

CALCULO DE LOS COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA DE CALOR Y MASA PARA EL SECADO DE AJONJOLI DESCUTICULIZADO

II. EXTRAPOLACIÓN DE LECHO FIJO A SECADOR ROTATORIO

Por MSc. Ing. José Íñiguez, ledezma.e.iniguez.consultores@gmail.com
MSc. Ing .Eugenio Ledezma, eugenio@inaoep.mx
y MSc. Ing. Héctor Ornelas, hornelas@guaymas.uson.mx

RESUMEN

La gráfica de velocidad de secado contra tiempo, incluida en la primera parte de este trabajo, permite definir una velocidad promedio aplicable al ciclo completo de secado. Esta velocidad promedio conduce, por su parte, a la evaluación de un coeficiente promedio de transferencia de calor. La identificación de los paralelismos existentes entre un secador rotatorio y uno de lecho fijo permite, a su vez, extrapolar el coeficiente antes referido a las condiciones existentes en un secador rotatorio. El resultado de la extrapolación es comparado con los valores recomendados por Perry en base a la ecuación de Friedman y Marshall.

DESCRIPTORES

Semilla de ajonjolí, secador rotatorio, operación en planta piloto, coeficiente promedio de transferencia de calor, ciclo de secado, extrapolación del coeficiente promedio, comparación de resultados.

ABSTRACT

An average drying rate applicable to the whole drying cycle is here obtained through an analysis of the rate of drying vs. time graph developed in the first part of this work. This average rate leads, in turn, to the evaluation of an average heat transfer coefficient. The value for this heat transfer coefficient is subsequently extrapolated to the conditions operating in a rotary dryer. The result obtained is compared with the values provided by Perry based on the equation of Friedman and Marshall.

KEYWORDS

Sesame seed, rotary drying, pilot plant operation, average heat transfer coefficient, drying cycle, extrapolation of the average coefficient, comparison of the extrapolated data.

CALCULO DE LOS COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA DE CALOR Y MASA PARA EL SECADO DE AJONJOLI DESCUTICULIZADO

II. EXTRAPOLACIÓN DE LECHO FIJO A SECADOR ROTATORIO

II.1 INTRODUCCIÓN

Un problema fundamental en el cálculo o dimensionamiento de secadores rotarios lo representa el amplio margen de error inherente a los coeficientes de transferencia de calor calculados a partir de las ecuaciones disponibles al efecto. El problema con esta vía de estimación está claramente ilustrado por el siguiente comentario de Foust [1], quien al referirse a la ecuación de Friedman y Marshall, de hecho la ecuación más socorrida para este tipo de evaluaciones, nos dice que: “...está lejos de ser exacta, ya que tiene desviaciones del orden de $\pm 100\%$, pero indica algo acerca del tamaño del secador...” Esta circunstancia deja claro que el logro de mejores niveles de precisión en la estimación del coeficiente referido –y consecuentemente de las conclusiones obtenidas a través de su uso– demanda de vías alternas para su evaluación.

En el presente trabajo exploramos la posibilidad de extrapolar los coeficientes obtenidos en experimentos de secado a lecho fijo, a las condiciones comúnmente encontradas en secadores rotatorios.

II.2 LA VELOCIDAD VOLUMÉTRICA PROMEDIO

Con la Figura 2 de la parte I como punto de partida, obtendremos ahora una velocidad volumétrica promedio (N_{Ca}^*) aplicable a todo el ciclo de secado mostrado. Reconozcamos allí, con la ayuda de las líneas punteadas auxiliares, que el contorno de la curva define, de izquierda a derecha, la siguiente serie de figuras geométricas y sus correspondientes áreas: un rectángulo de área (625 x 0.167), un triángulo rectángulo de área (250 x 0.048/2), un rectángulo de área (375 x 0.048), y finalmente, un triángulo rectángulo de área (375 x 0.185/2). El área total correspondiente suma así 163.1. Preguntémonos ahora por la altura de un rectángulo de lado igual a 0.4 (el tiempo total de secado), y área idéntica a la anteriormente calculada. Reconozcamos a la vez que la dimensión buscada es precisamente la magnitud promedio de la velocidad de secado, tal cual aplicaría al ciclo completo de secado. Acordemos entonces que la dimensión de referencia se encuentra vía la siguiente expresión: (N_{Ca}^*) (0.4) = 163.1, de donde obtenemos finalmente $N_{Ca}^* = 407.8 \text{ kg}/(\text{m}^3)(\text{h})$.

Dado que una magnitud importante a ser proveída ya por la velocidad de secado, ya por los coeficientes de transferencia, se refiere al tiempo necesario para producir un efecto de secado determinado, y considerando que en el caso que nos ocupa es el tiempo total de secado el que interesa, se juzgará la validez del procedimiento arriba efectuado a través de

una comparación del tiempo total experimental, contra el tiempo estimado vía $N_c^* a$. Empecemos reconociendo que la cantidad total de agua a evaporar es de

$$(X_i - X_f) L_s = [(0.7-0.05) \text{ kg / kgs}] (2.325 \text{ kgs}) = 1.51 \text{ kg.}$$

Tomemos ahora el cociente entre el resultado anteriormente obtenido y el producto $(N_c^* a)V$, con unidades de kg de agua evaporada por hora, a fin de determinar el tiempo predicho por $N_c^* a$:

$$(1.51 \text{ kg}) / [(407.8)(0.00744)(\text{kg / h})] = 0.498 \text{ horas}$$

El resultado de esta operación debe compararse con las 0.4 horas experimentales. El error, de 24.5%, se considera aceptable dadas la aproximaciones introducidas.

II.3 EL COEFICIENTE VOLUMÉTRICO PROMEDIO DE TRANSFERENCIA DE CALOR

Calculemos ahora el coeficiente volumétrico de transferencia de calor (h_{ca}^*) asociado a $N_c^* a$. Aclaremos aquí que tanto $N_c a$ como $N_c^* a$ son constantes. La diferencia es que aquella opera solamente en el intervalo de humedades comprendido entre 0.7 y 0.3, mientras que esta última se considera aplicable a todo el ciclo de secado. Es precisamente esta situación la que obliga a reconocer que el cálculo del coeficiente promedio vía la ecuación (5) no puede hacerse considerando un gradiente de temperatura de 46.7°C , que aplica en el intervalo de humedades entre 0.7 y 0.3. Si el coeficiente que buscamos ha de aplicar a todo el ciclo de secado, debe entonces tomar en consideración que la diferencia entre las temperaturas de bulbo seco y húmedo del aire a la salida del secador experimental, no es igual a 46.7. De hecho, la ortodoxia de cálculo obliga a usar como gradiente la media logarítmica de estas diferencias a la entrada y salida del secador [2]. A efectos de evaluar las condiciones del aire a la salida recurriremos a la información relevante de la Tabla 1, y las siguientes ecuaciones para volumen húmedo (obtenida de una aplicación elemental de la ley de los gases ideales), y calor húmedo [3]:

$$V_H = (0.082 \theta + 22.4) \left(\frac{H}{18} + \frac{1}{29} \right) \text{ m}^3 / \text{ kg} \quad (9)$$

$$C_H = 0.24 + 0.46 H \text{ kcal / kg } ^\circ\text{C} \quad (10)$$

A partir de la ecuación (9), con $\theta = 80^\circ\text{C}$ y $H = 0.0126 \text{ kg / kgs}$ calculamos que el volumen húmedo del aire a las condiciones de entrada tiene un valor de: $V_H = 1.020 \text{ m}^3 / \text{ kg}$. Los datos de velocidad del aire (3240 m / h), y área del lecho (0.093 m^2) anotados también en la Tabla 1, permiten determinar que el flujo volumétrico de aire es de $(3240 \text{ m / h})(0.093 \text{ m}^2) = 301.3 \text{ m}^3 / \text{ h}$. La combinación de este valor con el volumen húmedo nos dice que el flujo masa de este aire es de $(301.3 \text{ m}^3 / \text{ h}) / (1.02 \text{ m}^3 / \text{ kg}) = 295.4 \text{ kg / h}$. Podemos entonces decir que la cantidad de aire húmedo que entra al secador en un ciclo de secado, es decir en 0.4 horas, es de $(295.4 \text{ kg / h})(0.4 \text{ h}) = 118.2 \text{ kg}$. El hecho de que la humedad de

este aire sea de 0.0126 kg / kgs, nos permite calcular de la siguiente manera la cantidad de aire seco que en 0.4 horas pasa a través del secador: $(118.2 \text{ kg}) / (0.0126 \text{ kg / kgs}) = 116.7 \text{ kgs}$. Ahora bien, habíamos ya calculado que la cantidad de agua perdida por la semilla en el ciclo de secado, es decir en un intervalo de 0.4 horas, era de 1.51 kg. Es precisamente esta cantidad de agua la que es absorbida por el aire de secado. En virtud de estas consideraciones podemos ahora calcular la humedad de salida del aire de secado sumando la cantidad de agua absorbida a la cantidad de agua presente en el aire de entrada, y dividiendo el total entre el flujo de aire seco, como sigue:

$$[(116.7)(0.0126) + 1.51] / (116.7) = 0.0255 \text{ kg / kgs.}$$

Hagamos ahora una estimación de la temperatura de salida del aire de secado bajo el supuesto de que la única carga térmica es aquella representada por el calor latente de vaporización que demandan los 1.51 kg de agua antes referidos. Esta carga térmica puede calcularse multiplicando la cantidad antes referida de agua por su calor de vaporización tal cual consignado en la Tabla 4 de la parte I. La realización de esta operación arroja el siguiente resultado: $(1.51)(577.6) = 872.2 \text{ kcal}$.

El calor húmedo promedio (C_H) del aire de secado puede ahora calcularse con la ecuación (10) a una humedad promedio entre la humedad de entrada (0.0126 kg / kgs) y la humedad de salida antes calculada (0.0255 kg / kgs), es decir a una humedad de $(0.0126 + 0.0255)/2 = 0.01905 \text{ kg / kgs}$. El valor así obtenido es de $C_H = 0.248 \text{ kcal / kg } ^\circ\text{C}$. Con base en esta cifra y el valor de la carga térmica antes calculada podemos determinar la temperatura del aire de secado restando de la temperatura inicial (80°C), el descenso que en su temperatura experimenta el aire al ceder la carga de evaporación antes referida, es decir: $80 - [(872.2) / (0.4 \times 295.4)(0.248)] = 50.2^\circ\text{C}$. El numerador de la expresión entre paréntesis cuadrados representa la carga térmica de evaporación. En el denominador encontramos, por otra parte, tanto el calor húmedo arriba calculado (0.248), como la magnitud de la masa de aire involucrada, calculada esta como el producto del tiempo de un ciclo de secado, 0.4 horas, y el flujo masa previamente determinado de 295.4 kg / h. A través de la carta psicrométrica podemos ahora determinar que la temperatura de bulbo húmedo correspondiente al aire de 50.2°C y $H = 0.0255 \text{ kg / kgs}$ es de 31.7°C . El gradiente de interés a la salida del secador experimental es entonces de $50.2 - 31.7 = 18.5^\circ\text{C}$, resultado que al combinarse con el gradiente de 46.7°C a la entrada produce una media logarítmica de $\Delta\theta = 30.5^\circ\text{C}$. Consecuentemente:

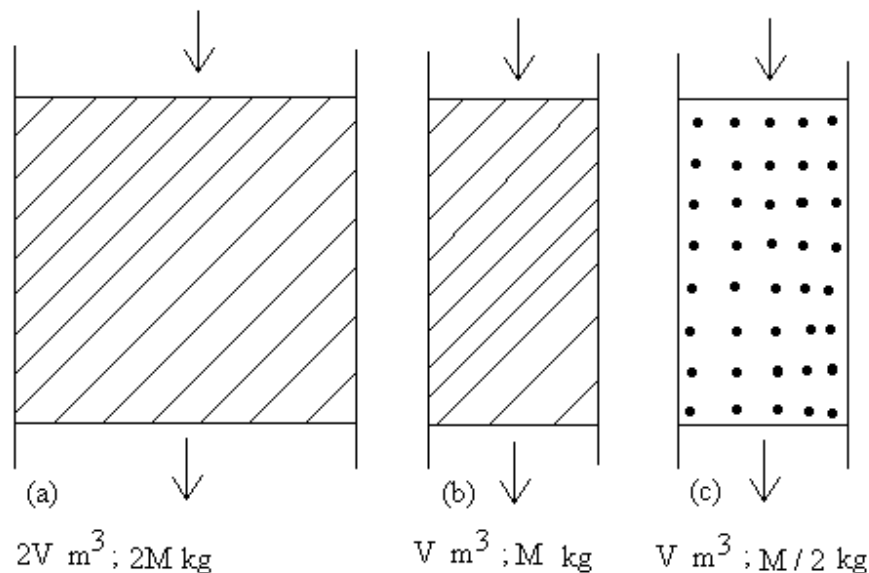
$$h_c^* a = \frac{(N_c^*)\lambda_i}{\Delta\theta} = \frac{(407.8)(577.6)}{(30.5)} = 7722.8 \text{ kcal}/(\text{m}^3)(\text{h})(^\circ\text{C}) \quad (11)$$

Debe ser claro que el mismo error encontrado en relación a la estimación del tiempo total de secado asociado a $N_c^* a$, opera con $h_c^* a$. Veamos. Para evaporar 1.51 kg de agua requerimos de 872.2 kcal. En virtud de que en el lecho de referencia se transfieren $[(7722.8 \text{ kcal / m}^3 \text{ h } ^\circ\text{C})(0.00744 \text{ m}^3)(30.5^\circ\text{C}) = 1752.5 \text{ kcal / h}$, se necesita de un tiempo total de $[872.2 \text{ kcal} / 1752.5 \text{ kcal / h}] = 0.498 \text{ h}$. Este resultado debe nuevamente compararse con el tiempo experimental de 0.4 h. El error de estimación es así idéntico al encontrado en relación con la estimación basada en $N_c^* a$.

II.4 LA EXTRAPOLACIÓN

Antes de involucrarnos con la extrapolación en sí, revisaremos algunos conceptos básicos de la cinética del proceso de secado. Observemos al efecto Figura 3. La figura central allí representada, identificada como (b), representa el lecho experimental de Ramachandra et al., de volumen $V \text{ m}^3$, conteniendo una cantidad inicial de semilla igual a $M \text{ kg}$. La figura identificada como (a) representa por otra parte, un lecho con el doble del volumen y el doble de semilla que las correspondientes a la figura (b). A efectos de una mejor comprensión, podemos visualizar el lecho (a) como correspondiente a dos lechos (b), uno al lado del otro. El aire de secado que reciben ambos lechos tiene las mismas características, es decir, $\theta = 80^\circ\text{C}$, $H = 0.0126 \text{ kg / kgs}$, y velocidad de 0.9 m / s . No nos debe ser difícil comprender que bajo estas condiciones, en un período dado de tiempo el lecho (a) perderá el doble de agua que la que en el mismo periodo pierde el lecho (b). Sin embargo, la cantidad de agua evaporada por hora y por metro cúbico de lecho – y por ende la velocidad de secado- será la misma en ambos casos. Esto se comprende reconociendo que si bien el lecho (a) pierde dos veces mas agua por hora, esta pérdida toma lugar en el doble de volumen. Veamos esto de la siguiente manera. Si $\Delta M / (\Delta t) V$ cuantifica la pérdida de agua por unidad de tiempo y unidad de volumen en el lecho (b) – es decir la velocidad de secado del lecho (b)- entonces la pérdida del lecho (a) puede representarse como $2 \Delta M / (\Delta t) (2 V)$, idéntica a la del lecho (b). En virtud de que en ambos lechos las velocidades de secado así como las condiciones del aire de secado y de la semilla cargada a los lechos se han supuesto iguales, iguales también serán –tal como puede observarse de la ecuación (5)- los coeficientes de transferencia de calor. La extrapolación del lecho (a) al lecho (b) es lo que pidiéramos llamar una extrapolación simétrica y la conclusión obtenida no requiere de suposiciones o restricciones adicionales a las allí avanzadas.

Figura 3. Lecho experimental de Ramachandra



Fuente: propia

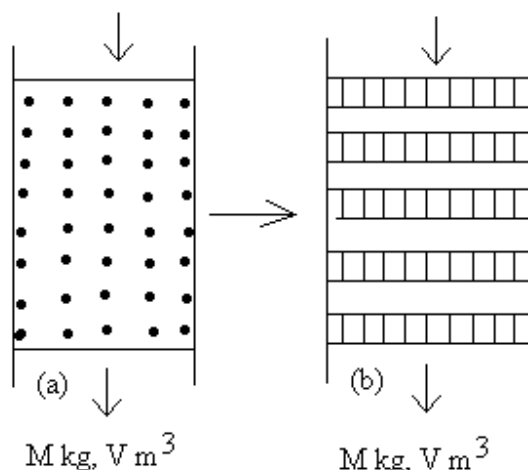
La figura 3 (b) representa el lecho experimental de Ramachandra et al. La figura (a) representa la extrapolación simétrica del lecho anterior. Aquí tanto el volumen como la cantidad de semilla allí contenida son el doble de las que corresponden al lecho (b). La figura (c) representa, por otra parte, la extrapolación asimétrica del lecho (b). Aunque volumen de este lecho es idéntico al del lecho experimental, la cantidad de semilla allí depositada es la mitad de la que corresponde a aquel.

Comparemos ahora la extrapolación asimétrica del lecho (b) al lecho (c). En este último se ha colocado la mitad de la cantidad de semilla que en el mismo volumen contiene el lecho (b) y aquí el argumento exige precisar que la cinética del secado de la semilla húmeda de ajonjolí obedece una ley de primer orden. El que esto es así ha sido ya comentado en relación a los resultados de Djurkov y Elenkov comentados en la parte I de este estudio. Comentarios adicionales al respecto pueden encontrarse en [4]. Dado que las condiciones iniciales de semilla así como temperatura, humedad y velocidad de aire de secado se consideran iguales en ambos casos, tendremos que en el mismo periodo de tiempo el lecho (c) experimentará una pérdida de agua igual a la mitad de la que en el mismo periodo de tiempo experimentará el lecho (b). Dado que estas pérdidas ocurren a *igualdad* de volumen, tendremos que la velocidad de secado en el lecho (c) corresponderá a la mitad de la que impera en el lecho (b). Estas situaciones quizás puedan comprenderse mejor con referencia al campo de la cinética química. Refiriéndonos a la cinética de primer orden de una reacción química $A \rightarrow \text{Productos}$, es sabido que la velocidad de descomposición de A , medida como el cambio en el número de moles de A en un cierto período de tiempo y por unidad de volumen será la misma tanto en dos litros de una solución 1M, como en un litro de una solución de la misma concentración (Cabe aquí aclarar que la magnitud que en el análisis a que se refiere la figura 3 correspondería a la concentración química, lo es el cociente $M/V \text{ kg/m}^3$). Ciertamente, el número de moles de A que en aquella han reaccionado en ese periodo de tiempo, será el doble de los que corresponden a esta última. Esta disminución ha tomado lugar, sin embargo, en el doble de volumen. Tenemos aquí una situación comparable a la que se presenta con los lechos (a) y (b) de la Figura 3. Es también sabido que la velocidad de descomposición de A en un litro de una solución 0.5M será solo la mitad de la que opera en 1 litro de una solución 1M. En esta última solución y en un periodo dado de tiempo, reaccionan la mitad de moles de A que los que en el *mismo volumen* reaccionan en la solución 1M. Esta situación es comparable a la que se establece entre los lechos (b) y (c). Con la ecuación (5) como guía, y a igualdad de condiciones de aire de secado y semilla, podemos entonces decir que la disminución que en la velocidad de secado se presenta en el lecho (c) repercute en una disminución proporcional en el coeficiente de transferencia de calor. Si la cantidad de semilla en el mismo volumen se reduce en n veces, en las mismas veces se reduce el coeficiente. La reducción en cuestión, debe entenderse, es consecuencia exclusiva de la menor cantidad de semilla en el lecho.

Al observar detenidamente la figura 3(c) nos daremos cuenta, sin embargo, que la situación allí mostrada correspondería más a una condición de perfecta fluidización que a la condición de la semilla a través de un secador rotatorio. Esta última puede concebirse como una sucesión de “cilindros” o “cascadas” de semilla producidos por las aletas del secador rotatorio al levantar y enseguida dejar caer la semilla, misma que se desplaza luego por la superficie inferior del secador solo para experimentar otro ciclo levantamiento-caída y generar así otro “cilindro” y así sucesivamente. La diferencia entre estas dos situaciones ha

sido representada en la figura 4. En la condición que hemos llamado de “perfecta fluidización” correspondiente a la figura 4 (a), tenemos la totalidad del área superficial de la semilla expuesta al aire de secado, lo que sin duda representa una vía eficiente al intercambio de calor y masa con el aire de secado. En el caso mostrado en la figura 4(b), correspondiente a las condiciones operantes en un secador rotatorio, la semilla al interior de los diferentes “cilindros” o “cascadas” allí mostradas, es capaz de exponer solo una fracción de su área superficial al intercambio de masa y calor con el aire de secado.

Figura 4. La distribución de la semilla



Fuente: propia

La distribución de la semilla en la figura 4 (a) sugiere condiciones de perfecta fluidización. La distribución en (b) representa las “cascadas” o “cilindros de semilla que se producen a lo largo de un secador rotatorio.

El análisis visual de la figura respectiva indica una conexión entre el número de “cascadas generadas por la acción conjunta de la rotación del secador y la aletas interiores del mismo. A menor número de “cascadas”, mayor espacio vacío y con ello menor área de transferencia, lo que conduce finalmente a una reducción adicional en la velocidad de secado –y por tanto del coeficiente de transferencia de calor- por sobre la que se ha discutido con anterioridad en relación a las figura 3. Suponiendo una relación lineal esperaríamos entonces que un incremento de r veces en el espacio vacío produzca una disminución de r veces en el coeficiente respectivo. Es preciso hacer notar que un efecto similar es asociado por Friedman y Marshall al coeficiente volumétrico de calor de secadores rotatorios en términos de la variación de lo que líneas abajo definiremos como ‘retención’ [5]. Es con estas consideraciones como base que procederemos ahora a la materia de la extrapolación arriba referida.

Pongamos nuestra atención en un secador rotatorio y definamos ahora el término *retención*, al que nos referiremos también como *densidad volumétrica de empaque*, como la razón porcentual del volumen de semilla que en cualquier momento se encuentra en el secador, al volumen total del mismo. En términos de este concepto, una operación eficiente se logra según Foust [1], con retenciones que van del 3% al 10%; del 5% al 15% según Perry [6]; y

del 10% al 15% según Mujumdar [7]. Un valor razonable de retención sería así, del 10%, cifra que satisface los criterios de los tres autores mencionados. Volviendo al lecho experimental de Ramachandra, reconozcamos que una cifra representativa de la cantidad de grano presente a lo largo del ciclo de secado puede obtenerse promediando las cantidades iniciales y finales de semilla en el lecho (ver Tabla 1), como sigue: $[3.952 + (2.325)(1.05)] / 2 = 3.1966$ kg. El volumen ocupado por esta cantidad de semilla puede ahora obtenerse dividiendo su magnitud entre la densidad del ajonjolí (577 kg / m^3), como sigue: $(3.1966/577) = 0.00554 \text{ m}^3$. El porcentaje que el volumen del ajonjolí representa del volumen total en el lecho experimental, puede ahora calcularse como sigue: $(0.00554/0.00744) = 74.5 \%$. De esta manera, mientras que la densidad volumétrica es del 10% en el secador rotatorio, en el lecho experimental es del 74.5%. En otras palabras, la densidad volumétrica del lecho experimental es 7.45 veces mayor que la del secador rotatorio. De esta manera, si ha de establecerse una comparación directa

Figura 5. Secador rotatorio de acero inoxidable para el secado de ajonjolí descorticado



entre el lecho experimental y el secador rotatorio tenemos que empezar por igualar las densidades volumétricas. Al efecto y manteniendo todos los demás factores constantes (volumen total del lecho de 0.00744 m^3 , aire de velocidad igual a 0.9 m / s , temperatura de bulbo seco de $80 \text{ }^\circ\text{C}$, y humedad de 0.0126 kg / kgs), reduciremos la densidad de empaque en el lecho experimental del 74.5% al 10%. Al efecto disminuirémos la cantidad de ajonjolí allí a depositarse en 7.45 veces, de 3.1966 kg , a $3.1966 / 7.45 = 0.4291 \text{ kg}$. Tal cual requerido, esta reducción producirá una densidad de empaque del lecho del 10%,

$$[10\% = (0.4291/577)(100)/0.0074].$$

De acuerdo a la discusión previamente ofrecida en relación a la extrapolación asimétrica del lecho de Ramachandra et al., podemos decir que el primer efecto de esta reducción de 7.45 veces de la cantidad de semilla en el volumen del lecho se manifiesta en una reducción proporcional en el coeficiente de transferencia respectivo que de $7722.8 \text{ kcal / m}^3 \text{ h } ^\circ\text{C}$, [ver ecuación (11)] pasa a $(7722.8 / 7.45) \approx 1036.6 \text{ kcal / m}^3 \text{ h } ^\circ\text{C}$.

Reconozcamos ahora el hecho de que aparejado a esta reducción de la cantidad de semilla, se produce en el lecho un incremento en la cantidad de espacio vacío. En el lecho original el espacio vacío significaba el 24.5%. Esta cifra es el complemento del porcentaje

volumétrico ocupado por la semilla que, como se recordará, es del 74.5%. En el lecho que ha sido modificado a efectos de lograr una comparación directa con las condiciones del secador rotatorio, este volumen vacío es del 90% (recordar que aquí el volumen de la semilla es del 10%). Tenemos entonces que el tránsito del lecho original al modificado va acompañado de un incremento de 3.67 veces [$3.67 = (90 / 24.5)$] en el espacio vacío, aunado a lo cual postulamos una disminución de 3.67 veces en la velocidad de secado y consecuentemente, una disminución proporcional en el coeficiente bajo estudio, que de 1036.6 pasa a ser de 282.5 kcal /m³ h °C [(1036.6 /3.67) = 282.5].

El lecho original de Ramachandra ha sido modificado en su densidad volumétrica de empaque, y los efectos de esta modificación repercutidos en su coeficiente de transferencia de calor. El efecto que la modificación anterior ha tenido en el porcentaje de volumen vacío ha sido también repercutido en el coeficiente de transferencia de calor. Así modificado, el lecho experimental puede compararse de forma directa con el secador rotatorio.

II.5 CONCLUSIÓN

Teniendo como base las correcciones asociadas a la extrapolación asimétrica del lecho experimental de Ramachandra et al., hemos concluido que el coeficiente volumétrico de transferencia de calor -al que denominaremos Ua - operando en un secador rotatorio con 10% de retención y trabajando con aire de alimentación de 0.9 m/s, temperatura de 80°C, y humedad de 0.0126 kg /kgs, es el siguiente [8]:

$$Ua = 282.5 \text{ kcal /}(m^3)(h)(^{\circ}C) \pm 43 \% \quad (12)$$

Convirtiendo las unidades de (12) a unidades inglesas, obtenemos el siguiente resultado:

$$Ua \approx 17.6 \text{ Btu /}(cu. ft.)(h)(^{\circ}F) \pm 43 \% \quad (13)$$

Este resultado debe contrastarse con el intervalo de valores para Ua recomendados por Perry [4], derivados de la ecuación de Friedman y Marshall (comentada anteriormente por Foust), y que lee $10 \leq Ua \leq 25 \text{ Btu /}(cu. ft.)(h)(^{\circ}F)$.

El resultado mostrado en (12), y re-expresado en (13), representa la respuesta al problema planteado al inicio de este trabajo. Los coeficientes allí anotados tiene el sustento experimental proveído por la información de Ramachandra et al. Si bien ha sido necesario introducir una serie de suposiciones, las mismas han sido razonadas, y el error de estimación cuantificado. Son precisamente estas dos consideraciones las que proveen de seguridad al resultado por nosotros obtenido. Importante es aquí reconocer que el valor anotado en (13) cae dentro del intervalo de valores recomendados por Perry en base a la ecuación de Friedman y Marshall. Esta concordancia es, a su vez, argumento que valida el uso de la citada ecuación para el cálculo de los coeficientes volumétricos de calor asociados al secado de semilla de ajonjolí descuticulizada en secadores rotatorios.

Creemos necesario mencionar que no se obtiene el mismo grado de concordancia al comparar nuestro resultado con los que provienen de otras ecuaciones. Por ejemplo, McCabe [2], proporciona la siguiente ecuación: $Ua = (0.5G^{0.67})/D$ para el cálculo del coeficiente volumétrico de calor en secadores rotatorios, con Ua en Btu/(cu. ft.)(h)(°F), G representando al flujo masa en lb/(sq. ft.)(h), y D al diámetro del secador en pies. Con $G = 658$ y $D = 4$ se obtiene $Ua \approx 10$. Este valor difiere del obtenido por nosotros en $\approx 43\%$, [$43\% = (17.6-10)(100)/17.6$], que es precisamente el margen de error anotado para nuestro valor.

II.6 COMENTARIO FINAL

El hecho de que el método empírico de extrapolación de coeficientes de transferencia de calor aquí presentado haya producido una notoria concordancia entre el valor experimentalmente sustentado, con los recomendados por Perry para este tipo de secadores, no garantiza de manera alguna que un razonamiento similar produzca resultados comparables en otros casos. Lo que puede aquí concluirse es que el puente bosquejado entre la información experimental de secado a lecho fijo y los coeficientes operantes en secadores rotatorios – a igualdad de condiciones- merece ser explorado con más detenimiento.

REFERENCIAS

1. **A. S. FOUST ET AL.** (1969). Principios de Operaciones Unitarias. México D. F.: CECSA, p. 428.
2. **W. L. MCCABE, W. L., SMITH, J. C., HARRIOT, P.** (2005). Unit Operations of Chemical Engineering, New York: McGraw-Hill, p. 820.
3. **MCCABE, W. L., SMITH, J. C.** (1965). Unit Operations of Chemical Engineering. New York: McGraw-Hill, p.839.
4. **MAROULIS, Z. B., SARAVACUS, G. D.** (2005). Food Process Design. London: Taylor and Francis (CRC press), p. 265.
5. **MUJUMDAR, A. S.** (2006). Handbook of Industrial Drying, 3rd Edition. London: Taylor and Francis (CRC Press), p. 160.
6. **PERRY, J. H.** (Ed.). (1963). Chemical Engineers' Handbook. New York: McGraw-Hill, 20-19.

ÑIGUEZ, JOSÉ



Ingeniero químico de la Universidad de Sonora y maestro en ciencias en fisicoquímica del CINVESTAV, México. Ha sido docente de tiempo completo y jefe de la carrera de ingeniería química en la Universidad de Sonora; instructor en el departamento de química del CINVESTAV y tutor académico e instructor de ciencia y matemáticas en el campus Douglas del Cochise College en Arizona, USA, donde le fué otorgado el Associate Faculty Star Award en reconocimiento a su carrera docente e investigativa. Ha laborado en el Bufete Industrial Diseños y Proyectos, en la industria minera mexicana, en la sección de plantas piloto del departamento de refinación y petroquímica del Instituto Mexicano del Petróleo, así consultor independiente. En investigación ha publicado sobre la termoquímica de compuestos orgánicos, termodinámica química y la conexión entre la geometría de la ecuación cuadrática aurea y la secuencia de Fibonacci. En 2008 publicó su libro: Negative Entropy: a brief incursion into the uncharted universe of decreasing entropy.

7. **MUJUMDAR, A. S.** op. cit., p. 162.
8. El error anotado para Ua es el error cuadrático medio y fue calculado suponiendo, primero, que el uso de densidades volumétricas promedio, así como de espacios vacíos promedio introducen, cada cual, un error del 25 % y, segundo, que estas fuentes y la que representa el uso de la velocidad volumétrica promedio son las principales fuentes de error. Siendo así, su error combinado sería del orden de $[3(25^2)]^{1/2} = 43\%$

LEDEZMA, EUGENIO

Ingeniero químico por la Universidad de Sonora y maestro en ciencias en electrónica por la Universidad de Arizona, Estados Unidos. Ha laborado en la planta de Jugos Kern's en Mexicali B. C.; en la planta de Cincinnati Electronics en Hermosillo, Sonora, y como ingeniero de diseño y consultor en práctica independiente. En el aspecto académico desarrolló fructífera labor como maestro de tiempo completo en la Universidad de Sonora. Además, posee dilatada trayectoria en la astronomía mexicana, que incluye la dirección general del observatorio astronómico de La Mariquita en Sonora, México, y su participación en el proyecto del gran telescopio milimétrico mexicano.

ORNELAS, HÉCTOR

Ingeniero químico de la Universidad de Sonora y maestro en ciencias en fisicoquímica por el CINVESTAV, México. Ha laborado en el Instituto Mexicano del Petróleo y dedicado la mayor parte de su ejercicio profesional a la enseñanza de la fisicoquímica y la ingeniería química, paralela a la cual ha desarrollado una importante labor administrativa que incluye la secretaría general académica de la Universidad de Sonora y la vicerrectoría de su unidad regional sur. Sus trabajos de investigación incluyen publicaciones sobre aspectos fundamentales de la termodinámica química y la termoquímica de compuestos orgánicos.