

1.

Introdução

O presente trabalho estuda a utilização de nanofluidos em sistemas de refrigeração. Os nanofluidos, suspensões de partículas de dimensões nanométricas, vêm sendo considerados para atuar como fluidos térmicos em diferentes aplicações, dada a expectativa de características de transferência de calor favoráveis, devido à suspensão de partículas com elevada condutividade térmica. Porém, a maior condutividade térmica dos nanofluidos somente cria uma condição necessária para sua utilização em aplicações de troca de calor. A condição suficiente viria do desempenho desses fluidos em ambientes convectivos. Além da alta condutividade, aos nanofluidos estão associados diversos fenômenos, relacionados com o aumento da viscosidade, e que influem de maneira oposta nas aplicações de transferência de calor. O estudo da simultaneidade de efeitos quando nanofluidos são usados como fluidos secundários em sistemas de refrigeração será descrito ao longo do trabalho. As condições nas quais esta aplicação se torna viável térmica e economicamente são discutidas no presente trabalho e é feito um estudo de caso onde pontos ótimos de operação são determinados.

1.1.

Sistemas indiretos e nanofluidos

Os fluidos térmicos são encontrados em grande número de aplicações industriais e domésticas com uma ampla faixa de temperaturas de aplicação. Um fluido secundário é aquele utilizado em um sistema indireto de troca de calor para transportar a energia térmica de um ponto a outro. Sistemas indiretos com fluidos secundários são recomendáveis quando o fluido térmico deve percorrer grandes

distâncias, em casos de grandes capacidades ou de demanda variável e, também, quando existe incompatibilidade entre o refrigerante e o fluido processado e é necessário isolar a sala de máquinas do local de consumo. Quando usados em sistemas de refrigeração, a principal vantagem do uso de fluidos secundários¹ é a redução considerável da carga de refrigerante, além da possibilidade de se operar com sistemas mais compactos e com menos riscos de vazamento (Wang et al, 2010). Por outro lado, o custo dos equipamentos aumenta em sistemas indiretos, função do uso de trocadores adicionais, de um sistema de bombeamento, e do próprio fluido secundário. O consumo de energia pode, eventualmente, ser incrementado pelas bombas dos sistemas e pela necessidade de uma temperatura de evaporação menor. Entretanto, em geral, o consumo total anual de energia pode diminuir em razão de um uso mais racional da mesma (Melinder et al, 2010). O uso de fluidos secundários com maior capacidade de transferência de calor beneficiaria a eficiência destes sistemas.

Idealmente, um fluido secundário deve apresentar uma grande capacidade de transporte térmico com uma vazão volumétrica reduzida, deve atingir altos coeficientes de transferência de calor para garantir a operação a pequenas diferenças de temperatura e propiciar um escoamento com baixos coeficientes de atrito a fim de minimizar as quedas de pressão e, conseqüentemente, a potência de bombeamento necessária (Wang et al, 2010). Em termos de propriedades, a descrição acima se traduz em altos valores de densidade, calor específico e condutividade térmica e em baixa viscosidade, à temperatura de operação.

Os fluidos de transferência de calor podem ser encontrados na fase líquida, na fase de vapor, ou em misturas bifásicas (Melinder et al, 2010). Entretanto, o foco do presente trabalho está nos nanofluidos atuando como fluidos térmicos, na fase líquida e sem mudança de fase.

Os nanofluidos apresentam um conjunto de propriedades físicas que vêm suscitando grande interesse nos últimos anos, ao serem visualizados como fluidos de transferência de calor. A definição comumente aceita para um nanofluido é uma dispersão de partículas com comprimento típico entre 1 e 100 nanômetros em fluidos de transferência de calor convencionais – geralmente líquidos e chamados de fluidos base (Choi e Eastman, 1995). Entre os materiais habitualmente usados

¹ A partir deste ponto, no presente trabalho, entender-se-á como fluido secundário um caso particular de fluido térmico - em contraposição ao fluido de trabalho, ou refrigerante.

para nanopartículas encontram-se os óxidos metálicos tais como óxidos de alumínio, silício, cobre e titânio e metais puros como ouro e cobre. Nanopartículas de diamante e nanotubos de carbono também têm sido usadas na fabricação de nanofluidos (Godson et al, 2010). Os fluidos base mais usados são: água, etanol, etilenoglicol e óleos leves. A concentração volumétrica de partículas usualmente encontra-se abaixo de 5%. (Buongiorno, 2006). A condutividade térmica do material das partículas é tipicamente de uma ou várias ordens de grandeza superior à dos fluidos base. Portanto, os nanofluidos, inclusive os que apresentam baixas concentrações volumétricas de partículas, exibem aumentos significativos no desempenho térmico (Yu et al, 2008).

Em comparação com as suspensões de micro e macro-partículas, os nanofluidos têm a vantagem de apresentar a fase sólida com uma maior área de superfície, menor momentum e mobilidade muito alta. Também apresentam melhora da condutividade: por exemplo, foi demonstrado que os nanotubos de carbono de paredes múltiplas, apresentam condutividade 20.000 vezes maiores que um óleo lubrificante de motor, à temperatura ambiente ou de referência (Kim et al, 2001).

Nas aplicações de convecção forçada, experimentos têm mostrado que as nanopartículas dispersas no fluido podem melhorar significativamente os coeficientes de transferência de calor no escoamento de líquidos (Duangthongsuk e Wongwises, 2009; Duangthongsuk e Wongwises, 2010; Sharma et al, 2009). Dentre as propriedades mais relevantes na determinação do coeficiente de transferência estão a condutividade, a viscosidade, o calor específico e a densidade. Entre outros parâmetros característicos dos nanofluidos, pode-se citar a concentração de nanopartículas como um dos que mais influenciam nas propriedades e, portanto, no coeficiente de transferência de calor. No corpo do trabalho serão apresentadas as propriedades com sua dependência da concentração e será discutido seu efeito sobre a troca de calor.

1.2.

Estado da arte

Como se relata a seguir, existe consenso entre os pesquisadores no fato de que a adição de nanopartículas geralmente melhora a troca de calor dos fluidos e

sempre aumenta a queda de pressão do escoamento. O incremento da transferência de calor diminui a geração de entropia e as irreversibilidades devido à troca de calor com uma diferença finita de temperaturas. Por outro lado, o aumento da queda de pressão faz crescer as irreversibilidades devido ao atrito nos sistemas. Estes efeitos opostos, resultantes do uso de nanofluidos – e que na verdade podem surgir em qualquer tentativa de se melhorar o desempenho de trocadores de calor – apontam para a necessidade de um método para balanceá-los e para a busca de condições mais favoráveis de operação.

1.2.1

Nanofluidos: visão geral

Dentro do amplo universo de trabalhos dedicados a nanofluidos, entre outros artigos de revisão, Das et al (2006) e Yu et al, (2008) reuniram resultados de diversos autores mostrando a evidente melhora da condutividade térmica de nanofluidos. Vários grupos de pesquisadores em todo o mundo vêm mostrando que nanofluidos têm particularidades que os fazem diferentes dos fluidos térmicos convencionais. As características distintas dos nanofluidos incluem uma dependência mais forte da condutividade térmica com a temperatura do que nos fluidos base puros (Das et al., 2003; Özerinç et al, 2011), um aumento substancial na condutividade térmica, mesmo a baixas concentrações volumétricas de partículas (Masuda et al, 1993 ; Lee et al, 1999 ; Xuan e Roetzel, 2000 ; Choi, et al. 2001; Eastman et al, 2001), um aumento no fluxo crítico de calor (CHF) em ebulição estacionária (You, et al., 2003), e um aumento significativo no coeficiente de transferência de calor (Pak e Cho, 1998; Xuan e Li, 2000). São dignos de nota que muitos dos altos níveis de coeficiente de transferência de calor reportados são explicados para além do simples efeito na própria condutividade (Yu et al, 2008). Este achado indica que a presença de nanopartículas no fluido influencia a troca de calor além do que seria esperado pelo aumento da condutividade. Assim, o impacto potencial de nanofluidos em aplicações de transferência de calor, em geral, é alto. Porém, apesar de suas características térmicas vantajosas, as misturas sólido-líquido apresentam uma desvantagem importante: o aumento de condutividade térmica é acompanhado por um aumento

da viscosidade efetiva. Isso significa que misturas sólido-líquido apresentam um custo adicional de bombeamento quando comparadas com os líquidos. Vários trabalhos experimentais sobre esse assunto (Pak e Cho, 1998; Wang et al, 1999; Namburu et al, 2007; Nguyen et al, 2007) relatam o incremento da viscosidade relativa dos nanofluidos com a concentração volumétrica de partículas. Gosselin e Silva (2004) abordam a competição que tem lugar em termos do desempenho global. Quando a concentração de partículas é baixa, o incremento alcançado da taxa de troca de calor é pequeno. Por outro lado, altas concentrações trazem consigo grandes tensões de cisalhamento e altos requerimentos de energia de bombeamento. Na literatura consultada é comum avaliar o mérito de misturas sólido-líquido a uma vazão mássica constante negligenciando o efeito negativo do aumento de viscosidade. Gosselin e Silva (2004) propuseram maximizar a taxa de transferência de calor para uma potência de bombeamento constante, determinando a concentração adequada de partículas no caso de uma placa quente arrefecida por um nanofluido. Ademais, sugeriram estender sua abordagem a configurações de escoamento mais complexas, como trocadores de calor e redes de fluidos.

1.2.2

Critérios de avaliação

A comparação entre o desempenho da transferência de calor para nanofluidos e seus respectivos fluidos base é comumente realizada baseada na condutividade térmica e no coeficiente de troca de calor. Ainda que o referido coeficiente e o número de Nusselt sejam indicadores relevantes, eles se mostram insuficientes para descrever o efeito de um nanofluido em um trocador de calor.

Para analisar fluidos térmicos em forma de soluções aquosas, Melinder (1997) desenvolveu uma abordagem onde as equações de taxa de transferência de calor e queda de pressão, são escritas em termos de um grupo de parâmetros operacionais e geométricos e outro de propriedades termofísicas. O primeiro grupo, com variáveis geométricas e de operação, é independente do fluido analisado, e apenas o segundo é utilizado para realizar a comparação entre os fluidos. Sua análise limita-se às características de fluidos isolados, sem troca de

calor. Parise (2011) estendeu esta abordagem a uma análise comparativa de nanofluidos em trocadores de calor. Estabeleceu um modelo geral para a comparação da taxa de transferência de calor e da potência de bombeamento no caso de um nanofluido de óxido de alumínio-água trocando calor a temperatura constante com um reservatório térmico. Para efeitos de comparação foram definidos fatores adimensionais que descrevem o aumento da queda de pressão e da taxa de transferência de calor relacionados, respectivamente, com a potência de bombeamento e a capacidade térmica, discriminando as características operacionais e geométricas que independem do fluido. A análise limitou-se a um escoamento laminar de um passe, completamente desenvolvido, considerando um nanofluido em particular. A abordagem é apenas energética e não analisa simultaneamente os efeitos opostos do aumento da potência de bombeamento e da taxa de transferência de calor.

Garg et al (2008) apresentaram uma figura de mérito com base energética para comparar o desempenho do nanofluido com respeito a seus fluidos base.

Moghaddami et al (2011) estudaram os efeitos causados pela adição de nanopartículas de óxido de alumínio a água e etilenoglicol sobre a geração de entropia. Usaram um número de geração de entropia, definido por Bejan (1982), e o compararam com dados experimentais disponíveis na literatura. Esse coeficiente permite avaliar simultaneamente as irreversibilidades e determinar quais são as faixas de operação onde o uso de nanofluidos é mais atraente do ponto de vista termodinâmico. Porém, a análise se limita a um escoamento através de um duto circular sob um fluxo de calor uniforme.

1.2.3

Aplicações como fluidos térmicos

Saidur et al. (2011) apresentam uma revisão ampla das possíveis aplicações dos nanofluidos em máquinas térmicas para diferentes sistemas e trocadores. Entre outras, foram mencionadas as aplicações com troca de calor sensível. Sobre elas, nos últimos anos foram publicados vários trabalhos modelando e simulando o desempenho de diversos tipos de trocadores de calor e usos específicos:

Kulkarni et al (2008), Nnanna et al (2009), Pantzali et al (2009), Jwo, et al (2010), Putra et al (2011), Dorin (2011), Campos et al (2011), Hoseini et al (2011), Demir et al (2011), Hung, et al (2012) e Ijam e Saidur (2012) estudam aplicações de arrefecimentos de motores e componentes eletrônicos. Choi et al (2008), Du et al (2011) e Hwang et al (2010) pesquisam sobre o uso de nanofluidos em óleo de transformadores. Strandberg e Das (2010), Dorin (2011), Leong et al (2012) e Yousefi et al (2012) abordam o uso de nanofluidos para aquecimento.

1.2.4

Nanofluidos como fluidos secundários em refrigeração

Na literatura aberta encontram-se pouquíssimos trabalhos abordando o tema de nanofluidos secundários em refrigeração. Por exemplo, apenas Jahar (2011) investiga o uso de nanofluido como fluido secundário em refrigeração transcritical e Maré et al (2011) estudam os efeitos de dois nanofluidos em um trocador de calor de placas a baixas temperaturas. Loaiza et al (2010) analisam uma bomba de calor por compressão de vapor trabalhando com um nanofluido como fluido secundário no evaporador.

É importante observar que somente alguns dos autores mencionados anteriormente (Strandberg e Das, 2010; Demir et al, 2011; Putra et al, 2011; Leong et al, 2012; Jahar, 2011; Dorin, 2011; Maré et al, 2011; Ijam e Saidur, 2012 e Hung, et al 2012) abordam o tema da competição entre o incremento de troca de calor e o aumento da potência de bombeamento, fenômenos ligados ao uso de nanofluidos. Entretanto, em geral, não tratam quantitativamente do conflito entre o aumento da transferência de calor e a queda de pressão, não definem coeficientes de incremento, nem analisam simultaneamente os efeitos, achando um máximo diferente para cada parâmetro. Entre as tentativas de se estudar simultaneamente estes efeitos estão a definição de um COP incluindo o trabalho de bombeamento e de uma efetividade do trocador em função da pressão de descarga e da concentração (Jahar, 2011). Maré et al (2011) introduziram um parâmetro que avalia o incremento, com respeito ao fluido-base, da diferença entre a taxa de troca de calor e taxa da queda de potência de bombeamento.

Porém, ao permanecer numa base energética, estas comparações não levam em consideração a diferença de qualidade que existe entre a energia térmica e a mecânica.

1.2.5

Nanofluidos em sistemas

A caracterização geral da troca de calor convectiva em nanofluidos já foi realizada para geometrias básicas e para alguns trocadores. Em aplicações de engenharia, os trocadores de calor são apenas um dos muitos componentes de um sistema. Por isso, o projeto de um trocador de calor sempre é influenciado pelas exigências do sistema e deve ser baseado em uma avaliação global. Ao mesmo tempo, a função objetivo para uma eventual otimização de um sistema é influenciada pelas características principais de operação do trocador de calor. Na presente revisão bibliográfica foram apenas localizados artigos que estudam um componente isoladamente. Somente o trabalho de Jahar (2011) analisa a variação do COP do ciclo com a concentração de partículas para diferentes nanofluidos sem realizar, porém, uma análise integrada que avalie a influência dos parâmetros dos nanofluidos num trocador de calor na eficiência global.

1.3.

Justificativa e contextualização

Os nanofluidos são visualizados como parte da próxima geração de fluidos de transferência de calor por oferecerem novas possibilidades de aumento do desempenho térmico quando comparados a líquidos de transferência de calor convencionais. Na última década, a comunidade mundial de pesquisadores vem apresentando um interesse no estudo dos nanofluidos, interesse este que cresce apreciavelmente a cada ano. Dentre os trabalhos publicados sobre as aplicações objeto da presente análise somente alguns tratam da competição entre a troca de

calor e a queda de pressão. Em geral, não se faz um balanço de ambos os efeitos, que, ao terem implicações contraditórias sobre o desempenho de um sistema, precisam ser colocados no mesmo patamar para determinar qual é o predominante e em qual faixa de operação. Termodinamicamente falando, esta comparação seria mais justa usando uma base exergetica, onde as potencialidades de produzir trabalho dos dois tipos de energia (térmica e mecânica) se fazem aditivas. Embora o problema tenha sido abordado por Gosselin e Silva (2004), com uma base energética, e por Moghaddami et al (2011), os quais usam a geração de entropia como medida de comparação e análise, até agora não têm sido apresentadas considerações econômicas a respeito. Adicionalmente, a influência dos parâmetros dos nanofluidos no desempenho de um ciclo tem sido pouco estudada.

Os trabalhos científicos revisados não levam em consideração o fato de que, em um dispositivo de troca de calor usando nanofluido como fluido térmico, a soma das componentes da irreversibilidade, devido, por um lado, à diferença finita de temperaturas entre fluidos e, por outro, à queda de pressão das correntes, tem uma derivada parcial com respeito à concentração de nanopartículas que é uma função biunívoca e completamente determinada da concentração. Um parâmetro em função desta derivada, definido como coeficiente estrutural do trocador (Kotas, 1995), permitirá estabelecer uma relação entre a variação de irreversibilidade no trocador estudado e a do sistema visto como um todo. O valor do coeficiente estrutural dará um critério único de decisão para julgar sobre a competição entre os efeitos térmicos e mecânicos da presença e concentração de nanopartículas no desempenho global de um sistema. Em vista do acima exposto, o presente estudo propõe simular o sistema indireto de refrigeração, a partir de um modelo de parâmetros concentrados e usar o métodos dos coeficientes estruturais para avaliar a viabilidade tecnológica e econômica do uso de nanofluidos como fluidos secundários em sistemas de refrigeração.

1.4.

Metodologia

A combinação das análises energética, exergetica e de balanços de custo, será utilizada no presente trabalho para caracterizar termodinamicamente e

otimizar o custo da operação com nanofluidos em sistemas de refrigeração indireta.

Partindo dos balanços de energia e exergia e das equações de troca de calor será caracterizado o sistema e, uma vez determinadas as irreversibilidades de cada um dos componentes, definir-se-ão as inter-relações inerentes a sua estrutura como primeiro passo para a otimização. Pelo fato de um trocador de calor sempre fazer parte de um sistema, é necessário conhecer como determinada mudança no trocador – no presente trabalho, a variação da concentração de nanopartículas – influencia no rendimento global. Um método que permite analisar a influência de um parâmetro particular de um dos componentes no rendimento global da planta é o método estrutural de otimização termoeconômica, desenvolvido por Kotas (1995). Este é baseado na interdependência relativa entre a irreversibilidade de um componente de um sistema e a irreversibilidade global. A teoria estrutural afirma que o coeficiente de vínculos internos para qualquer subsistema k é definido como a taxa de variação da irreversibilidade global do sistema em relação à irreversibilidade local do subsistema, (x_i é o parâmetro do sistema que produz as mudanças analisadas):

$$\sigma_{k,i} = \left(\frac{\partial \dot{I}_T}{\partial \dot{I}_k} \right)_{x_i}$$

Esta relação, conhecida como coeficiente estrutural, é usada para avaliar o custo econômico do produto do sistema. O uso do coeficiente estrutural substitui complexos procedimentos numéricos para a otimização simultânea da planta com todas suas entradas e saídas e as complexas interações entre as variáveis de cada um dos seus subsistemas. Vários pesquisadores demonstraram as vantagens do uso deste método para avaliar e otimizar ciclos térmicos, em geral, e de sistemas de refrigeração em particular. Misra et al (2005), Kızıllan et al (2007), Boer et al (2009) otimizaram a geometria e parâmetros de operação para sistemas de refrigeração por absorção. Dingenç et al (1999), Vincent e Heun (2006), Selbas et al (2006) e Arora e Kaushik, (2010) estudaram casos de sistemas de refrigeração por compressão de vapor. Até o momento, na literatura aberta consultada, não se reportam estudos de otimização termoeconômica aplicados a sistemas operando com nanofluidos.

No presente trabalho será aplicado o método dos coeficientes estruturais para determinar o custo mínimo de operação com nanofluidos em sistemas secundários de refrigeração. Será considerado que o nanofluido substitua um fluido secundário tradicional, sem nenhuma outra modificação no sistema.

1.5.

Objetivos da tese

São os seguintes os objetivos da presente tese:

- Modelar matematicamente o sistema indireto de refrigeração operando com nanofluido como fluido secundário.
- Modelar a influência de parâmetros dos nanofluidos em sistemas de refrigeração nos diferentes indicadores de desempenho global.
- Simular o desempenho do sistema em diferentes cenários, caracterizados por vários comprimentos equivalentes do circuito secundário e diferentes tempos de operação anual.
- Determinar o valor da concentração de nanopartículas correspondente ao custo de operação mínimo de um ciclo de refrigeração indireto, a partir do método dos coeficientes estruturais.
- Elaborar o modelo matemático detalhado de um evaporador – trocador de calor de casco e tubo – em posição vertical, com nanofluido se esfriando no casco.

1.6.

Organização do trabalho

O trabalho é estruturado em sete capítulos com os conteúdos seguintes. No Capítulo 2, é apresentado o modelo de transporte térmico em nanofluidos. O modelo do sistema indireto de refrigeração é apresentado no Capítulo 3, através das equações de conservação de energia que descrevem o comportamento do

sistema, seguido pela análise termoeconômica no Capítulo 4. O Capítulo 5 trata sobre a simulação do sistema indireto de refrigeração, propiciando a comparação com dados experimentais e uma análise e a discussão dos resultados. No Capítulo 6 é apresentado um estudo detalhado sobre um evaporador com nanofluido escoando no casco. Finalmente, no Capítulo 7 chega-se às conclusões gerais do trabalho e às recomendações para trabalhos futuros.