

Costos de operación de un secado spray o de pulverización basado en un análisis exergético

Autores: Ing. Diego García. Universidad Nacional de Lanús.

1- RESUMEN

El presente trabajo desarrolla una ecuación de costo relativamente sencilla basada en aspectos económicos como costos de equipos, amortización y costos de operación y adiciona una variable de importancia termodinámica, la exergía. Se desarrolla un análisis exergético relativamente sencillo que permite situar en qué etapas la energía no es aprovechada al máximo de sus posibilidades. Tomando como variable una de las condiciones de proceso, las condiciones del aire utilizado para el secado, se puede encontrar la mejor condición de operación y menor costo.

Permite brindar al estudiante un buen ejemplo del uso de la ciencia termodinámica en un proceso real, que muchas veces le es difícil ver la aplicación de los conceptos aprendidos. Brinda además una herramienta útil para la evaluación de un proceso a un profesional para desarrollar sus tareas en la industria relacionada.

2- MARCO TEÓRICO

2.1- SECADO EN SPRAY O PULVERIZACIÓN.

En la elaboración de productos en la industria alimenticia y otros productos de otras industrias el secado es una etapa muy importante en fases intermedias o finales de proceso.

En los alimentos particularmente es una etapa que define el aspecto final del producto y permite, debido a la disminución de actividad de agua disponible, alargar la vida útil de los mismos y obtener una excelente forma de conservación. Una propiedad útil también es la disminución de volumen final del producto que permite reducir espacios de almacenamiento y facilitar el transporte.

El secado en spray o pulverización no es muy agresivo en comparación a otros métodos y tiene gran difusión en la industria de alimentos. Dadas las particularidades del proceso, se logra un buen producto final que conserva la mayoría de las propiedades del alimento original.

Ejemplos de aplicaciones son la elaboración de leche en polvo, concentrados de jugos y café.¹

2.2- COSTOS DE OPERACIÓN.

Como para cualquier proceso el costo de operación es de vital importancia para poder obtener el máximo beneficio posible.

En este caso, el presente trabajo, pretende utilizar un cálculo de costos que podría pasar por alto por un especialista sin formación ingenieril.

El objetivo es aprovechar la información que una función termodinámica como la *exergía* puede brindar.

La exergía permite analizar un proceso para aprovechar al máximo los recursos energéticos. Un análisis energético presenta la posibilidad de encontrar en qué etapas están ocurriendo pérdidas o despilfarros de recursos. Permite mejorar notablemente

sistemas térmicos para reducir las fuentes de ineficiencia y evaluar la economía del sistema.

De acuerdo al primer principio de la termodinámica la energía se conserva en un proceso, transformándose. Sin embargo, este análisis no siempre resulta suficiente cuando se estudia el uso de recursos energéticos.

El primer principio nos muestra que la energía siempre se conserva, pero no nos habla de que cantidad de ella es aprovechada en un proceso. Si por ejemplo tomamos un sistema cerrado compuesto de un combustible y aire, tiene asociados una energía inicial, si decimos quemar todo el combustible, terminamos con una mezcla caliente de gases transformando irreversiblemente la energía inicial. Dado que el proceso es irreversible y real no se puede volver a las condiciones de esta etapa. Si observamos el aprovechamiento que se le puede dar a cada etapa, es evidente que las condiciones iniciales son las mejores, el combustible se puede utilizar para mover un motor, una turbina, generar electricidad, etc.. En la etapa final la utilidad es casi mínima, se dice que la *utilidad potencial*, se ha disminuido o ha sido consumida. Esa utilidad potencial es lo que se define como exergía.

El *análisis energético*, permite ver en que etapas de un proceso se destruye la exergía denotando falta de aprovechamiento de los recursos. Una pérdida de calor al entorno por ejemplo es un caso de pérdida o destrucción de la exergía. El análisis energético permite también cuantificar cuánta exergía se destruye.²

3- OBJETIVOS

A través de la ecuación (1) se pretende en determinar el costo anual de operación de un secado por pulverización para la obtención de leche en polvo.

$$C = A_a + C_b \cdot m_{as} \cdot L_{real} + C_c \cdot m_{ma} \cdot (ex_8 - ex_4)$$

A_a = Amortización anual

C_b = Costo de operación de bombeo

C_c = Costo de calentamiento.

Incluyendo en la ecuación la exergía resultante del proceso se obtiene una inclusión de en los costos de la ineficiencia del sistema relacionada con el desperdicio o mala utilización de los recursos.

4- METODOLOGÍA

El estudio exergético se realiza sobre el siguiente proceso:

Antes de ingresar al secador la leche entera es enfriada en un intercambiador a 4°C, para luego ser pasteurizada, calentándose a 75 °C. Luego ingresa a un evaporador que trabaja a 0,4 atm, para lograr una concentración de sólidos de 50% en peso. Finalmente al secador ingresan 20000 litros/hora de leche entera a 20 °C, para obtener en la cámara spray leche en polvo con 3% de humedad en peso.

Se dispone de vapor para el pasteurizador, evaporador, calentador de aire y salmuera para el enfriador.

El total de datos del proceso considerados es:

- Caudal de leche: 20000 litros/hora
- Calor específico de la leche: $c = [p + 0,2 (100 - p)] / 100$, siendo p el porcentaje de agua.
- Peso específico de la leche: 1,03 kg/l
- Temperatura de entrada de la leche: 20 °C
- Temperatura leche enfriada: 4 °C
- Temperatura de pasteurizado: 75 °C
- Presión de evaporador: 0,4 atm
- Concentración de sólidos en leche: 12% en peso.
- Caudal de vapor disponible: 31875 kg/h
- Presión de vapor disponible: 48 atm
- Temperatura de vapor disponible: 394 °C, descarga, líquido saturado a 48 atm
- Salmuera de enfriamiento: CaCl₂ de 20% en peso
- Densidad relativa del agua: 1,182
- Calor específico: 0,737 kcal/ kg K; 3,08 kJ/kg K
- ΔT leche / salmuera: 7 °C
- Temperatura ambiente: 20°C
- Humedad relativa del aire que entra al equipo spray: 60%
- Humedad de salida del aire de la cámara spray ≤ 10%
- Rendimiento isoentrópico del compresor: 0,8

Con la condones de este proceso, que funciona 24 horas diarias durante todo el año, y considerando un costo de inversión de US\$ 30000 amortizable en 3 años, que incluye, se calcula el costo de funcionamiento anual, con la ecuación (1).

Los costos anuales de calentamientos son en la cámara spray $1,88 \cdot 10^{-5}$ US\$ /Kcal y el de bombeo $3 \cdot 10^{-6}$ US\$/Kcal

La variable a considerar es la temperatura de salida del aire del secador.

En la página siguiente, figura 1, se puede ver un esquema del proceso

El cálculo exerético se realiza entre los puntos 8 y 4 del proceso mediante la siguiente ecuación:

$$ex_{8-4} = [(h_8 - h_4) - T_o(s_8 - s_4)] \quad (2)$$

Donde e_x es la exergía, h es la entalpía y s es la entropía referidas en los puntos 8 y 4 para el aire en el proceso. T_o es la temperatura del medio.

A su vez la diferencia de entalpía se calcula según:

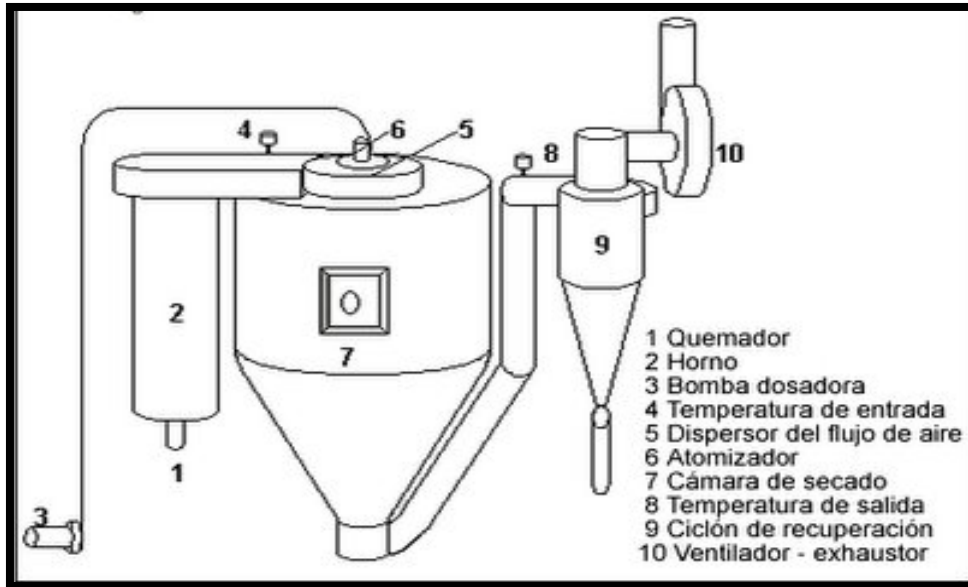
$$h_8 - h_4 = C_{pa} (T_8 - T_4) + (w_8 - w_4) [C_{pv}(T_8 - T_4) + h_o'''] \quad (3)$$

Donde C_{pa} y C_{pv} son los calores específicos del aire y del vapor respectivamente.

w es la humedad específica del aire en los puntos mencionados, y T la temperatura del aire en los puntos mencionados.

h_o''' es la entalpía del vapor saturado.

Esquema del proceso. Figura 1.



En esta ecuación (3) la humedad específica de salida del aire en el punto 8 varía con la temperatura del aire en ese punto. Para calcularla se utiliza la ecuación de Antoine para el agua:

$$\text{Log } p_{v8} = A - [B / (T_8 + C)] \quad (4)$$

Donde $A = 5,11564$; $B = 1687,537$; $C = 230,170$. La temperatura debe ir en °C. La presión se obtiene en bares.

Y la humedad se calcula según:

$$w = 0,622 [p_{v8} / (p - p_{v8})] \quad (9)$$

Donde p es la presión de saturación del agua en la temperatura en el punto 8.

La diferencia de entropía se calcula con las propiedades del aire húmedo al igual que la entalpía:

$$\begin{aligned} s_8 - s_4 = & [C_{pa} \cdot \text{LN} (T_8/T_4) - R_{pa} \cdot \text{LN} [(P - p_{v8}) / (P - p_{v4})] + \\ & w_8 \cdot [s_0'' + C_{pv} \cdot \text{LN} (T_8/T_0) - R_{pv} \cdot \text{LN} (p_{v8}/p_{v0})] - \\ & w_4 \cdot [s_0'' + C_{pv} \cdot \text{LN} (T_4/T_0) - R_{pv} \cdot \text{LN} (p_{v4}/p_{v0})] \end{aligned} \quad (10)$$

Donde R_{pa} y R_{pv} son las constantes de los gases particulares para el aire y vapor; s_0'' es la entropía del vapor saturado a la temperatura dada.

Con todas estas ecuaciones se utiliza un programa de cálculo sencillo como el Microsoft Excel®, que es ampliamente conocido y utilizado, se genera una planilla de cálculo donde todas las ecuaciones quedan en función de la temperatura de salida del aire húmedo

5- RESULTADOS

Para tener un parámetro de referencia se limitó el costo a US\$ 40000 anuales. Con esta condición se obtiene que para una temperatura de salida del aire a 97,51 °C se produce un costo anual de US\$ 15150,10. Siendo esta la temperatura óptima de salida. Además el análisis permite calcular el rendimiento exergético del proceso:

$$\eta_{ex} = (m_{LP} \cdot e_{x5}) / (m_{LE} \cdot e_{x4} + m_{as} \cdot e_{x8}) = 3,32 \cdot 10^{-5} \quad (11)$$

6- CONCLUSIONES

En el trabajo se presenta, un elemento de optimización relativamente simple y dúctil, la exergía. Se optimiza un proceso utilizando exergía y no energía, pues esta queda invalidada, como elemento comparativo, cuando se conserva.

Pudiendo variar un parámetro relativamente sencilla de controlar, condiciones de aire húmedo, se puede calcular el costo óptimo de producción de US\$ 15150,10 que dista considerablemente del propuesto de US\$ 40000.

7- REFERENCIAS

¹ Mc Cabe, W.L., Smith, J.C., Harriot, P. Operaciones Unitarias en Ingeniería Química, 4º edición, España, Ed. Mc Graw Hill.

² Moran, M.J., Shapiro, H.N. Fundamentos de Termodinámica Técnica, 4º edición del original, Ed. Reverté.