



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

Mezcla de sólidos

Apellidos, nombre	Castelló Gómez Marisa (mcasgo@upv.es) Barrera Puigdollers Cristina (mcbarpu@tal.upv.es) Pérez Esteve Edgar (edpees@tal.upv.es) Noelia Betoret Valls (noebeval@tal.upv.es)
Departamento	Departamento de Tecnología de Alimentos
Centro	Universitat Politècnica de València



1 Resumen

En este artículo vamos a presentar las consideraciones que hay tener presentes en la mezcla de distintos materiales sólidos con el fin de conseguir mezclas homogéneas dentro de límites de tolerancia establecidos. Para ello, veremos diferentes equipos utilizados en el mezclado de distintos componentes. Además, se presentan los índices matemáticos para estimar la calidad del mezclado y poder predecir el tiempo óptimo de la mezcla.

2 Introducción

La operación de **mezclado** es una operación unitaria que se lleva a cabo por medios mecánicos y que es ampliamente utilizada en el procesado de alimentos, pero también en la industria farmacéutica o de otros ámbitos en los que se pretenda obtener una combinación de distintos componentes.

Además de la mezcla de componentes, el mezclado puede ser empleado con otros fines:

- Realización de trabajo mecánico (amasado de masas de panadería)
- Promoción de la transferencia de calor (congelación de helados)
- Promoción de la transferencia de masa (lixiviación de componentes)
- Promoción de reacciones químicas y biológicas (fermentación)

Por otra parte, el mezclado es sumamente importante cuando se trata de la elaboración de algunos alimentos en los que la concentración de sus componentes debe cumplir con normas o legislación. Por ejemplo, en mezclas de vegetales, en salchichas, productos fortificados con vitaminas y/ minerales, etc...

El tamaño de partícula es el factor que más influye en el mezclado uniforme de los alimentos secos, aunque también hay que considerar su densidad, forma, higroscopicidad, adhesividad, susceptibilidad a cargas electrostáticas... En diversos estudios se ha demostrado que conforme se incrementa el tamaño de partícula, se requiere más tiempo para obtener un mezclado uniforme (con menos de un 10% de coeficiente de variación entre muestras). Sin embargo, en la práctica es necesario mezclar partículas con un amplio rango de tamaños.

La uniformidad del producto final depende principalmente de:

- Tipo de mezcladora
- Condiciones del mezclado (velocidad, temperatura, tiempo)
- Composición del alimento

Con algunas mezclas, después de que inicialmente se consigue una uniformidad en el mezclado, ésta se rompe y los productos comienzan a separarse, dando lugar a la segregación de los mismos. En estos casos es de suma importancia controlar con exactitud el tiempo de mezclado.



3 Objetivos

Una vez que el estudiante se lea con detenimiento este documento, será capaz de:

- Seleccionar el tipo del mezclador
- Ajustar la velocidad de agitación necesaria para efectuar el mezclado en tambores rotatorios
- Aplicar los modelos matemáticos desarrollados para estimar los índices de mezclado y el tiempo necesario para conseguir una mezcla con las tolerancias establecidas

4 Desarrollo

¿Cómo vamos a abordar este tema?

En primer lugar, nos vamos a familiarizar con los tipos de mezcladores utilizados para sólidos y algunas de sus particularidades. Después veremos cómo calcular el número de etapas necesarios para conseguir una mezcla en la que el reparto de un principio activo sea uniforme. Por último, nos centraremos en el análisis de conceptos estadísticos y los índices de mezclado necesarios para estimar la calidad de la mezcla y el tiempo necesario para llevarla a cabo.

4.1 Los mezcladores

El objetivo de un mezclador es mover las partículas de los ingredientes para conseguir un conjunto homogéneo de los mismos. Cuanto mayor sea el movimiento de partículas, más rápido y eficiente será el mezclado.

Los mezcladores suelen actuar generando movimiento de forma simultánea en al menos dos direcciones. Existen dos modalidades de mezcladores para productos secos:

- El material se mueve como consecuencia de la rotación del recipiente que lo contiene: **Mezcladores de volteo**
- El material es impulsado por un transportador helicoidal: **Mezcladores de cinta y mezcladores verticales de tornillo**

En la imagen 1 se presentan algunas formas frecuentes de los mezcladores de volteo que operan moviendo la masa de sólidos en un tambor giratorio. Estos mezcladores se llenan sólo hasta la mitad de su capacidad y giran a velocidades entre 20 y 100 rpm.

El tambor rotatorio puede ser liso por dentro, o contener elementos u obstáculos internos para facilitar la mezcla. Con bajas velocidades de rotación en un cilindro apenas hay mezcla. Al aumentar la velocidad, los sólidos suben por la pared cayendo en "cataratas" y generando la mezcla. No obstante, la velocidad de volteo debe ser siempre inferior a la velocidad crítica (ω_{cr}), que se define como aquella a la que la fuerza centrífuga supera a la de gravedad. Esta velocidad viene definida por la siguiente ecuación:



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

$$\omega_{cr}(s^{-1}) = \sqrt{\frac{g}{(4\pi^2 R)}}$$

A partir de la velocidad crítica los sólidos se encuentran en continuo contacto con la superficie del tambor. Reemplazando las variables numéricas conocidas se puede decir la que la velocidad máxima de giro expresada en rpm será $42,3D^{0.5}$, donde D, es diámetro del cilindro o *trommel*.

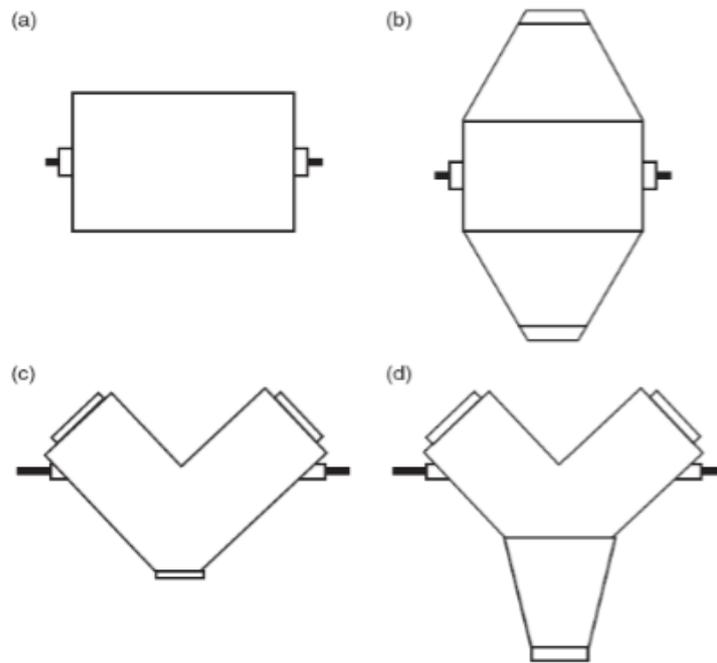


Imagen 1. Formas típicas de los mezcladores de volteo a) cilindro horizontal, b) de doble cono, c) cono en V, d) cono en Y. Fuente: Ortegas-Rivas (2005).

Los mezcladores de cinta (sencilla o doble) son muy utilizados para el mezclado de ingredientes secos finamente particulados, como mezcla de granos de cereales (antes de la molienda), harinas, mezclas para pasteles, sopas deshidratadas, incorporar aditivos, etc...En la imagen 2 se muestra un detalle de este tipo de mezcladores.

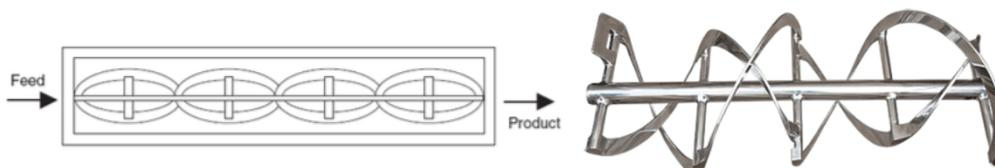


Imagen 2. Ejemplo de mezclador de cinta



Los mezcladores verticales de tornillo están constituidos por un tornillo vertical, que gira sobre su eje, ubicado en el interior de un recipiente cónico, que a su vez gira sobre su eje longitudinal. Mediante este sistema se consigue una intensa acción de mezclado, por lo que resultan muy eficaces cuando se desea incorporar una cantidad muy pequeña de un determinado, como por ejemplo en la adición de vitaminas a chocolate en polvo o cereales infantiles.

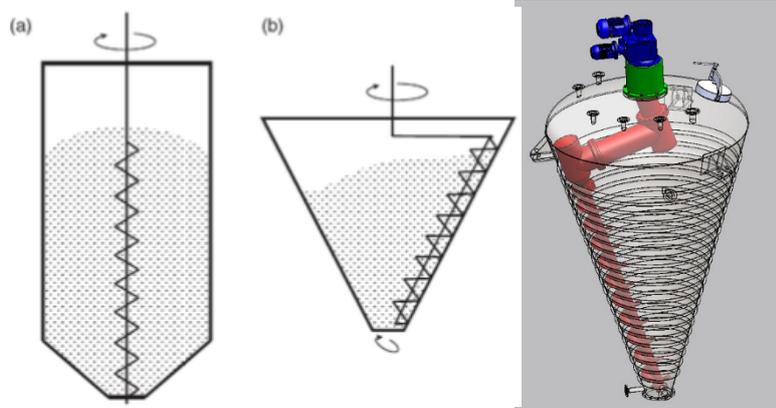
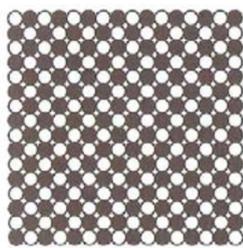


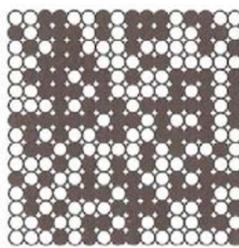
Imagen 3. Ejemplo de mezclador de tornillos

4.2 Mezclas binarias y estimación del número de etapas de mezclado

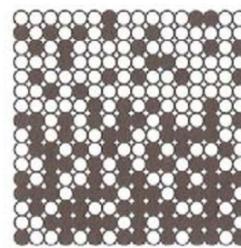
Imaginemos una muestra compuesta por el mismo número de partículas negras que de partículas blancas que se caracterizan por tener el mismo tamaño (imagen 4). En el caso de que se diera una mezcla perfecta encontraremos la misma proporción de partículas negras y blancas en cualquier región de la muestra. Sin embargo, esta situación no es real a menos que se haga la selección manual. Lo que se pretende lograr es una mezcla al azar y evitar tener mezclas segregadas.



Mezcla Perfecta



Mezcla al azar



Mezcla segregada

Imagen 4. Tipos de mezcla

En muchos productos alimentarios o medicamentos hay un componente que, aunque se incorpora en menor proporción al resto, tiene una importancia mayor y por tanto es si cabe más necesario que se presente de forma uniforme en cada muestra de producto final. Por ello, si la relación de mezcla no es superior a 50 partes de



componente mayoritario por 1 de principio activo, puede hacerse frecuentemente la mezcla en una etapa. Sin embargo, si la proporción entre el compuesto mayoritario y el activo es mucho mayor, se recomienda hacer uso de varias etapas de mezclado para garantizar una mezcla homogénea. Para averiguar el número de etapas requeridas se puede utilizar la siguiente fórmula:

$$Y^{\frac{1}{X}} \leq 50$$

donde

Y: gramos de componente mayoritario por gramo de componente principal

X: número de etapas de la mezcla que se obtiene por tanteo: 2, 3, 4....

El resultado obtenido tras definir el número de etapas que dan lugar a un cociente de $Y^{1/x}$, nos indica la relación aproximada que debemos considerar en la primera mezcla entre el principio activo y el componente mayoritario.

Así, por ejemplo, para una relación compuesto activo: compuesto mayoritario 1:1000 habría que realizar dos etapas. En una primera mezcla seguiríamos la relación 1:32 (1 parte de excipiente por 32 de componente mayoritario) y una segunda mezcla 1:31,6 (1 parte de la mezcla anterior con 31,6 del componente mayoritario).

4.3 Conceptos estadísticos, índices de mezcla, tolerancias y tiempo de mezcla

4.3.1. Conceptos estadísticos

Suelen realizarse experimentos o ensayos previos para calcular la forma o tiempo de mezcla precisos, para tener una cierta desviación de la mezcla perfecta, medida, por ejemplo, con la varianza.

Vamos a mencionar algunas ecuaciones para mezclas binarias, que pueden utilizarse en conjunción con experimentos para caracterizar el comportamiento:

- La **varianza** en un momento dado se calcula tomando n muestras, y en cada una midiendo la concentración x_i .

$$\text{Media: } \bar{X} = \frac{\sum x_i}{n}$$

$$\text{Varianza: } s^2 = \frac{1}{n} \sum (x_i - \bar{X})^2$$

Si se conoce el valor que debe tener la composición (μ) la varianza será:

$$s^2 = \frac{1}{n} \sum (x_i - \bar{\mu})^2$$

Y la desviación estándar (s) se calcula como $\sqrt{s^2}$



- **Valor inicial de la varianza, superior o de segregación completa (s_0^2).** . Si inicialmente tenemos dos masas a mezclar cuyas fracciones másicas son $p+q=1$, el valor inicial de la varianza será: $s_0^2 = p \cdot q = p(1 - p)$.
- **Valor inferior de la varianza (s_∞^2)** se dará cuando la mezcla sea completa:

$$s_\infty^2 = \frac{p(1-p)}{N} = \frac{s_0^2}{N}$$

Donde N es el número de partículas que se toman para el análisis de cada muestra. Si el número de partículas es muy grande $s_\infty=0$

4.3.2. Índices de mezcla y tolerancias

Se pueden considerar diversos índices de mezcla como se pueden ver en la tabla 1. En ambos casos el resultado del índice de mezcla es 0 inicialmente y 1 si se alcanzara la mezcla perfecta.

Tabla 1. Índices de mezcla

Índices de mezcla (IM)	Ecuación
IM de Lacey	$I_L = \frac{s_0^2 - s^2}{s_0^2 - s_\infty^2}$
IM de Poole	$I_P = \frac{s}{s_\infty}$

Otro aspecto de interés es conocer los valores verdaderos de la media o varianza con ciertos límites de confianza. Hay que considerar la composición de la mezcla distribuida en forma normal.

La composición verdadera será:

$$\mu = \bar{X} + t \frac{s}{\sqrt{n}}$$

Donde t es el valor de t del test de Student para un cierto nivel de confianza y cierto valor de n. El resultado indicará el intervalo en el que estará la composición media con cierto nivel de confianza o probabilidad. Por ejemplo, con $n=50$, para intervalo de confianza del 90% en tablas de Student, $t=1,676$, luego el valor verdadero difiere de \bar{X} menos de $0,237s$, con probabilidad del 90%.

4.3.3. Tiempo de mezcla

Dado que el índice de mezcla de Lacey es una relación entre la mezcla inicial y la máxima que se puede obtener, variando entre 0 y 1, puede usarse para



seguir el grado de mezcla con el tiempo. En la práctica la evolución con el tiempo de este índice de mezcla se suele ajusta a la ecuación:

$$\frac{dI_L}{dt} = k(1 - I_L) \quad \text{integramos} \quad I_L = 1 - e^{-kt}$$

Esta ecuación asume un acercamiento de forma exponencial; es decir, cuando empezamos la mezcla cambia rápidamente, pero después cada vez el cambio será más lento.

Con esta ecuación son necesarios experimentos previos para ver cómo se va mezclando y calcular el valor de k . Así, en un cierto tiempo se mide la mezcla. Con ella, se calcula s^2 y después se obtiene I_L , para finalizar calculando k . Así, quedará caracterizado ese mezclador. A continuación, se puede plantear la situación de calcular el tiempo necesario para tener varianza menor que cierto valor, por ejemplo 10^{-4} . Con ese valor se calcula I_L , y junto con el valor de k , se despeja el tiempo preciso t . Se aplica por tanto dos veces la misma ecuación.

5 Cierre

A lo largo de este objeto de aprendizaje hemos visto qué mezcladores se emplean a nivel industrial para conseguir mezclas homogéneas de distintos componentes. A su vez, se han presentado las consideraciones estadísticas y diferentes índices de mezclado que hay que tener presentes para evaluar la mezcla.

6 Bibliografía

- [1] Colina M.L. (2016). Mezclado de alimentos. Disponible en: http://sgpwe.izt.uam.mx/files/users/uami/mlci/file/mezclado_solidos.pdf
- [2] Díaz, M. "Ingeniería de bioprocesos". Capítulo 14. Manejo de sólidos. Ediciones Paraninfo, 2012 pág. 256-258.
- [3] Mezclado y segregación. Disponible en: <http://www.criba.edu.ar/cinetica/solidos/Capitulo10.pdf>
- [4] Bachiller (2016). Disponible en: http://www.bachiller.com/productos/equipos_de_proceso/procesado_de_solidos/mezcladores_de_solidos/eliconomix.html
- [5] Ortigas-Rivas, E., Handling and Processing of Food Powders and Particulars, Capítulo 4 en "Encapsulated and Powdered Foods", editado por Onwulata C., CRS Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, FL, USA, 2005.