

## 7 Conclusões

### 7.1 Conclusões

No presente trabalho foi realizado estudo da aplicação de nanofluidos como fluidos térmicos, especificamente como fluidos secundários em sistemas indiretos de refrigeração por compressão de vapor. Foi desenvolvido modelo de simulação do sistema permitindo uma previsão realista de seu desempenho, como a determinação das pressões de condensação e evaporação, resultantes de condições prescritas de operação, incluindo o uso de um nanofluido como fluido secundário. O sistema foi, então, analisado dos pontos de vista energético e exergético. A simulação também permitiu um inovador estudo termoeconômico de sistemas indiretos de refrigeração operando com nanofluido. Uma vez elaborado o modelo termodinâmico para o sistema, foram determinados os coeficientes estruturais relativos à concentração volumétrica de nanopartículas, para os componentes do circuito secundário. Pelo método de otimização termoeconômica com coeficientes estruturais foi realizada uma otimização do custo operacional com nanofluidos, sendo determinados pontos de ótimo para a concentração volumétrica.

As principais conclusões derivadas da análise do sistema indireto de refrigeração, objeto de estudo da tese, são listadas a seguir.

1. Quando comparados com dados experimentais, os resultados obtidos pela simulação do ciclo de refrigeração apresentaram valores aceitáveis. As discrepâncias observadas entre os coeficientes de desempenho calculado e experimental apresentam forma de um erro sistemático e este se encontra entre 5 e 6%.
2. Foi avaliado o impacto de um parâmetro característico dos nanofluidos – a concentração volumétrica de partículas– nos diferentes indicadores do desempenho termodinâmico global do sistema. Os coeficientes de desempenho do ciclo de refrigeração, do

sistema e a eficiência racional aumentaram com a concentração, comportamento que foi alterado à medida que aumentava o comprimento equivalente do circuito secundário.

3. A concorrência entre o aumento da transferência de calor e a queda de pressão, provocada pelo uso de nanofluidos e, especificamente, pelo aumento da concentração, pode ser quantificada considerando simultaneamente ambos os efeitos, mediante o cálculo da irreversibilidade de cada subsistema. No caso do trocador secundário, a diminuição da irreversibilidade térmica foi predominante, sendo algumas ordens de grandeza superior à mecânica.
4. O tempo de operação anual e o comprimento equivalente do circuito secundário têm grande influência na determinação do valor ótimo de concentração, para qualquer caso analisado. À medida que o comprimento do circuito aumenta, o efeito da irreversibilidade mecânica do sistema (atrito) cresce em importância, até apresentar um papel decisivo na determinação dos parâmetros térmicos e econômicos globais.
5. A determinação dos coeficientes estruturais da concentração de nanopartículas para os componentes do circuito secundário forneceu que o trocador secundário é o mais importante subsistema até determinado comprimento equivalente de tubulações, a partir do qual este trocador deixa de ser um componente impactante na irreversibilidade total do sistema. O ponto para o qual o trocador de calor deixa de ser decisivo está determinado pelo peso que a irreversibilidade mecânica do circuito secundário tem na irreversibilidade global e depende não só do comprimento como dos diâmetros e rugosidade das tubulações. Este limite pode ser determinado pelo comportamento do coeficiente estrutural do trocador secundário, identificando-se o comprimento para o qual começa tomar valores nulos e negativos, sendo aproximadamente igual a 50 metros, no presente estudo.
6. Para condições de operação dadas, os pontos ótimos termodinâmicos, representados pelo máximo coeficiente de

desempenho e pela máxima eficiência racional, não necessariamente coincidem com o ponto de ótimo termoeconômico. Sendo que a concentração termoeconomicamente ótima é menor que a correspondente ao ótimo termodinâmico (máxima eficiência racional), devido ao fato de na primeira passarem a ser considerados fatores operacionais e de custo, os quais a convertem num resultado mais relevante para uma aplicação prática.

7. O método dos coeficientes estruturais mostrou-se efetivo na determinação do custo operacional mínimo, permitindo avaliar a influência de grande número de variáveis inerentes a sistemas de refrigeração usando nanofluido como fluido secundário.
8. Foram obtidos altos valores dos custos monetários anuais associados à operação com nanofluidos no sistema indireto de refrigeração, os quais respondem, sobre tudo, aos altos custos atuais de obtenção de nanopartículas. Sendo este um material em 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.
9. Os resultados quantitativos obtidos no presente trabalho representam apenas uma idéia das faixas nas quais se move o problema de aplicação de nanofluidos em sistemas indiretos de refrigeração. Porém, na gama de concentrações que é objeto deste estudo, há uma tal diferença entre ordens de grandeza que é provável que, mesmo considerando as incertezas do modelo, os resultados obtidos na simulação e na otimização permaneçam qualitativamente iguais.

Com relação ao capítulo 6, a observação dos resultados obtidos pela simulação detalhada do evaporador tipo casco e tubo em posição vertical, com nanofluido se esfriando no casco, remete às seguintes conclusões:

10. Foi constatado que a simulação do evaporador reproduz razoavelmente a tendência dos dados experimentais levantados para água.
11. Os fatores de incremento das propriedades termofísicas (condutividade térmica e viscosidade), da taxa de troca de calor e da

potência de bombeamento apontaram para os resultados e tendências esperados. Isto é, seu aumento com a concentração volumétrica de partículas.

12. Os três critérios de comparação, número de Reynolds, capacidade térmica ou capacidade volumétrica constante, definidos para a análise paramétrica do uso de nanofluidos, mostraram que sua escolha tem influência nos resultados. O critério mais apropriado será aquele que se ajuste com maior fidelidade às características do problema estudado.

## 7.2

### Recomendações para trabalhos futuros

Recomendam-se, para a continuidade do presente trabalho, as seguintes ações:

1. Aplicar o modelo desenvolvido para avaliar a influência de outros parâmetros dos nanofluidos (tais como diâmetro e forma das partículas, temperatura, entre outros) no desempenho global do sistema estudado.
2. Acrescentar ao modelo térmico proposto cálculo de custo para os componentes do sistema indireto de refrigeração, propiciando uma otimização do custo total.
3. Quantificar as incertezas dos resultados realizando a propagação do erro de cada um dos parâmetros do modelo para obter um vetor de incertezas correspondente ao vetor da solução.
4. Incluir a questão do impacto ambiental, mediante a determinação ou otimização de seus indicadores habituais, TEWI (impacto total equivalente de aquecimento global) ou LCCP (desempenho climático no ciclo de vida), no estudo da aplicação de nanofluidos em sistemas de refrigeração indiretos.