

4

Análise termoeconômica

Os capítulos precedentes abordaram questões eminentemente térmicas da aplicação de nanofluidos em sistemas indiretos de refrigeração. Ao tratar das magnitudes relativas e da natureza das componentes da irreversibilidade inerentes a estes sistemas, ficam expostas as possibilidades de melhora da performance energética que eles apresentam. Do ponto de vista da idealização termodinâmica, tende-se a procurar, com os meios disponíveis, elevar o rendimento absoluto da instalação. No entanto, de forma geral, as medidas encaminhadas a aumentar o rendimento térmico de um ciclo (e, portanto, o rendimento térmico global de uma instalação) podem trazer consigo a elevação do custo total. Deste modo, a economia atingida pela redução de insumos trará consigo um aumento dos gastos por conta do aumento do custo da instalação. É evidente que a resposta à questão da conveniência de se construir uma instalação cujo rendimento seja maior, mas que requeira maior investimento de capital, só pode ser obtida como resultado de uma análise técnico-econômica que extrapola os limites da Termodinâmica (Kirillin, 1986). Um regime de operação otimizada representaria a combinação mais eficaz de eficiência e do custo global para obtê-la. De um processo de otimização poderiam participar tanto o mínimo consumo de energia primária e de outros insumos, quanto um valor mínimo de irreversibilidade global e, inclusive, um impacto ambiental mínimo. Todas estas condições devem, também, contribuir para um período menor de retorno do investimento.

4.1

Otimização

Os problemas de otimização podem ser formulados de diferentes maneiras: como problemas técnicos, econômicos, ambientais ou como a combinações destas abordagens. Toda otimização envolve uma escolha cujos prós e contras são

comparados. Portanto, é preciso definir claramente as considerações que serão levadas em conta no presente capítulo, uma vez que os critérios para a otimização podem ser muito diversos. Por exemplo, pode-se querer otimizar ou projetar determinado processo a fim de que seja alcançado o mínimo custo total, incluindo todos os custos de investimento e de operação durante um determinado período. Ao invés disto, as considerações podem se limitar a projetar o sistema de acordo com apenas um dos critérios seguintes (Melinder, 2010):

- mínimo custo inicial;
- mínimo custo operacional ou
- custo mínimo de material e fabricação.

Em alguns casos, há outras considerações específicas que podem ser de importância, como, por exemplo:

- menor tempo possível para a concepção da planta;
- volume ou peso mínimo ou
- mínimo impacto ambiental.

A escolha de diferentes critérios de otimização resultará em diferentes modelos de projeto. Em particular, a otimização termoeconômica estabelece um elo entre os critérios econômicos, mediante dados monetários e de custos, e os critérios técnicos. Estes últimos, ao serem abordados por uma perspectiva exergética, incluem os aspectos qualitativos da energia.

Uma vez obtida a necessária compreensão do ponto de vista térmico da natureza das irreversibilidades, faz-se necessária uma estimativa dos limites práticos da sua redução. Para isto, a definição das inter-relações inerentes à estrutura do sistema pode ser o primeiro passo de um processo de otimização (Kotas, 1995), uma vez que a intervenção em um ou vários componentes (e não necessariamente em todos) pode trazer grandes benefícios econômicos na otimização global. O conceito de coeficiente estrutural, introduzido a seguir, pode ser útil neste processo.

4.2

Coeficientes estruturais

Conhecer a distribuição, entre os diversos componentes de um sistema, das irreversibilidades e dos fluxos associados de exergia pode ser de grande valia

numa análise. Quando um determinado parâmetro de operação é alterado em prol da diminuição das irreversibilidades, faz-se necessário avaliar de que forma isto se relaciona com a taxa de irreversibilidade local e como modifica a irreversibilidade global da planta e o consumo de exergia da mesma. Essa mudança relativa pode ser expressa através do coeficiente estrutural de vínculos internos.

O conceito de coeficiente estrutural foi inicialmente introduzido por Beyer (1970). Os coeficientes estruturais são usados nos estudos da estrutura de um sistema¹, na otimização de componentes de uma planta (Misra et al, 2005; Kızılkán et al, 2007; Boer et al, 2009) e na distribuição de preços em sistemas com múltiplos produtos, criando assim um elo importante entre os aspectos térmico e econômico.

Chama-se coeficiente estrutural de vínculos internos ou coeficiente de vínculos estruturais, à relação:

$$\sigma_{k,i} = \frac{\left(\frac{\partial \dot{I}_T}{\partial x_i} \right)}{\left(\frac{\partial \dot{I}_k}{\partial x_i} \right)} \quad (4.1)$$

onde \dot{I}_T é a taxa de irreversibilidade global do sistema estudado, \dot{I}_k a taxa de irreversibilidade do componente k , e x_i é o parâmetro do sistema no qual se produzem os câmbios (medidas de potenciais melhoras do sistema) propostos. O efeito da variação deste parâmetro x_i poderia repercutir na exergia de entrada à planta, para um dado produto, considerado constante.

$$\sigma_{k,i} = \left(\frac{\partial \dot{I}_T}{\partial \dot{I}_k} \right)_{x_i} \quad (4.2)$$

Valores elevados do coeficiente estrutural significam que a irreversibilidade do subsistema k exerce um forte impacto sobre a irreversibilidade global, enquanto que um valor negativo significa que uma redução na irreversibilidade local irá aumentar a global, diminuindo assim a eficiência global. 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

¹ Entende-se aqui, como estrutura de um sistema, o conjunto de interações presentes entre os componentes do mesmo através de correntes de massa ou energia. A otimização da estrutura para um sistema energético relaciona tanto capacidades e eficiências dos equipamentos quanto estratégias operacionais.

desempenho de outros elementos. O resultado é nenhum efeito líquido sobre a eficiência geral da planta.

A análise termodinâmica do sistema e seus componentes normalmente fornece valores ou funções para os coeficientes estruturais mais relevantes, ajudando a otimizar a concepção e o funcionamento do sistema. A seguir, apresenta-se a forma sugerida e detalhada por Kotas (1995) para estabelecer os coeficientes estruturais.

4.3

Procedimento para a otimização termoeconômica pelo método dos coeficientes estruturais

1) Definir a variável de decisão x_i ; ela será um parâmetro local que pertence ao k -ésimo elemento da planta.

2) Definir a expressão da irreversibilidade do subsistema k da planta em função da variável de decisão $\dot{I}_k = f(x_i)$.

3) Definir a influência do parâmetro x_i na taxa de variação da irreversibilidade do componente k :

$$\frac{\partial \dot{I}_k}{\partial x_i}$$

4) Definir a irreversibilidade total da planta $\frac{\partial \dot{I}_T}{\partial x_i}$ em função da variável de decisão.

5) Estabelecer a função de interação entre a variável de interesse e o sistema como um todo mediante da influência da irreversibilidade do componente analisado na irreversibilidade total do sistema. Definir o coeficiente estrutural

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

6) Definir as equações empíricas dos custos envolvidos na análise, $C(x_i)$

- 7) Definir a função de custo anual de operação da planta.
- 8) Achar o ponto de mínimo da função de custo anual.

4.4

Otimização termoeconômica de sistemas indiretos de refrigeração com trocadores de calor que usam nanofluidos

Do balanço exergético global tem-se que, para a planta em estudo:

$$\dot{E}_{in} = \dot{E}_{out} + \dot{I}_{TOTAL} \quad (4.3)$$

No presente estudo, o objetivo do método é determinar o efeito da mudança numa variável x_i , relacionada com o uso de nanofluidos, na taxa de exergia de entrada ao sistema, mantendo-se a taxa de exergia de saída (ou produto exergético) constante, isto é:

$$\left(\Delta \dot{E}_{in} = \Delta \dot{I}_{TOTAL} \right)_{para \ \dot{E}_{out} = cte} \quad (4.4)$$

No caso do sistema de refrigeração, o produto exergético seria o efeito de refrigeração produzido no evaporador e transferido ao meio refrigerado mediante o trocador secundário, \dot{E}_C^0 , previamente definido no capítulo 3.

A partir deste pressuposto, determinar-se-á, caso exista, o valor ótimo da variável de decisão para a faixa de operação mais conveniente. Como o objetivo fundamental do presente trabalho é avaliar a viabilidade do uso de nanofluidos em sistemas indiretos de refrigeração, a análise será focada em um dos subsistemas pelos quais circula o fluido secundário, isto é, o trocador secundário.

4.4.1

Variáveis de decisão

Um ponto chave na otimização termoeconômica é a escolha da variável de decisão, uma vez que tanto a irreversibilidade do subsistema k , \dot{I}_k , quanto os custos envolvidos, C_k , devem estar relacionados com esta variável de uma maneira direta. Normalmente é selecionado um parâmetro que pertença ao subsistema k . Esta escolha depende do tipo de componente considerado.

No caso da otimização de trocadores de calor, a área total de troca de calor e o coeficiente global de transferência de calor são os parâmetros que mais diretamente afetam o custo de investimento. Este custo para um tipo particular de trocador pode ser expresso como uma função do produto UA.

$$C_k = f(UA) \quad (4.5)$$

Nos problemas de dimensionamento de trocadores é preferível otimizar algum dos parâmetros relacionados ao cálculo da área. Contudo, para avaliar o desempenho térmico de determinado fluido, como é o foco do presente trabalho, é desejável estudar um parâmetro que seja importante na caracterização do fluido. No caso dos nanofluidos, a concentração volumétrica de partículas é um parâmetro do qual dependem fortemente todas suas propriedades e sobre o qual é possível ter controle. Esta característica da variável concentração facilita tanto a derivação da equação do custo quanto uma futura validação experimental dos resultados.

No presente trabalho tomou-se como variável de decisão $x_1 = \varphi$, isto é a concentração volumétrica de nanopartículas no fluido secundário.

4.4.2

Irreversibilidade do subsistema k da planta em função da variável de decisão

O subsistema a ser otimizado será o trocador secundário, pelo que a seguir será definida sua função de irreversibilidade, descrita em termos da concentração volumétrica de partículas:

$$\dot{I}_{SEC} = f(\varphi) \quad (4.6)$$

A equação colocada em termos das propriedades apresenta a dependência seguinte:

$$\dot{I}_{SEC} = f\left(L, D, T_0, T, \Delta T_{lm}, \dot{m}_{sf}, k_{sf}, c_{P_{sf}}, \mu_{sf}, \rho_{sf}, s_{sf}\right) \quad (4.7)$$

onde as propriedades, por sua vez, são função da concentração de partículas:

$$k_{sf} = k(\varphi) \quad (4.8)$$

$$c_{P_{sf}} = c_p(\varphi) \quad (4.9)$$

$$\mu_{sf} = \mu(\varphi) \quad (4.10)$$

$$\rho_{sf} = \rho(\varphi) \quad (4.11)$$

4.4.3

Varição da taxa de irreversibilidade do trocador secundário com a variação da variável de decisão

A derivada da equação (4.7) fornece uma relação funcional que depende dos parâmetros seguintes:

$$\frac{\partial \dot{I}_{SEC}}{\partial \varphi} = g \left[T, \Delta T_{lm}, \dot{m}_{sf}, k_{sf}(\varphi), c_{P_{sf}}(\varphi), \mu_{sf}(\varphi), \rho_{sf}(\varphi) \right] \quad (4.12)$$

Ela pode ser obtida analítica ou numericamente, como no presente caso, mediante algoritmo no qual aparecem de maneira implícita as relações entre todas as variáveis do problema.

4.4.4

Definição da irreversibilidade total da planta em função da variável de decisão e sua derivada

A derivada da irreversibilidade total da planta em função da variável de decisão é caracterizada por uma função do tipo:

$$\frac{\partial \dot{I}_{TOTAL}}{\partial \varphi} = f \left[T, \Delta T_{lm}, \dot{m}_{sf}, k_{sf}(\varphi), c_{P_{sf}}(\varphi), \mu_{sf}(\varphi), \rho_{sf}(\varphi) \right] \quad (4.13)$$

As relações funcionais explícitas, definidas até este ponto, podem ser substituídas por um algoritmo, ou um código computacional desenvolvido para relacionar as variáveis de interesse a partir da simulação.

4.4.5

Coeficiente estrutural

No presente estudo está sendo considerado um produto exergético constante. Isto é, o conteúdo exergético do frio produzido permanece igual a \dot{E}_C^0 para todas as análises realizadas. Portanto:

$$\Delta \dot{E}_{out} = 0.$$

Aplicado o anterior à equação (3.91) do balanço global de exergia pode-se concluir que, na presente análise, a variação da irreversibilidade total é igual à variação do consumo exergético da planta:

$$\Delta \dot{E}_{in} = \Delta \dot{I}_{TOTAL} \quad (4.14)$$

Deste modo, a irreversibilidade total pode ser diretamente relacionada com a irreversibilidade no trocador secundário através do coeficiente estrutural. Uma vez definido, este servirá para relacionar a exergia de entrada ao sistema com a irreversibilidade no sub-sistema estudado da forma seguinte:

$$\Delta \dot{I}_{TOTAL} = \sigma_{SEC,\phi} \Delta \dot{I}_{SEC} \quad (4.15)$$

onde o coeficiente estrutural relativo ao trocador secundário, devido à variação da concentração volumétrica é:

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

A aplicação detalhada deste coeficiente estrutural para o trocador secundário é apresentada no Capítulo 5, com exergia de saída fixa e concentração de partículas variável. Nesta aplicação é determinado o impacto da concentração de nanopartículas no fluido secundário na irreversibilidade total do sistema indireto de refrigeração.

4.4.6

Custos

Como um passo intermediário entre o sistema operando com fluidos tradicionais e um sistema otimizado para operar com nanofluido, pode estar a medida conhecida como “*drop-in*”, onde um novo fluido é aplicado ao sistema, sem nenhuma modificação no mesmo. Isto significa considerar o sistema original variando, apenas, o fluido secundário. É obvio que um sistema totalmente otimizado apresentaria maiores benefícios nos custos de operação e de investimento inicial. Contudo, uma otimização parcial forneceria certa economia

de recursos e importantes informações para compreender o papel das variáveis envolvidas.

Os fatores de compromisso são aqueles que relacionam as especificações de entradas físicas ao problema (como, por exemplo, a carga térmica a ser removida do meio) com as limitações que se impõem, incluindo condições de operação. No presente estudo, o compromisso levado em consideração está entre: i) a melhora na transferência de calor provocada pelo aumento da concentração de nanopartículas, com sua conseqüente economia de recurso consumido, e ii) os custos inerentes à operação com nanofluidos, nos quais repercute o incremento do consumo de potência elétrica para suprir as perdas por atrito.

A seguir são descritas as aproximações necessárias para simplificar a aplicação do método dos coeficientes estruturais para determinar o custo mínimo de operação de nanofluidos em sistemas secundários de refrigeração.

São os seguintes os custos associados à utilização de nanofluidos:

- Custo de aquisição das nanopartículas, C_{np} ;
- Custo de operação com nanofluido que seria igual ao custo da energia elétrica consumida, C_{op} ;
- Custo inicial de algum equipamento extra que seja necessário para a fabricação do nanofluido (equipamentos de segurança, equipamento de ultrassom usado para garantir a estabilidade da mistura, etc). Esta componente do custo independe da variável de decisão e é denominada como C_b .

A equação do custo total é:

$$C_T = C_{np}(\varphi) + C_{op}(\varphi) + C_b \quad (4.17)$$

Levando em consideração que o custo inicial de equipamento necessário para a fabricação do nanofluido, C_b , por definição não depende da concentração de nanopartículas. Pode ser definida uma componente do custo variável com a concentração como sendo:

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

Para minimizar o custo total do sistema operando com nanofluidos tem-se:

$$\frac{\partial C_T}{\partial \varphi} = \frac{\partial C_{np}}{\partial \varphi} + \frac{\partial C_{op}}{\partial \varphi} + \frac{\partial C_b}{\partial \varphi} = 0 \quad (4.19)$$

Pode-se considerar que o custo das nanopartículas usadas por ano no circuito secundário é proporcional à concentração volumétrica e ao inventário volumétrico anual de nanofluido, V_{nf} :

$$C_{np} = \kappa V_{nf} \varphi \quad \frac{R\$ \frac{m^3}{ano} \frac{m^3}{m_{np}^3}}{m_{np}^3} \rightarrow \left[\frac{R\$}{ano} \right] \quad (4.20)$$

A constante de proporcionalidade pode ser calculada como:

$$\kappa = c_{np} \times F_{R\$/USD} \times \rho_{np} \quad (4.21)$$

onde c_{np} é o custo por kg das nanopartículas e $F_{R\$/USD}$ é a taxa de câmbio vigente entre as moedas envolvidas na aquisição.

O inventário volumétrico anual de nanofluido, V_{nf} , é determinado multiplicando-se o volume total do circuito que deve ser preenchido com nanofluido pelo número de vezes que será feita reposição do fluido, para fins de manutenção da instalação.

$$V_{nf} = V_{SEC} N_r \quad (4.22)$$

O volume V_{SEC} pode ser obtido somando-se o volume interno dos trocadores, a bomba e a linhas de ligação entre eles, as quais devem percorrer toda a extensão do circuito secundário.

A derivada do custo anual de nanopartículas é:

$$\frac{\partial C_{np}}{\partial \varphi} = \kappa V_{nf} \quad (4.23)$$

O custo de operação no presente estudo considerará, apenas, o custo da energia elétrica, C_{el} . Segundo as tarifas vigentes e o tempo de operação anual, t_{op} , tem-se:

$$C_{op} = \dot{E}_{in} t_{op} C_{el} \quad kW \frac{h}{ano} \frac{R\$}{kWh} \rightarrow \left[\frac{R\$}{ano} \right] \quad (4.24)$$

Derivando em função de φ :

$$\frac{\partial C_{op}}{\partial \varphi} = t_{op} C_{el} \frac{\partial \dot{E}_{in}}{\partial \varphi} \quad (4.25)$$

Do balanço exerético global para o sistema de refrigeração tem-se:

$$\dot{E}_{in} = \dot{E}_C^Q + \dot{I}_{TOTAL} \quad (4.26)$$

Como, no presente caso, o produto exergético, \dot{E}_C^Q , é considerado constante

$$\frac{\partial \dot{E}_{in}}{\partial \varphi} = \frac{\partial \dot{I}_{TOTAL}}{\partial \varphi} \quad (4.27)$$

Substituindo pela definição do coeficiente estrutural, equação (4.16), tem-se:

$$\frac{\partial C_{op}}{\partial \varphi} = t_{op} C_{el} \sigma_{SEC} \frac{\partial \dot{I}_{SEC}}{\partial \varphi} \quad (4.28)$$

Como, por definição, C_b não depende da concentração de nanopartículas:

$$\frac{\partial C_b}{\partial \varphi} = 0 \quad (4.29)$$

Substituindo em (4.19) a derivada do custo total é, então:

$$\frac{\partial C_T}{\partial \varphi} = \kappa V_{nf} + t_{op} C_{el} \sigma_{SEC} \frac{\partial \dot{I}_{SEC}}{\partial \varphi} \quad (4.30)$$

Otimizando o custo de operação total, tem-se:

$$\frac{\partial C_T}{\partial \varphi} = 0 \quad (4.31)$$

onde:

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

$$\frac{\frac{R\$}{ano} \frac{m_{np}^3}{h}}{\frac{R\$}{ano kWh} \frac{m_{nf}^3}{m_{np}^3}} = \frac{kW}{m_{nf}^3} \rightarrow \frac{kW}{m_{np}^3} = \frac{kW}{m_{nf}^3} \rightarrow [kW]$$

Numa otimização parcial, será determinado no Capítulo 5 o ponto de mínimo custo operacional, com a simples variação da concentração volumétrica de nanopartículas. Para determinar, se existente, a concentração volumétrica ótima, resolve-se a equação (4.32) e na sua solução, encontra-se o ponto ótimo de operação.