos os períodos de operação anual para o mesmo valor de concentração volumétrica de 0,042. Isto se deve ao fato de que, para este caso, o coeficiente estrutural do trocador secundário é variável e toma valores que vão de positivo a negativo, assumindo valor zero para a concentração volumétrica de 0,042, como se pode apreciar na Figura 25. Esse resultado corrobora o fato de que, quando o comprimento das tubulações do circuito secundário for muito grande, o trocador secundário deixa de ter importância na irreversibilidade total, como esperado. Em todo caso, inclusive para baixas concentrações – onde o coeficiente estrutural é positivo – os membros esquerdo e direito da condição de ótimo não se igualam e, por isso, para o comprimento de cem metros, nenhum valor de concentração ótima será obtido para qualquer período de operação.

Pode-se observar que os resultados das otimizações, para períodos de operação diferentes, fornecem diferentes valores. Um resultado importante desta seção é que, para os diferentes cenários caracterizados por vários comprimentos equivalentes do circuito secundário, e diferentes tempos de operação anual, o método de otimização termoeconômica encontra um ponto de equilíbrio específico, que descreve a situação do sistema. Os diferentes valores da concentração ótima aparecem comparados na Tabela 7.

Tabela 7. Concentração ótima para mínimo custo de operação anual

Comprimentos Tempos de operação	L1	L2	L3
	(0m)	(10m)	(100m)
8760 h/ano	-	0,032	-
5840 h/ano	0,022	-	-
2920 h/ano	-	-	-

5.5

Incertezas da simulação e da otimização

Após análise térmica e econômica do sistema indireto de refrigeração, operando com nanofluidos como fluido secundário, e o desenvolvimento do estudo de caso, bem como a determinação de pontos ótimos de operação, cabe comentar a validade dos resultados obtidos.

Toda simulação, ao ser uma representação matemática de um processo real, lida com incertezas dos modelos matemáticos utilizados. Essas incertezas, que afastam da realidade os resultados da simulação, podem ser resultado de diversas aproximações, suposições e hipóteses.

No caso dos nanofluidos, a comunidade científica ainda não possui pleno conhecimento sobre a profusão de fenômenos físicos envolvidos, nem existe, ainda, uma teoria que reproduza a ampla gama de dados experimentais já obtidos. Não há consenso entre os pesquisadores acerca dos modelos mais fiéis para prever o comportamento dos mesmos. Sendo assim, qualquer tentativa atual de simulação esbarra com grandes incertezas.

O presente estudo empregou as hipóteses seguintes, às quais estão associadas incertezas quando tratando-se de nanofluidos: i) mistura homogênea; ii) partículas esféricas e perfeitamente dispersas; iii) não-estimação da presença dos aditivos e de sua influência nas propriedades; iv) diâmetro de partícula como sendo um valor único em lugar de uma distribuição; v) valor exato da densidade das nanopartículas, sem os erros da dedução dos espaços vazios na medição do volume de um granulado.

Vários autores (Mansour et al, 2007; Kostic, 2008; Mahdy e Elshehabey, 2012; Haddad et al, 2012) trataram o tema das incertezas em nanofluidos. Em particular Ho et al (2008) estudaram a influência que exercem as incertezas associadas ao emprego de diferentes equações para determinar as propriedades do nanofluido sobre as características de transferência de calor. Eles demonstram que tais incertezas têm uma forte influência sobre a transferência de calor por convecção, chegando a apresentar resultados contraditórios. Certamente, este fato tem repercussão na simulação de processos com nanofluidos e, portanto, a escolha no presente trabalho de uma única equação para a determinação de cada propriedade pode trazer consigo grandes fontes de incertezas.

Em resumo, os resultados quantitativos obtidos no presente trabalho representam apenas uma idéia das faixas nas quais se move o problema. Porém, na gama de concentrações que é objeto deste estudo, as irreversibilidades térmica e mecânica diferem entre si em uma ou duas ordens de grandeza (como ilustrado, por exemplo, na Figura 21). Diante de tal diferença entre ordens de grandeza, é provável que, mesmo considerando as incertezas do modelo, os resultados obtidos na simulação e na otimização permaneçam qualitativamente iguais. Especificamente, de acordo com o modelo, os valores da irreversibilidade térmica permanecerão muito acima dos valores da irreversibilidade mecânica ainda que sob a influência de uma larga faixa de incertezas.