



CORPORACIÓN
UNIVERSITARIA
REMINGTON

TECNOLOGÍA AGROINDUSTRIAL

ASIGNATURA: OPERACIONES UNITARIAS

CORPORACIÓN UNIVERSITARIA REMINGTON
DIRECCIÓN DE EDUCACIÓN A DISTANCIA

Este material es propiedad de la Corporación Universitaria Remington (CUR), para los estudiantes de la CUR en todo el país.

2011

CRÉDITOS



El módulo de estudio de la asignatura Operaciones Unitarias es propiedad de la Corporación Universitaria Remington. Las imágenes fueron tomadas de diferentes fuentes que se relacionan en los derechos de autor y las citas se relacionan en la bibliografía. El contenido del módulo está protegido por las leyes de derechos de autor que rigen al país.

Este material tiene fines educativos y no puede usarse con propósitos económicos o comerciales.

AUTOR

Ana María Velásquez Giraldo

Ingeniera Agroindustrial

Nota: el autor certificó (de manera verbal o escrita) No haber incurrido en fraude científico, plagio o vicios de autoría; en caso contrario eximió de toda responsabilidad a la Corporación Universitaria Remington, y se declaró como el único responsable.

RESPONSABLES

Ignacio Ramos Jaramillo

Decano del programa Tecnología Agroindustrial

Elkin Darío Ocampo Toro

Director general de Educación a Distancia

Octavio Toro Chica

Vicerrector Académico de Educación a Distancia

Angélica Ricaurte Avendaño

Coordinadora de la Unidad de Medios y Mediaciones Educativas

GRUPO DE APOYO

Personal de la Unidad de Medios y Mediaciones

EDICIÓN Y MONTAJE

Unidad de Medios y Mediaciones

Primera versión. Febrero de 2011.

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	5
2.	OBJETIVO GENERAL	7
3.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	8
4.	REQUISITOS DE INGRESO	9
5.	COMPETENCIAS DE EGRESO	10
6.	FICHA TÉCNICA DEL MÓDULO	11
7.	MAPA DEL MÓDULO	12
8.	UNIDAD 1 GENERALIDADES DE LAS OPERACIONES UNITARIAS	13
8.1.	OBJETIVO GENERAL.....	13
8.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
8.3.	PRUEBA INICIAL.....	14
8.4.	TEMAS	15
8.4.1.	Operaciones preliminares	15
8.4.2.	Tamizado	18
8.4.3.	Reducción de tamaño.....	24
8.4.4.	Filtración.....	27
8.4.5.	Centrifugación	32
8.4.6.	Prensado	36
8.4.7.	Mezcla y agitación	37
8.4.8.	Ejercicios.....	43
8.5.	PRUEBA FINAL	47
8.5.1.	Actividad.....	48
9.	UNIDAD 2 OPERACIONES UNITARIAS EN ALIMENTOS	49
9.1.	OBJETIVO GENERAL.....	49
9.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	49

9.3.	PRUEBA INICIAL	50
9.4.	TEMAS	51
9.4.1.	Sedimentación	51
9.4.2.	Emulsificación.....	55
9.4.3.	Homogenización	59
9.4.4.	Esterilización.....	61
9.4.5.	Pasteurización	66
9.4.6.	Escaldado	71
9.4.7.	Cristalización	73
9.4.8.	Ejercicios.....	77
9.5.	PRUEBA FINAL	80
9.5.1.	Actividad.....	80
10.	UNIDAD 3 EVAPORACIÓN	82
10.1.	OBJETIVO GENERAL	82
10.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	82
10.3.	PRUEBA INICIAL	83
10.4.	TEMAS	84
10.4.1.	Evaporación.....	84
10.4.2.	Ejercicios.....	91
10.5.	PRUEBA FINAL	93
10.5.1.	Actividad.....	94
11.	UNIDAD 4 SECADO.....	95
11.1.	OBJETIVO GENERAL	95
11.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	95
11.3.	PRUEBA INICIAL	96
11.4.	TEMAS	97
11.4.1.	Secado	97
11.4.2.	Ejercicios.....	105
11.5.	PRUEBA FINAL	107

11.5.1. Actividad.....	108
12. BIBLIOGRAFÍA.....	109

1. INTRODUCCIÓN

Todo proceso agroindustrial, independientemente del material que modifique, está compuesto de varias operaciones básicas que buscan adecuar, transformar o conservar la materia prima. Estas operaciones básicas se pueden agrupar según los principios físicos o químicos que las definen, así como por las aplicaciones que tienen. De acuerdo a lo anterior, se presentan en este módulo algunas de las técnicas más empleadas en la industria, como son las operaciones preliminares de limpieza y selección, las operaciones de separación físico-mecánica (reducción de tamaño, tamizado, filtración, centrifugación prensado, mezcla y agitación, sedimentación) y algunas operaciones de transferencia de calor (esterilización, pasteurización, escaldado, evaporación y secado), entre otras.

Ahora bien, el objetivo fundamental de este módulo es brindar al estudiante los conocimientos esenciales que le permitan tomar decisiones asertivas durante el procesamiento agroindustrial, por ello cada una de las operaciones es definida profundizando en sus aplicaciones más comunes y en el funcionamiento de los equipos mediante los cuales se realiza. Adicionalmente, se describen los factores críticos de cada procedimiento y se describen los cálculos de las variables que permiten comprender el comportamiento de los fenómenos que constituyen la operación.

Finalmente, se espera que el estudiante afiance sus conocimientos a través del desarrollo de los ejercicios y las actividades propuestas, y demuestre lo aprendido en las pruebas finales requeridas.

Importancia

En un país en el cual el Producto Interno Bruto (PIB) generado por el sector agropecuario y silvicultor oscila entre el 10 y 12% al año, se hace indispensable contar con una agroindustria capaz de procesar los productos del campo, agregándoles más valor a través de la innovación en el procesamiento y la optimización del uso de los recursos como las materias primas, la mano de obra y la maquinaria.

Es por esto que el Tecnólogo Agroindustrial, como actor del sector transformador y potencializador del agro colombiano, debe conocer los métodos a través de los que se transforman las materias primas, para convertirse en un generador de acciones que favorezcan la creación de nuevas empresas, el mejoramiento de las ya existentes, la productividad, y además promueva el desarrollo de las organizaciones del sector. En respuesta a esto, el módulo de “Operaciones Unitarias” proporciona al estudiante los conocimientos básicos sobre las operaciones más utilizadas en el sector agroindustrial, que le permitan conocer, ejecutar y

controlar los diferentes procesos aplicados en la adecuación, transformación y conservación de las materias primas alimentarias y no alimentarias.

2. OBJETIVO GENERAL

Proporcionar al estudiante los principios teóricos y prácticos que poseen las operaciones unitarias ligadas al sector agroindustrial; así como el principio de funcionamiento de los equipos requeridos para su ejecución.

3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Describir los fundamentos de las operaciones de separación físico-mecánicas (operaciones preliminares, reducción de tamaño, tamizado, filtración, centrifugación prensado, mezcla y agitación), el principio de funcionamiento de sus equipos y sus aplicaciones
- Describir los fundamentos de las operaciones más relevantes de la industria alimentaria (sedimentación, emulsificación, homogenización, esterilización, pasteurización, escaldado y cristalización), sus principios de funcionamiento y sus aplicaciones específicas
- Definir los fundamentos de la operación de evaporación, su principio de funcionamiento y sus aplicaciones en la agroindustria alimentaria
- Definir los fundamentos de la operación de secado, las variables que intervienen en ella y sus aplicaciones en la agroindustria alimentaria y no-alimentaria

4. REQUISITOS DE INGRESO

- Haber aprobado el curso de Ecuaciones Diferenciales
- Haber aprobado el curso de Máquinas y Herramientas
- Nociones de termodinámica

5. COMPETENCIAS DE EGRESO

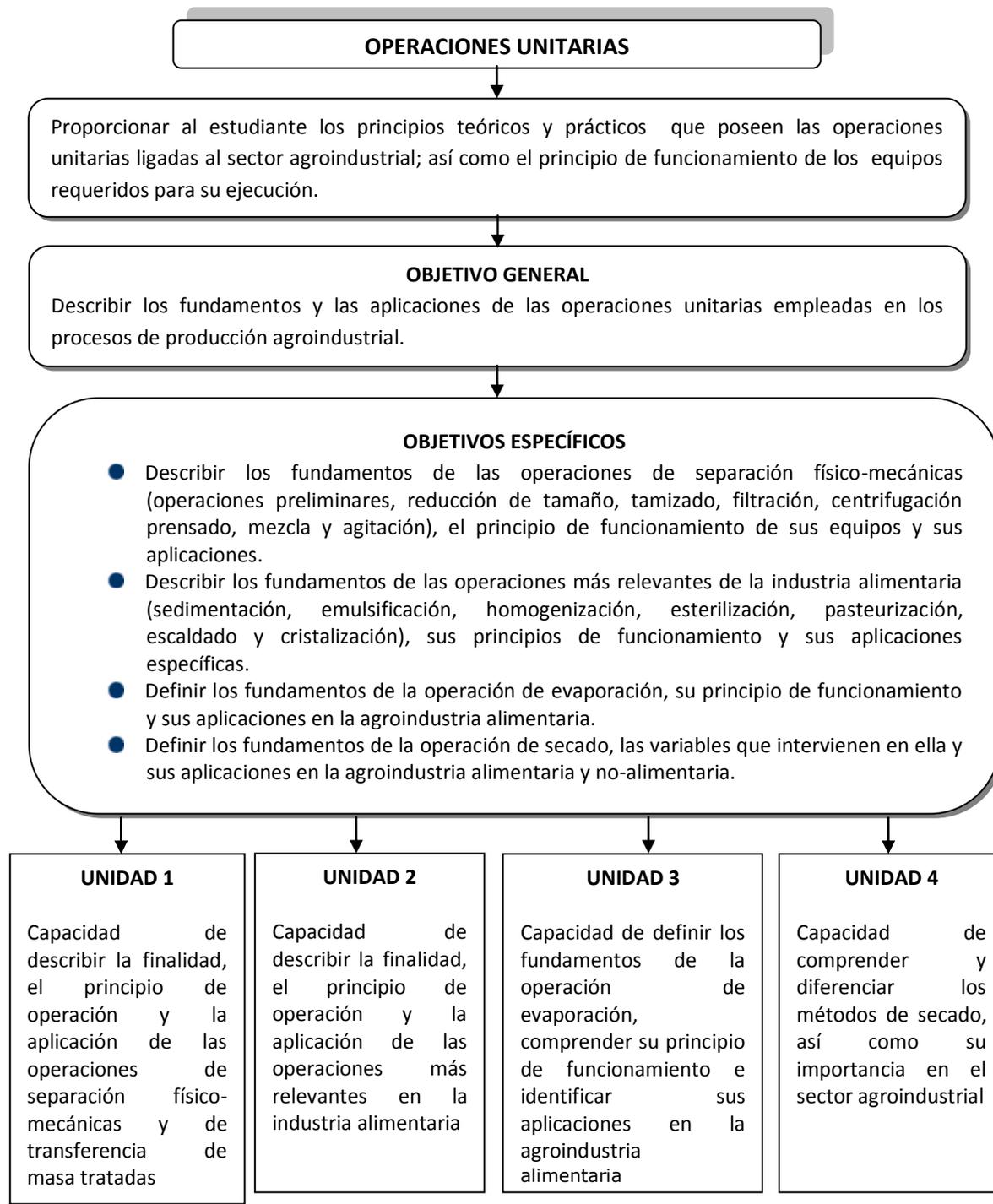
Al finalizar este curso el estudiante estará en capacidad de:

- Comprender las operaciones preliminares aplicadas a la agroindustria, con el fin de que pueda generar nuevas aplicaciones en las plantas de procesamiento agroindustrial
- Planear combinaciones lógicas de operaciones que permitan obtener nuevos o mejorados productos agroindustriales
- Calcular las principales variables de las operaciones unitarias incluidas en este módulo y relacionar el cambio de dichas variables para realizar mejoras en los procesos agroindustriales
- Identificar y solucionar problemas en el desarrollo de las operaciones unitarias en planta, a través de la detección de no conformidades en los procesos

6. FICHA TÉCNICA DEL MÓDULO

Área		Nivel de Formación		Objetivos					
Global	Específica			General		Específicos			
Procesamiento de materias primas agroindustriales	Adecuación, transformación y conservación de materias primas agroindustriales	x	Perceptual		Explorar	x	Explorar		
				x	Describir	x	Describir		
		x	Aprehensivo	x	Comparar	x	Comparar		
					Analizar	x	Analizar		
		x	Comprensivo	x	Explicar	x	Explicar		
					Predecir	x	Predecir		
					Proponer	x	Proponer		
		x	Integrativo		Modificar	x	Modificar		
					Confirmar		Confirmar		
				x	Evaluar	x	Evaluar		
		Indicadores Metodológicos							
		Propósito de Formación		X	Fundamentación Conceptual				
	Fundamentación Procedimental								
	Aplicación en el Saber Específico								
Competencias a Desarrollar		X	Interpretativas						
		x	Argumentativas						
			Propositivas						
Uso del Conocimiento			Capacidad para Representar						
		x	Capacidad para Reconocer Equivalencias						
		X	Capacidad para Recordar Objetos y sus propiedades						
Uso de Procedimientos		x	Habilidad y Destreza para Usar Equipos						
			Habilidad y Destreza para Usar Procedimientos de Rutina						
			Habilidad y Destreza para Usar Procedimientos Complejos						

7. MAPA DEL MÓDULO



8. UNIDAD 1 GENERALIDADES DE LAS OPERACIONES UNITARIAS

8.1. OBJETIVO GENERAL

Describir los fundamentos de las operaciones de separación físico-mecánicas (operaciones preliminares, reducción de tamaño, tamizado, filtración, centrifugación prensado, mezcla y agitación), el principio de funcionamiento de sus equipos y sus aplicaciones.

8.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Exponer los métodos más utilizados para la limpieza, selección y clasificación de las materias primas
- Señalar las variables involucradas en la operación de tamizado y determinar la eficiencia del mismo
- Relacionar las fuerzas que intervienen en la operación de reducción de tamaño con el tipo de productos obtenidos en ella (finos, intermedios y gruesos)
- Explicar el principio de funcionamiento de los equipos utilizados en las operaciones de filtración, centrifugación y prensado
- Resaltar la importancia que tienen las operaciones de agitación y mezcla para la industria alimentaria

8.3. PRUEBA INICIAL

¿Qué entiende por proceso? Dé un ejemplo de un proceso que desarrolle en su vida cotidiana y realice un diagrama de flujo en el que establezca además los agentes de ese proceso (materiales de ingreso, de salida, fuerzas necesarias, etc.).

Con base en libros, revistas o páginas Web, mencione las operaciones unitarias que se realizan en el proceso de obtención de los siguientes productos:

- Azúcar
- Aceites vegetales
- Cuero
- Lácteos
- Madera
- Concentrados para alimentación animal

8.4. TEMAS

8.4.1. Operaciones preliminares

En general, las materias primas de origen biológico contienen contaminantes o componentes indeseados. Además, y debido a su propia naturaleza, suelen presentarse diferencias físicas entre unidades (en tamaño, color, forma, entre otros aspectos) que no contribuyen a elaborar un producto uniforme. Por lo tanto, se hace imprescindible realizar una serie de operaciones preliminares o de acondicionamiento que preparen la materia prima para su adecuada transformación en las subsiguientes etapas de elaboración. Estas operaciones pueden variar de acuerdo al tipo de material que ingresa al proceso agroindustrial, sin embargo pueden agruparse de forma global en operaciones de limpieza, de selección y de clasificación.

Operaciones de limpieza

Mediante la aplicación de estas operaciones a la materia prima se busca separar los contaminantes de la materia prima, ya sea por razones sanitarias o por las características sensoriales, especialmente visuales, que se desean en el producto final. Además, a través de estas actividades de lavado se puede controlar el desencadenamiento de reacciones químicas y bioquímicas que lleguen a alterar el material.

En un proceso de limpieza se deben considerar los siguientes aspectos:

- Esta etapa y los equipos que intervengan en ella deben diseñarse teniendo en cuenta que los contaminantes se deben eliminar completamente después de la operación para evitar la re-contaminación del material
- La cantidad de producto noble desperdiciado debe ser mínima
- La superficie limpiada debe quedar en un estado aceptable sin que se haya lesionado el material
- Los líquidos efluentes deberán ser los mínimos posibles

Por otra parte, las operaciones de lavado pueden clasificarse en los métodos de limpieza en seco, métodos de limpieza en húmedo y métodos de limpieza combinados, que se describen a continuación:

Métodos de limpieza en seco

Tamizado: este método se aplica para materias primas sólidas granuladas, pulverizadas o particuladas (como harina de trigo, granos de arroz y de maíz, entre otros), y permite eliminar los contaminantes físicos que tengan un tamaño diferente al de la materia prima a limpiar. Los equipos utilizados dependen del tipo de materias primas, sin embargo algunos de uso común son los tamices de tambor rotatorio y los tamices de lecho plano. Este método se explica con mayor profundidad en la sección Tamizado.

Limpieza por abrasión: a través de esta operación se limpia la superficie del producto por el roce que se genera entre él y la máquina. Los equipos más usados para esta tipo de limpieza son el tambor rotatorio, los discos abrasivos y los cepillos rotatorios.

Limpieza por aspiración: es este caso la sustancia a limpiar se incorpora a una corriente de aire con velocidad controlada, efectuándose con ello la separación en dos o más corrientes debido a las diferencias de peso entre la materia prima y los contaminantes. Se usa en alimentos pulverizados que no pueden humedecerse y no se recomienda para aquellos que son susceptibles a la oxidación por el contacto con el aire.

Limpieza magnética: con esta operación se busca retirar piezas metálicas que se encuentren junto con la materia prima. Para esto se deja caer el producto sobre uno o más imanes que se ubican en las cintas transportadoras.

Otros métodos de limpieza en seco no tan comunes son la limpieza electrostática, la separación por radioisótopos y la separación por rayos X.

Métodos de limpieza en húmedo

Lavado por inmersión: debido al contacto con el agua se separan las impurezas de la materia prima. Debido al papel que juega aquí el agua es fundamental que esta sea potable y que no ponga en riesgo la calidad microbiológica del producto. La eficiencia de este método puede mejorarse si se le da movimiento al agua que rodea los productos por medio de agitadores, o en el caso contrario, si se mueve la materia prima al interior del recipiente con agua. El agua caliente también puede mejorar la eficiencia, pero puede aumentarse la velocidad de deterioro de los alimentos. En el caso que se usen detergentes durante esta operación, deben seleccionarse con especial cuidado para que dichos agentes no afecten el aspecto y textura de los alimentos.

Lavado por aspersión: este es el método de limpieza en húmedo probablemente más utilizado, y en él se exponen las superficies del producto a duchas o aspersores de agua; por esto no es recomendable para productos blandos. La eficiencia del método depende de la presión, el

volumen y la temperatura del agua utilizada, la distancia entre el aspersor y el producto, el número de duchas y el tiempo de exposición a ellas.

Lavado por flotación: este procedimiento se fundamenta en la diferencia de densidad que existe entre los contaminantes y el producto, separando las partes valiosas de las indeseables al precipitar alguna de las partes hacia el fondo del tanque y dejando que las demás floten.

Existen otras técnicas de lavado en húmedo, por ejemplo la limpieza ultrasónica.

Métodos de limpieza combinados

Como su nombre lo indica, estos procedimientos incluyen una o más técnicas de limpieza que se configuran según las características específicas de cada producto. Por ejemplo, en la industria se pueden encontrar lavadores de tambor rotatorio y aspersion, y lavadores de cinta y aspersion.

Selección y clasificación

Estas operaciones preliminares juegan un papel importante en el control de la eficiencia del proceso, pues es la primera etapa que contribuye realmente a la estandarización del producto final.

La selección consiste en separar las materias primas en categorías de diferentes características físicas medibles, que generalmente son el peso, el tamaño, la forma y el color.

Los beneficios que trae consigo la selección de las materias primas son:

- Se adecua el material para las operaciones mecanizadas como el descortezado y la remoción de semillas
- La uniformidad del material garantiza la transferencia de calor homogénea entre los productos que se sometan a pasterización o esterilización
- Facilita la normalización de los pesos añadidos a los envases de venta
- Los productos seleccionados son más atractivos a la vista del consumidor y permiten servir porciones de tamaño uniforme

Para cada una de estas características existen diversos métodos y equipos. Algunos de ellos se enumeran a continuación:

Selección por peso: la selección por peso es más precisa que por otros métodos y es por ello que se utiliza para productos alimenticios de mayor valor como la carne, los huevos y las frutas exóticas.

Selección por tamaño y forma: la forma y tamaño de los alimentos es importante pues determina su eventual adecuación para un determinado proceso de elaboración o incluso su precio de venta, ya que el consumidor prefiere, por lo general alimentos uniformes. Esta operación consiste en la separación de los alimentos sólidos en dos o más fracciones de tamaño distinto. La clasificación por forma se realiza manual o mecánicamente, por ejemplo mediante un clasificador de banda y rodillo o de disco, o bien por procesamiento de imágenes. Para la clasificación por tamaños se utilizan cribas de abertura de tamaño fijo o variable, bien sean estacionarias, rotatorias o vibratorias.

Selección mecánica por color (selección fotométrica): este sistema de selección se usa con frecuencia para cereales, granos de café, frutos secos con defectos, cítricos y tomates con distintos grados de madurez. La operación está basada en la propiedad de reflectancia. Consiste en hacer un barrido con un haz de luz de intensidad determinada sobre la superficie de cada unidad de producto cuando pasan por delante de un fotodetector. Este mide la luz reflejada de cada partícula individual y la compara con un estándar preestablecido, las partículas que no se ajustan con el mismo son rechazadas por un chorro de aire comprimido que desvía el producto a una corriente de rechazos.

Por otro lado, el término clasificación se refiere por lo general a la separación de los alimentos sólidos según características con diferentes categorías de calidad. Estas características pueden ser: madurez, textura, sabor, aroma, color, carencia de desperfectos o contaminantes, carencia de partes indeseables de la materia prima y conformidad con los estándares legales, entre otros.

Los procedimientos de clasificación pueden llevarse a cabo determinando la calidad por medio de pruebas de laboratorio, o bien separando la cantidad total del alimento en categorías de calidad, ya sea manual o mecánicamente.

Referencias

BRENNAN, J.G., et al. Las operaciones en la ingeniería de los alimentos. Zaragoza: Editorial Acribia, 1970. 35-47p.

FERNÁNDEZ SEVILLA, José María. Tecnología de los alimentos: operaciones preliminares [en línea]. Universidad de Almería, España. Disponible en: <http://www.ual.es/~jfernand/TA/Tema5/Tema5-OperacionesPreliminares.pdf>

8.4.2. Tamizado

Descripción

El tamizado es una operación en la que una mezcla de partículas sólidas, generalmente seca, de diferentes tamaños se separa en dos o más fracciones pasándolas por un tamiz. Cada fracción resultante es más uniforme en cuanto a tamaño que la mezcla original. El uso más tradicional de este método se da cuando se separan en intervalos de tamaños mezclas de productos granulares o pulverulentos, aunque también puede considerarse esta técnica para realizar análisis de partículas según la distribución de su tamaño.

Aplicaciones agroindustriales

Algunas aplicaciones de la operación de tamizado son:

- Clasificación de frutas y verduras según tamaño y forma
- En el procesamiento de granos (maíz, arroz, café pergamino, entre otros) y productos granulados o pulverizados como la harina de trigo, permite separar el productos por tamaños o calidades, y adicionalmente retira las impurezas o partículas de mayor tamaño que las deseadas

Consideraciones sobre los tamices

Se aclara que un tamiz o criba es una superficie que contiene cierto número de aperturas de igual tamaño, y cuya superficie puede ser plana (horizontal o inclinada) o cilíndrica. Esas aperturas, se refieren al espacio existente entre los hilos individuales de un tamiz de malla de hilo, y se relacionan con el número de malla del tamiz, que es el número de aperturas por pulgada lineal. Esas dos cantidades no son las mismas, pues para una misma apertura de tamiz el número de malla dependerá del espesor del hilo que forma el tamiz.

La relación entre las aberturas sucesivamente disminuyentes en una serie de tamices normalizados se conoce como intervalo de tamiz. En la actualidad se utilizan varias series de tamices diferentes (véase la Tabla 1), siendo la más usada la serie Tyler (ver valores de apertura de malla en la Tabla 2). Al final de cada arreglo o conjunto de tamices se dispone un recipiente colector, en el cual cae el material que no fue retenido por ningún tamiz.

Tabla 1. Características de las series de tamices normalizadas

Series	Nro. de mallas	Diámetro de los hilos	Apertura de tamiz	Intervalo de tamiz
Tyler	200	0,0021 pulg.	0,0029 pulg.	$\sqrt{2}$ o $\sqrt[4]{2}$
British Standard	200	Clasificación Standard Wire Gauge (S.W.G.)	0,0030 pulg.	$\sqrt{2}$

U.S. Bureau of Standard	18	-	1,0 mm	$\sqrt{2}$
-------------------------	----	---	--------	------------

Por último cabe resaltar que los tamices industriales están hechos con barras metálicas, láminas y cilindros perforados o con telas y tejidos manufacturados con hilos. Entre los materiales de construcción de los tamices para separar alimentos se incluyen el acero inoxidable y telas de Nylon. Además, si de un producto se requieren N fracciones (clasificaciones), se requerirán N-1 tamices.

Factores que afectan la eficiencia del proceso de tamizado

El objetivo del tamizado es separar completamente los productos deseados de los indeseables, pero ese grado de separación puede verse afectado por una serie de factores como:

- Si la velocidad de alimentación es muy alta y/o el ángulo de inclinación es muy pendiente, puede acarrear un tiempo de residencia insuficiente sobre la superficie de tamizado
- Si el ángulo de inclinación es muy pequeño, puede restringir el flujo gravitatorio a través del tamiz
- Aunque el tamaño de partícula sea pequeña, sólo pasa por el tamiz si su alineación con los agujeros del tamiz es favorable
- Las partículas grandes tienden a obstruir el paso de las más pequeñas
- Cuando el tamaño de las partículas es próximo al de la apertura del tamiz, puede generarse la obturación u obstrucción del mismo. Así, las partículas con capacidad para pasar quedaran atrapadas
- En mezclas húmedas, la adhesión que se genera entre las partículas pequeñas y las grandes, puede ocasionar que las partículas menores sean arrastradas con las de mayor tamaño
- En tamices deteriorados o rotos, las partículas grandes pasarán por la zona dañada, disminuyendo la eficiencia de la separación

Tabla 2. Escala de tamices estándar Tyler

Mallas	Abertura De malla, mm.	Abertura Aprox. Pulg.	Diámetro Del hilo, cm
	26.67	1	0.3759
+	22.43	7/8	0.3429
	18.85	3/4	0.3429
+	15.85	5/8	0.3048
	13.33	1/2	0.2667
+	11.20	7/16	0.2667
	9.423	3/8	0.2336
1 1/2 +	7.925	5/16	0.2235
3	6.680	1/4	0.1778
2 1/2 +	5.613	7/32	0.1651
4	4.699	3/16	0.1651
5 +	3.962	5/32	0.1117
6	3.327	1/8	0.0914
7 +	2.794	7/64	0.0833
8	2.362	3/32	0.0812
9 +	1.981	5/64	0.0838
10	1.651	1/16	0.0889
12 +	1.397		0.0711
14	1.168	3/64	0.0635
16 +	0.991		0.0596
20	0.883	1/32	0.0436
24 +	0.701		0.0358
28	0.589		0.0317
32 +	0.495		0.0299
35	0.417	1/64	0.0309
42 +	0.351		0.0254
48	0.295		0.0233
60 +	0.246		0.0177
65	0.208		0.0182
80 +	0.176		0.0142
100	0.147		0.0106
115 +	0.124		0.0096
150	0.104		0.0066
170 +	0.088		0.0060
200	0.074		0.0053

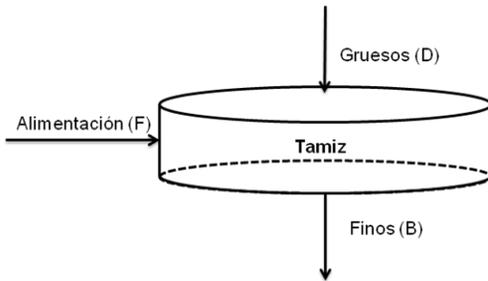
Estos tamices se incluyen cuando se desea un intervalo de tamizado más estrecho, completando la serie normalizada utilizada habitualmente. Con esta inclusión la relación de los diámetros de las aberturas entre dos tamices sucesivos es de 1: en lugar de 1.25.

Fuente: KARMI K., Jaime. Reducción de tamaño [en línea]. Universidad Técnica Federico Santamaría, Chile. Disponible en:
http://descom.jmc.utfsm.cl/jcarmi/proyectos_de_ingenieria/material/apuntes%20II/03-Reduccion%20de%20tamano.pdf

Corrientes del proceso de tamizado y cálculos importantes

La corriente de alimentación que ingresa al tamiz (corriente F) se divide en dos fracciones, que son: 1) el material que pasa a través de un tamiz, denominado finos, cernidos o pequeños (corriente B), y 2) el que se queda retenidos, llamados gruesos o productos de cola (corriente D) (ver Figura 1). Dependiendo del proceso, cualquiera de las dos corrientes puede convertirse en la deseada (producto) o en la indeseable (rechazos o desechos).

Figura 1. Corrientes del proceso de tamizado



Fuente: creación propia.

La relación de las corrientes de finos y gruesos está dada por el balance de masa presentado en la ecuación (1):

$$F = D + B \quad (1)$$

Los porcentajes de composición del componente deseado en cada corriente, presentadas como fracciones de composición, con valores que oscilan entre 0 y 1 son: X_F para la alimentación, X_D en los gruesos y X_B en los finos o cernidos. Una vez hecha esta precisión, se puede deducir entonces que el componente A de una mezcla deberá distribuirse entre las corrientes de salida como aparece en la ecuación (2):

$$FX_F = DX_D + BX_B \quad (2)$$

Desarrollando esta ecuación se hallan las relaciones másicas entre las corrientes de gruesos y finos con la alimentación, presentadas en las ecuaciones (3) y (4) respectivamente:

$$\frac{D}{F} = \frac{X_F - X_B}{X_D - X_B} \quad (3)$$

$$\frac{B}{F} = \frac{X_F - X_D}{X_R - X_D} \quad (4)$$

Ahora bien, la eficacia del tamiz puede calcularse también a través de la siguiente ecuación (5):

$$E = \frac{X_D(X_F - X_B)(X_F - X_D)(1 - X_B)}{X_F(X_D - X_B)(X_B - X_D)(1 - X_F)} \quad (5)$$

Además de la eficacia, la capacidad es una característica importante de los tamices industriales. La capacidad de un tamiz se mide por la masa de material que puede recibir como alimentación por unidad de tiempo y unidad de superficie, dada en Ton/h y se halla a partir de la ecuación 6:

$$\text{Capacidad} = \text{Factor} * \text{Área} * \text{Diámetro} \quad (6)$$

Donde el factor es un valor que oscila entre 1y 5 para tamices estáticos, y varía entre 5 y 20 para tamices vibratorios (*Brown*, en su libro *Unit Operations*, presenta los factores exactos según el tipo de tamiz). Un alto valor de este factor significa que se trata de un tamiz en el que pueden entrar más toneladas por milímetro durante 24 horas. La unidades de dicho factor son Ton/(24h*pie²*mm). El área es el producto del largo por el ancho en pie², y el diámetro se refiere al diámetro de malla en mm.

Equipos para el tamizado

Algunos de los equipos utilizados para efectuar la operación de tamizado son:

Parrillas o tamices de barras: consisten en un grupo de barras paralelas espaciadas, ya sea horizontales o inclinadas en un ángulo de 60°, con o sin vibración. Se utilizan para tamizar partículas con un tamaño superior a 2,5 cm.

Tamices vibratorios: consiste en un marco que soporta una rejilla o una placa perforada, que se sacude mecánica o electromagnéticamente, y el movimiento resultante arrastra los productos sobre la superficie del tamiz. En general están inclinados respecto de la horizontal, y también pueden ser de capas múltiples o series montados unos debajo de otros, con lo que se separa la carga en varios intervalos de tamaño.

Tamices de tambor: son tamices cilíndricos giratorios montados casi horizontalmente. La superficie de tamizado puede ser también de malla de hilo o placa perforada.

Referencias

- KARMI K., Jaime. Reducción de tamaño [en línea]. Universidad Técnica Federico Santamaría, Chile. Disponible en: http://descom.jmc.utfsm.cl/jcarmi/proyectos_de_ingenieria/material/apuntes%20II/03-Reduccion%20de%20tamano.pdf
- ZARTHA SOSSA, Jhon Wilder y PIEDRAHÍTA PALACIO, Juan Carlos. Operaciones y procesos agroalimentarios. Medellín: Universidad Pontificia Bolivariana, 2009. p. 25-34.

8.4.3. Reducción de tamaño

Descripción

En muchos procesos de la manufactura desmenuzar los sólidos mediante la aplicación de fuerzas mecánicas suele ser una necesidad frecuente. La reducción de tamaño se hace necesaria cuando:

- Se va a realizar la extracción de un constituyente determinado contenido en una estructura compuesta, como sucede en la obtención de harina a partir de granos de trigo o jarabe a partir de la caña de azúcar. La velocidad de extracción de un soluto deseado crece al aumentar el área de contacto entre el sólido y el disolvente
- Se requiere reducir el tiempo de operación necesario en ciertas operaciones cortando, taladrando o troceando las sustancias del proceso
- Una disminución en el tamaño de la partícula de una masa dada del producto conduce a un aumento de la superficie del sólido, un ejemplo es la reducción del tiempo de secado aumentando el área superficial de los sólidos

Aplicaciones agroindustriales

La operación de reducción de tamaño está presente en casi todos los procesos de elaboración de alimentos, algunos de las aplicaciones específicas son:

- El picado de la caña de azúcar antes de ser sometida a la extracción de los jugos
- La trilla de maíz y otros cereales, en la que se reduce el tamaño del grano, por ejemplo la obtención de harina
- Obtención de partículas de un tamaño específico necesario para el desarrollo de un proceso, como por ejemplo la preparación de condimentos y la refinación del chocolate

Fuerzas que actúan en el proceso de reducción de tamaño

El producto de la operación de reducción de tamaño es un sólido en partículas gruesas, medias o finas. Los sólidos pueden romperse de diferentes formas, pero se utilizan habitualmente en los equipos de reducción de tamaño cuatro fuerzas que son:

- **Compresión:** se utiliza para la reducción gruesa de sólidos duros, dando lugar a relativamente pocos finos. Un ejemplo de este tipo de acción es la de un cascanueces.
- **Impacto:** es la fuerza que se aplica por ejemplo con un martillo, y genera tanto productos gruesos, como medios o finos.
- **Frotación o rozamiento:** conduce a productos muy finos a partir de materiales blandos no abrasivos. Este tipo de acción es similar a la que se ejerce con una lima.
- **Corte:** da lugar a un tamaño definido de partícula, y a veces también de forma, con pocos finos o sin ellos.

Factores y cálculos importantes en la reducción de tamaño

Los factores más significativos en el proceso de reducción de tamaño son la cantidad de energía o potencia consumida, el tamaño de la partícula y las nuevas superficies formadas. Para el cálculo de la cantidad de energía y potencia existen varias ecuaciones empíricas, como son la ley de Kick, la ley de Rittinger y la ley de Bond, siendo esta última bastante utilizada. La ley de Bond, cierta para muchas sustancias en moliendas gruesas, intermedias y finas, se presenta en la ecuación (7).

$$E = K_B \left[\frac{1}{\sqrt{X_2}} - \frac{1}{\sqrt{X_1}} \right] \quad (7)$$

Donde:

- E es la energía requerida para efectuar la reducción de tamaño, de un tamaño inicial al deseado
- K_B es la constante de *Bond*. Para encontrar resultados de potencia en caballos de fuerza/hora, es decir en HP, es $K_B=1,46 \cdot E_i$
- X_2 es el diámetro medio de la unidad de producto final
- X_1 es el diámetro medio de la unidad de producto inicial

Con base en la ley de *Bond* y la constante K_B puede encontrarse la potencia bruta requerida para disminuir el diámetro de partícula al tamaño deseado, partiendo de la expresión (8), así:

$$\frac{P}{T} = 1,46E_i \left(\frac{1}{\sqrt{D_p}} - \frac{1}{\sqrt{D_f}} \right) \quad (8)$$

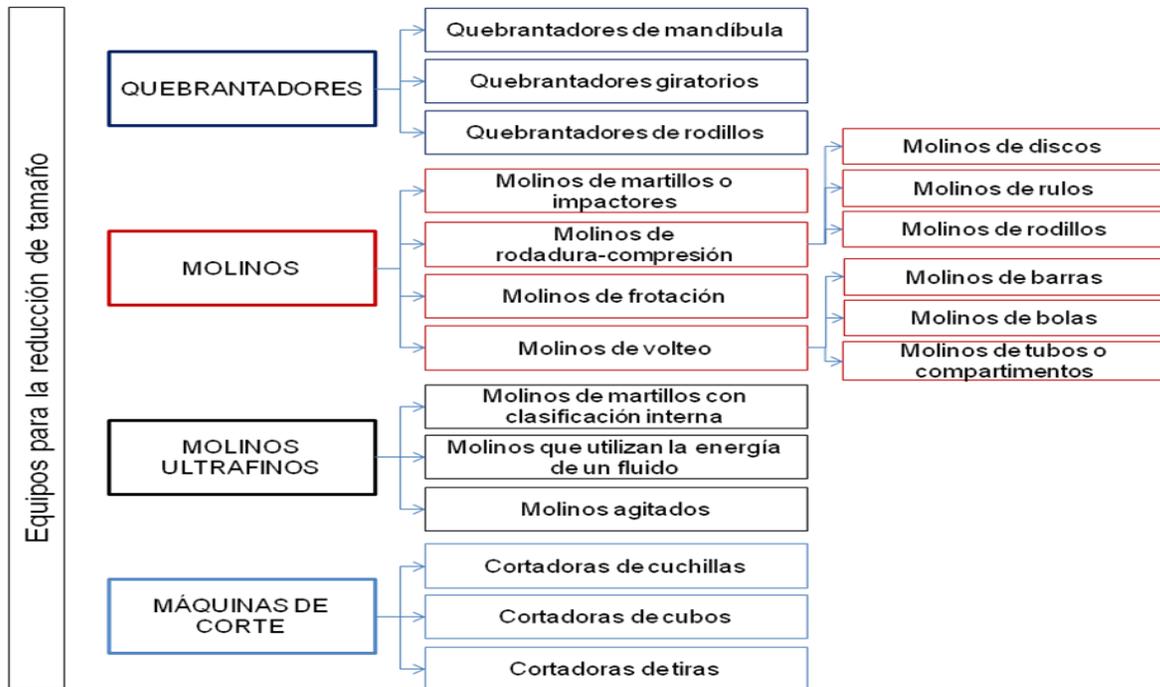
Donde:

- P es la potencia bruta requerida para efectuar la reducción de tamaño deseada, en HP
- T es el flujo de alimentación al equipo, en Toneladas/min
- E_i es el índice de trabajo (no tiene unidades). Este índice se define como el trabajo (kw/h) por tonelada que se requiere para reducir una unidad de peso desde un tamaño muy grande hasta un tamaño tal que el 80% pase por un tamiz de 100 μ m. Los valores de E_i pueden encontrarse experimentalmente y se encuentran tabulados para algunos minerales en la literatura
- D_f es el diámetro de las partículas de la alimentación en pies
- D_p es el diámetro de las partículas de salida o el producto final en pies

Equipos para la reducción de tamaño

Existen múltiples equipos utilizados en la reducción de tamaño, y su principio de funcionamiento varía de acuerdo al alimento o producto con el que se trabaje. Algunos de los equipos más comúnmente empleados se presentan en la Figura 2.

Figura 2. Equipos utilizados en la reducción de tamaño



Fuente: creación propia

Los quebrantadores se adaptan a procesos en los que requiera obtener tanto productos gruesos como finos, mientras que los molinos se utilizan para productos intermedios y finos. Algunas imágenes y consideraciones sobre el funcionamiento de los equipos de reducción de tamaño se encuentran en el enlace Web: [reducción de tamaño](#)

Referencias

GEANKOPLIS, Christie J. Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias. México: CECSA, 1998. p. 930.

ZARTHA SOSSA, Jhon Wilder y PIEDRAHÍTA PALACIO, Juan Carlos. Operaciones y procesos agroalimentarios. Medellín: Universidad Pontificia Bolivariana, 2009. p. 20-24.

8.4.4. Filtración

Descripción

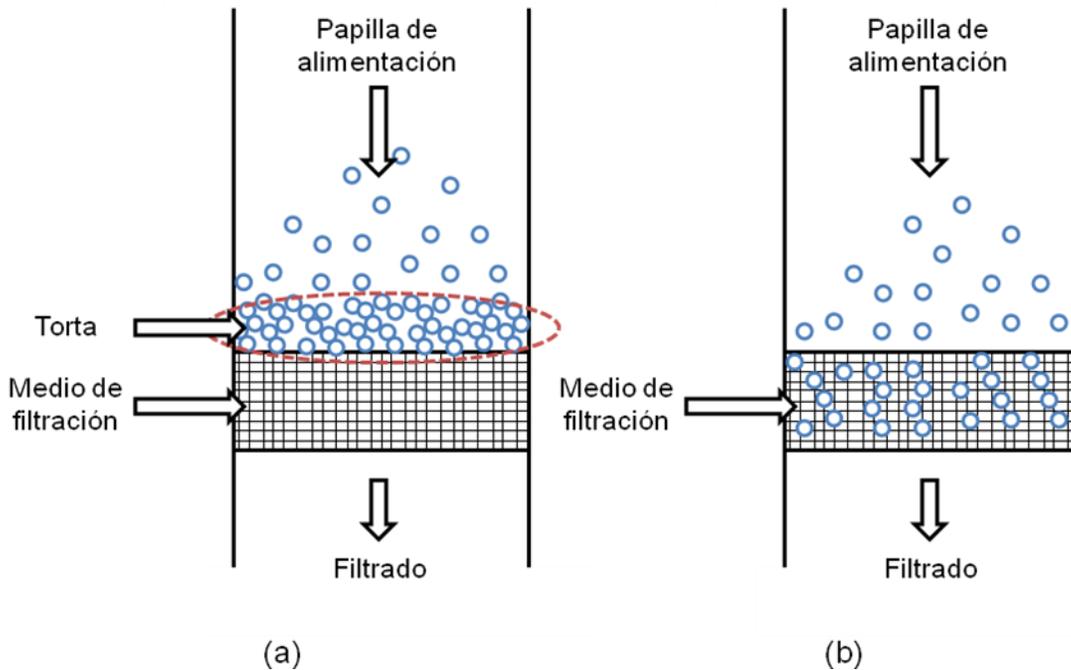
En la operación de filtración se separan sólidos de líquidos, haciendo pasar el fluido que contiene las partículas en suspensión (papilla de alimentación) a través de un medio de filtración que las retiene. El tamaño del poro del medio de filtración ha de ser lo suficientemente pequeño para retener en su interior o en su superficie las partículas sólidas (torta de filtración), pero lo suficientemente grande para dejar pasar el líquido (filtrado).

Estas características dan paso a dos tipos de filtración, que se describe a continuación y se ilustran en la Figura 3:

Filtración en superficie: en esta, los sólidos suspendidos quedan retenidos en la superficie del medio filtrante, por lo que el flujo se detiene cuando los sólidos cubren los poros del medio. Si los sólidos no se adhieren a la superficie, los filtros se pueden reutilizar mediante el lavado en la dirección opuesta al flujo. Este tipo de técnica se usa para promover la formación de una torta de sólidos y conservarla una vez que esta se ha formado.

Filtración en profundidad: como los sólidos penetran en el interior del medio filtrante, los poros se obstruyen y el flujo se detiene, razón por la cual se hace necesario cambiar el filtro.

Figura 3. Tipos de filtración: (a) en superficie y (b) en profundidad



Fuente: adaptado de ORDOÑEZ, Juan A., et al. Tecnología de los alimentos Volumen I: Componentes de los alimentos y procesos. Madrid: Editorial Síntesis S.A. p. 339.

Aplicaciones agroindustriales

Algunas aplicaciones de la operación de filtración son:

- Recuperación de lactoalbúmina en la obtención de quesos
- Recuperación de jugo de caña durante su extracción
- Refinado de aceites
- Filtración de suspensiones de gluten y almidón en el procesamiento del maíz
- Clarificación de alimentos líquidos como la cerveza, zumos de fruta, vinagre, extractos de carne y levadura, aceites de mesa y salmueras

Consideraciones sobre los medios de filtración

Como se mencionó anteriormente, los medios de filtración son aquellos elementos que retienen las partículas sólidas de la suspensión que se pretende separar. Uno de los parámetros más importantes de estos medios es el tamaño del poro, que se elige según las condiciones específicas de cada proceso.

Los medios de filtración pueden ser rígidos, cuando están hechos de carbón poroso, porcelana, placas metálicas perforadas, rejillas de hilo, entre otros; o pueden ser flexibles cuando sus materiales de construcción son polímeros sintéticos como el nylon, el polipropileno o el polietileno.

Es oportuno ahora mencionar a los coadyuvantes de filtración, que son partículas grandes no compresibles que forman una torta de filtración muy porosa sobre el medio filtrante, actuando realmente como medios de filtración. Estos coadyuvantes se utilizan cuando los sólidos son muy finos o generan tortas de filtración compresibles ocasionando la obturación de los medios filtrantes. Algunos coadyuvantes de uso común son la tierra de diatomeas y la perlita (silicato cristalino).

Proceso de filtración y cálculos importantes

Se dice que la filtración puede ser a presión constante, cuando el fluido es bombeado por un gas o aire comprimido que se mantiene a la misma presión, o continua cuando el equipo no debe detenerse para cambiar el medio de filtración.

En la filtración a presión constante, algunos de los factores más importantes a calcular son la resistencia de la torta α y la resistencia del medio filtrante R_m , cuyas ecuaciones (9) y (10) son respectivamente:

$$\alpha = \frac{K_p A^2 g_c (-\Delta P)}{c \mu} \quad (9)$$

$$R_m = \frac{\beta A g_c (-\Delta P)}{\mu} \quad (10)$$

Donde:

- α es la resistencia de la torta en L/kg².
- R_m es la resistencia del medio filtrante en 1/m.
- K_p está dado en s/m⁶.
- β está dado en s/m³.
- A es el área del filtro en m².
- g_c es la gravedad, igual a 9,8067 m*kg/s²*kg_f.
- $(-\Delta P)$ es la caída total de presión de un filtro en kg_f/m²
- μ es la viscosidad en kg/m*s.

- c es la concentración de la papilla de alimentación en kg/L.

Los valores de K_p y β dependen de la caída de presión. Se hallan experimentalmente a través de ensayos en los que se mide el volumen de filtrado en intervalos de tiempo, para luego obtener curvas del $\Delta t/\Delta V$ (cambio del tiempo en relación con el cambio de volumen) contra la velocidad promedio, que una vez analizadas matemáticamente arrojan los valores buscados. Lo anterior teniendo en cuenta que:

$$\frac{dt}{dV} = K_p V_{promedio} + \beta$$

Por otra parte, y para la filtración continua, el factor de mayor relevancia es el área del filtro, y en segunda instancia el tiempo de ciclo y el caudal de papilla de alimentación que debe mantenerse en el proceso.

La ecuación (11) expresa el área de un filtro que opera en continuo de acuerdo a las variables contenidas en ella:

$$A = \frac{V}{t_c \sqrt{\frac{2(-\Delta P)^{1-s} g_c F}{c \alpha_o \mu t_c}}} \quad (11)$$

Donde:

- A es el área del filtro en pie^2 .
- V es el volumen total del filtrado recogido en un tiempo t , en pie^3/s .
- t_c es el tiempo de retención en min.
- $(-\Delta P)$ es la caída total de presión de un filtro en pulgHg (pulgadas de mercurio).
- S es la compresibilidad de la torta, y es un valor que varía entre 0 y 1.
- g_c es la gravedad, igual a $32,2 \text{ pie} \cdot \text{lb}/\text{s}^2 \cdot \text{lb}_f$.
- F es el porcentaje del tambor que está sumergido en la alimentación, y se representa con valores que varían entre 0 y 1.
- c es la concentración de la papilla de alimentación en $\text{lb de sólido}/\text{pie}^3$ de suspensión.
- μ es la viscosidad en $\text{lb}/\text{pie} \cdot \text{s}$.

Equipos de filtración

Normalmente, los equipos de filtración están compuestos de un medio de filtración, un soporte mecánico para este medio, dispositivos para extraer la torta, conductos o canales para introducir la papilla de alimentación y para la salida del filtrado, tanques o depósitos y medios para producir el flujo de filtrado. Según estos medios, los filtros pueden ser de presión o de vacío. Una descripción más profunda de estos se presenta en la Tabla 3.

Tabla 3. Equipos de filtración

Tipo de equipo	Clasificación	Sub-clasificación	Observaciones
Filtros de presión	Filtro prensa	De cámaras De platos y marcos Con lavado Sin lavado Salida del producto abierta Salida del producto cerrada	Ejercen sobre la papilla de alimentación una presión superior a la atmosférica
	Filtro de caja y hoja	Moore Kelly Sweetland	
	Filtro de caja y tubo	-	
	Filtro de arista	-	
	Filtros de presión continuos	Rotativo Horizontal	
Filtros de vacío	Filtro de tambor rotatorio	-	Crean vacío (una succión) en la membrana para favorecer el paso del filtrado. Son de mayor costo, permiten la operación en continuo y no son adecuados para el procesado de materiales volátiles o calientes
	Filtro de disco de vacío rotatorio	-	
Filtración centrífuga	Centrifugas discontinuas suspendidas	-	Aplican fuerzas centrífugas a la papilla de alimentación
	Centrifugas automáticas discontinuas	-	
	Centrifugas continuas	-	

Referencias

ORDOÑEZ, Juan A. et al. Tecnología de los alimentos Volumen I: Componentes de los alimentos y procesos. Madrid: Editorial Síntesis S.A. p. 335-339.

OVIEDO, Juan Camilo et al. Guía de filtración del Laboratorio de Operaciones Unitarias I. Facultad de Ingeniería Agroindustrial, Universidad Pontificia Bolivariana.

ZARTHA SOSSA, Jhon Wilder y PIEDRAHÍTA PALACIO, Juan Carlos. Operaciones y procesos agroalimentarios. Medellín: Universidad Pontificia Bolivariana, 2009. p. 35-53.

8.4.5. Centrifugación

Descripción

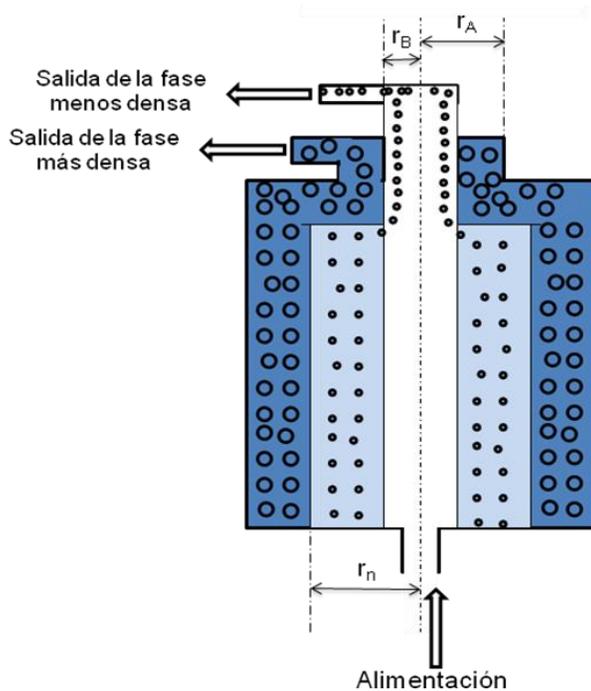
Cuando un material es sometido a rotación se genera una fuerza centrífuga cuya magnitud depende de su masa (por ende, de su densidad) y del radio y la velocidad de rotación. Por esta razón, durante la centrifugación, las partículas se desplazan hacia la pared del vaso por acción de la fuerza centrífuga ya mencionada, siendo las partículas más pesadas las que tienden a quedar más próximas a la pared del recipiente, y las partículas de menor tamaño y peso, las que se quedan en la zona más central del mismo, cerca del eje de rotación (ver Figura 4).

Aplicaciones agroindustriales

Algunas aplicaciones de la operación de centrifugación son:

- Separar la crema de leche o nata en el procesamiento de lácteos
- Separar los precipitados de lactosa y caseína del agua, en la industria láctea
- Obtención de grasas a partir de tejidos animales en la industria cárnica
- Purificación de aceites y lubricantes
- Separación de agua, grasa y aceite en el proceso de refinación

Figura 4. Separación de líquidos inmiscibles por centrifugación (corte lateral de una centrífuga circular)



Fuente: adaptado de FELLOWS, P. Tecnología del procesado de alimentos: principios y práctica. Zaragoza: Editorial Acribia S.A., 2007.

Consideraciones sobre los tipos de centrifugación

Esta operación puede darse en sistemas sólido-líquido, líquido-líquido o gas-líquido. Según estos sistemas, la centrifugación puede dividirse en los siguientes tipos (ver Tabla 4):

Tabla 4. Tipos de centrifugación según el sistema de mezcla

Tipo de centrifugación	Sistemas en los que se aplica	Características
Centrifugación para líquidos inmiscibles	Líquido-líquido	Separación de emulsiones
Clarificación centrífuga	Sólido-líquido	Elimina concentraciones muy pequeñas de sólidos insolubles (máximo 3% p/p)
Separación de lodos	Sólido-líquido	Separación de suspensiones que contienen más de 5-6% p/p
Filtración centrífuga (mencionada en la sección Filtración)	Sólido-líquido Gas-líquido	Separa suspensiones de partículas sólidas relativamente grandes o productos cristalinos que forman tortas

Tipo de centrifugación	Sistemas en los que se aplica	Características
		porosas a través de las cuales pasa el filtrado

Es necesario recalcar que para cada uno de los anteriores tipos existen diferentes consideraciones y desarrollos matemáticos para calcular sus variables. En este módulo se profundizará sobre la centrifugación para líquidos inmiscibles.

Cálculos importantes para la centrifugación de líquidos inmiscibles

Para la centrifugación de líquidos inmiscibles, como las emulsiones, la principal variable a tener en cuenta al momento de diseñar o estudiar este proceso, es la formación de la zona neutra, ya que determina la posición que deberán ocupar los conductos de carga y descarga en la máquina como tal. Esta zona define el límite entre el fluido más denso y el lugar donde comienza a girar el fluido de menor densidad, es decir, la separación entre capas de fluido (que a su vez está dada por la densidad, la diferencia de presión entre los líquidos y la velocidad de rotación). Esta zona se determina mediante la siguiente fórmula (ecuación (12)), en la cual se halla la distancia al eje de rotación en la cual se da la separación (apóyese en la Figura X para comprender las variables de la ecuación).

$$R_i = \sqrt{\frac{\rho_A R_A^2 - \rho_B R_B^2}{\rho_A - \rho_B}} \quad (12)$$

Donde:

- R_i es el radio de la zona neutra en m
- ρ_A es la densidad del fluido más denso en kg/m^3
- R_A es la distancia del centro al fluido más denso en m
- ρ_B es la densidad del fluido menos denso en kg/m^3
- R_B es la distancia del centro al fluido menos denso en m

Otro factor importante en esta operación es el tiempo que debe permanecer la suspensión en la centrífuga para lograr una separación efectiva. Este tiempo puede calcularse con la ecuación (13), así:

$$t = \frac{V}{Q} \quad (13)$$

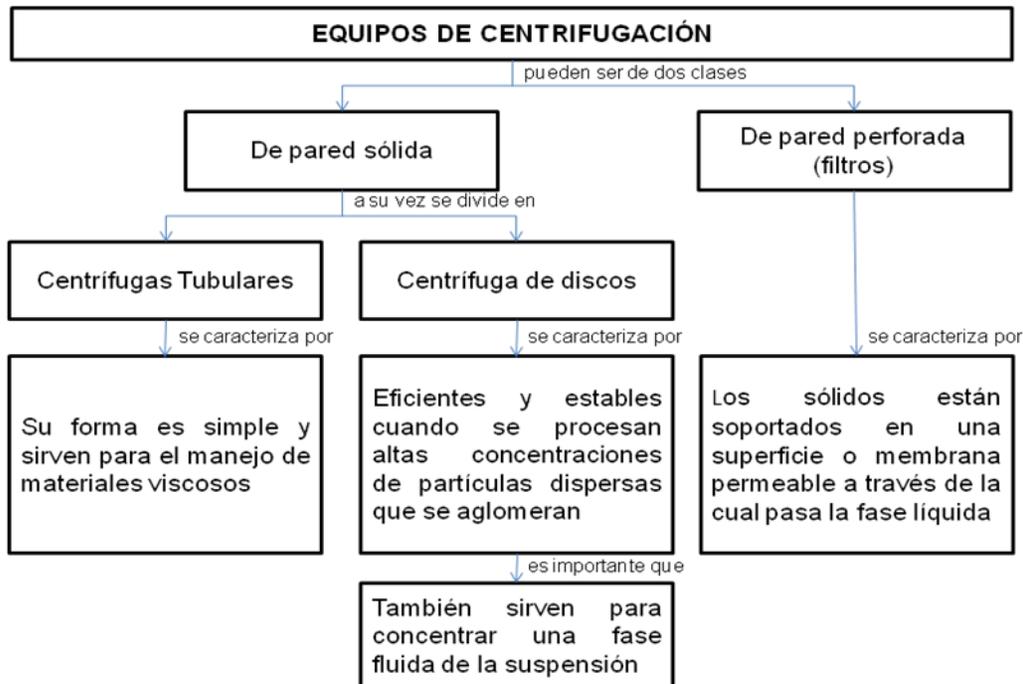
Donde:

- t es el tiempo de permanencia en s
- V es el volumen de líquido en la centrífuga en m³
- Q es la velocidad del flujo volumétrico en m³/s

Equipos para la centrifugación

Los principales tipos de equipos de centrifugación se presentan a continuación en la Figura 5.

Figura 5. Tipos de equipos de centrifugación



Fuente: creación propia.

Referencias

FELLOWS, P. Tecnología del procesado de alimentos: principios y práctica. Zaragoza: Editorial Acribia S.A., 2007. p. 166-168.

GEANKOPLIS, Christie J. Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias. México: CECSA, 1998. p. 925.

ZARTHA SOSSA, Jhon Wilder y PIEDRAHÍTA PALACIO, Juan Carlos. Operaciones y procesos agroalimentarios. Medellín: Universidad Pontificia Bolivariana, 2009. p. 54-59.

8.4.6. Prensado

Descripción

El prensado o estrujamiento consiste en la separación de líquidos que están contenidos en productos sólidos mediante fuerzas de compresión. Esta operación es una alternativa frente a las extracciones sólido-líquido que se realizan con disolventes químicos, pues evita la desnaturalización de los componentes y deja como sub-producto una torta libre de disolventes, de tal forma que puede ser más fácilmente utilizada.

Para aumentar el rendimiento en esta operación, se pueden combinar con la reducción de tamaño de los sólidos o con un ligero calentamiento de los mismos.

Aplicaciones agroindustriales

Algunas aplicaciones de la operación de prensado son:

- Obtención de aceites que se encuentran en estructuras celulares que se deben romper para liberar el compuesto de interés. Es el caso del aceite de oliva y de soja, que al ser extraídos a través de este método son generalmente llamados aceites extra-virgenes, pues no han tenido contacto con ningún tipo de disolvente
- Obtención de zumo de frutas
- Desuerado de la cuajada y moldeado en la elaboración de quesos
- Extracción de jugo de caña de azúcar

Factores que afectan la eficiencia del prensado

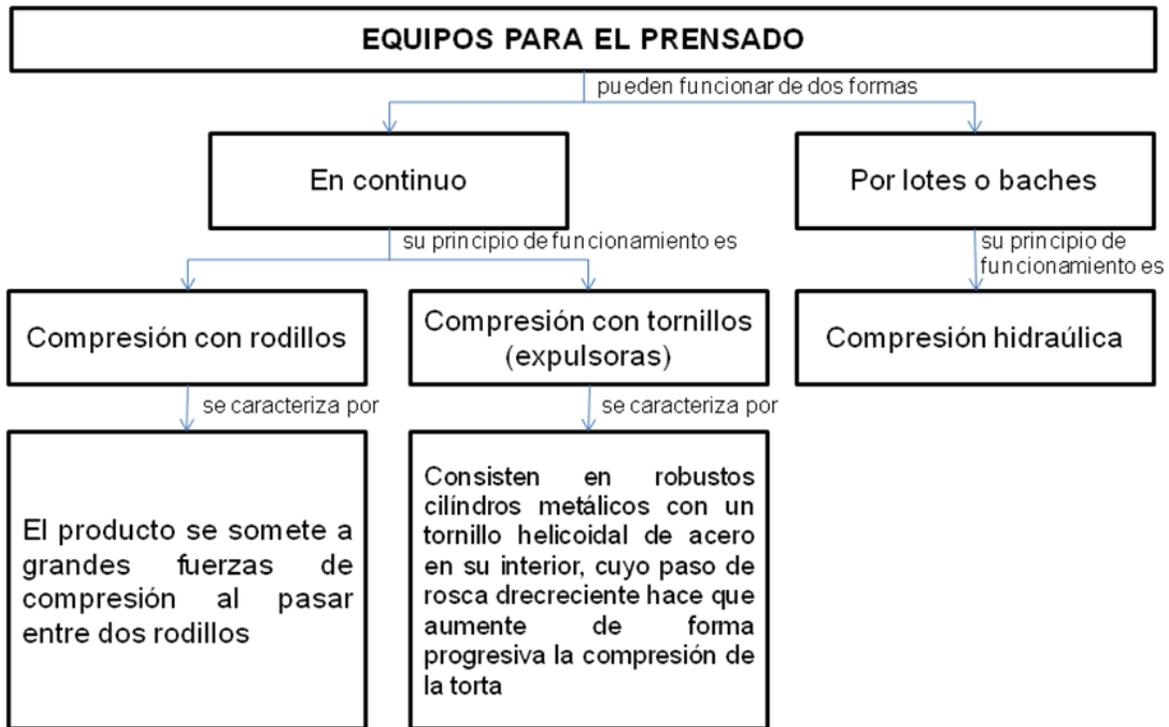
La eficiencia del prensado o estrujamiento depende de:

- La porosidad de la torta formada
- La viscosidad del líquido exprimido
- La fuerza de compresión aplicada

Equipos

Los principales tipos de equipos de prensado se presentan a continuación en la Figura 6.

Figura 6. Equipos para el prensado



Fuente: creación propia.

Referencias

BRENNAN, J.G., et al. Las operaciones en la ingeniería de los alimentos. Editorial Acribia: Zaragoza, 1970. p. 118.

ORDOÑEZ, Juan A. et al. Tecnología de los alimentos Volumen I: Componentes de los alimentos y procesos. Madrid: Editorial Síntesis S.A. p. 339.

8.4.7. Mezcla y agitación

Estas son dos de las operaciones más necesarias y frecuentes en la agroindustria, están presentes en casi todos los procesos de elaboración y al mismo tiempo se encuentran estrechamente ligadas. La agitación se refiere a forzar un fluido por medios mecánicos para que adquiera un movimiento circulatorio en el interior de un recipiente, y puede realizarse sobre un único componente (por ejemplo agua), mientras que la mezcla se refiere a la combinación de dos o más componentes (fases, ya sean sólido-líquido, líquido-líquido o gas-líquido) a través de la agitación, para lograr una distribución uniforme de los mismos.

Las mezclas más homogéneas se consiguen cuando los distintos componentes tienen un tamaño, forma y densidad similares.

Aplicaciones agroindustriales

Algunas aplicaciones de las operaciones de mezcla y agitación, son:

- Preparación de atmósferas modificadas para el envasado o la carbonatación de bebidas refrescantes. En este caso la mezcla se da en sistemas gas-gas o gas-líquido
- Batido de productos lácteos como la mantequilla
- Reconstitución de productos en polvo, como la leche o los refrescos de fruta en polvo
- Mezcla de aceites para la elaboración de margarinas
- Preparación de salmueras y jarabes en la fabricación de conservas y enlatados

Objetivos de la agitación y la mezcla

Existen varios objetivos en la agitación de fluidos. Algunos de ellos son:

- Mezclar líquidos miscibles, tales como alcohol etílico y agua
- Diluir sólidos en líquidos, como azúcar en agua
- Dispersar un gas en un líquido en forma de burbujas pequeñas, como es el caso del oxígeno del aire en una suspensión de microorganismos para la fermentación o para el proceso de activación de lodos en el tratamiento de aguas de desperdicio
- Crear una suspensión de partículas sólidas finas en un líquido
- Aumentar la transferencia de calor entre un fluido y las paredes del recipiente durante un tratamiento térmico

Por otra parte, el propósito de la mezcla varía según el producto, pero en general puede ser:

- Aumentar la uniformidad de un producto, para garantizar la calidad sensorial
- Asegurar que los productos cumplan con la legislación existente y contengan los ingredientes en la cantidad especificada, para mantener las propiedades funcionales del alimento
- Preparar el material en proceso para una sucesiva operación

Consideraciones sobre los deflectores

En los tanques de gran tamaño con agitadores verticales, el método más conveniente de reducir los remolinos cuando se presentan es instalar placas deflectoras, que impiden el flujo rotacional sin afectar al flujo radial y longitudinal. Un método sencillo y eficaz de destruir los remolinos, se

consigue instalando placas verticales perpendiculares a la pared del tanque, conocidos como pantallas, deflectores o baffles. Excepto en tanques muy grandes, son suficientes cuatro placas deflectoras, para evitar los remolinos y la formación de vórtice. La disposición de las placas deflectoras se enseña en la Figura 7.

Consideraciones sobre el mezclado de sólidos

Al contrario de los que ocurre con los líquidos o las pastas viscosas, no es posible alcanzar una uniformidad completa con productos sólidos en polvo o particulados. El grado de mezclado que se alcanza en los sólidos depende de:

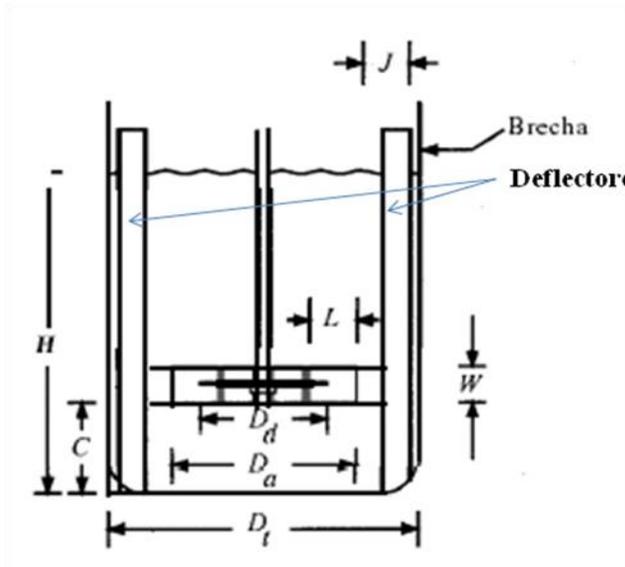
- El tamaño relativo de las partículas y la forma y densidad de cada componente
- El contenido en agua, las propiedades de superficie y las características de flujo de cada componente
- La tendencia de agregación de los productos
- La eficacia de un determinado mezclador para estos componentes

Para determinar los cambios que se producen en la mezcla a lo largo de la operación, se toman muestras de producto en distintos sectores del recipiente en varios momentos y se analiza la presencia de los componentes midiendo los porcentajes de composición. Luego, y mediante cálculo estadísticos puede llegar a encontrarse el tiempo ideal de mezclado y la composición final del producto.

Cálculos importantes en la agitación y mezcla de líquidos

Para el proceso de agitación, es fundamental determinar la potencia requerida por el motor para que la mezcla se realice efectivamente. Dicha potencia dependerá de la naturaleza, la cantidad, la viscosidad y el tipo del alimento; y también de la posición, el tipo, la velocidad y el tamaño del dispositivo impulsor.

Figura 7. Dimensiones de la operación de agitación (corte lateral de un tanque de agitación)



Fuente: adaptado de ZARTHA SOSSA, Jhon Wilder y PIEDRAHÍTA PALACIO, Juan Carlos. Operaciones y procesos agroalimentarios. Medellín: Universidad Pontificia Bolivariana, 2009. p. 61.

Este cálculo se realiza a través de la determinación del número de Reynolds (ecuación (14)) a través del cual se halla en gráficas el número de potencia N_p , que luego se introduce en la fórmula de la potencia (ecuación (15)).

$$N'_{Re} = \frac{D_a^2 N \rho}{\mu} \quad (14)$$

Donde:

- N'_{Re} es el número de Reynolds del fluido bajo las condiciones dadas.
- D_a es el diámetro del agitador (mecanismo de agitación, sea aspa, hélice u otro tipo) en m.
- N es el número de revoluciones por segundo que hace el mecanismo de agitación, en rps.
- ρ es la densidad del fluido en kg/m^3 .
- μ es la viscosidad del fluido en $\text{kg/m}^*\text{s}$.

$$P = N_p \rho N^3 D_a^5 \quad (15)$$

Donde:

- P es la potencia requerida para el sistema de agitación en w (Recuerde que: 1 w equivale a 1 J/s).
- N_p es el número de potencia que se encuentra en los gráficos de correlación de potencia presentados por *Geankoplis* en su libro Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias.
- ρ es la densidad del fluido en kg/m^3 .
- N es el número de revoluciones por segundo que hace el mecanismo de agitación, en rps.
- D_a es el diámetro del agitador (mecanismo de agitación, sea de aspa, de hélice u otro tipo) en m.

Por otro lado, a nivel industrial se hace necesario escalar los procesos, es decir, adaptar las condiciones de una operación que se hace a un volumen pequeño de producto, para que se haga en cantidades mayores de producto y en equipos de mayor tamaño. Para la operación de agitación, la relación de aumento de escala es (ecuación (16)):

$$R = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{1/3} \quad (16)$$

Donde V_2 y V_1 hacen referencia a los volúmenes de capacidad del tanque necesarios para instalar el nuevo y el anterior agitador según su diámetro. Con ayuda del nuevo parámetro R se calculan nuevamente todas las variables del proceso.

Equipos para la mezcla y agitación

La elección del tipo y tamaño de la mezcladora apropiada para un proceso en específico, depende del tipo y cantidad de producto a mezclar y de la velocidad de agitación necesaria para alcanzar el grado de mezclado adecuado, buscando un mínimo de consumo energético. Según sus características de funcionamiento las mezcladoras se clasifican en:

Mezcladoras para productos pulverizados y granulados: los dispositivos más simples, propios para un mezclado poco vigoroso son los tambores giratorios. Sin embargo, no sirven para romper aglomerados. Entre los dispositivos de mezclado giratorio, uno de los tipos más comunes es el mezclador cónico, en el que se montan dos conos unidos por sus extremos abiertos que giran, aunque también pueden emplearse deflectores internos. Si el cono incluye en su interior un dispositivo de rotación, el sistema puede romper aglomerados. Otras geometrías usadas son un cilindro con deflectores internos o el mezclador en V de doble cuerpo. Los mezcladores adaptados para romper aglomerados son cilindros o conos giratorios en los que se cargan también bolas o cilindros de metal o porcelana.

Otro tipo de dispositivos para el mezclado de sólidos es el llamado de coraza estacionaria, donde el recipiente está inmóvil y el desplazamiento del material se logra por medio de dispositivos giratorios internos, simples o múltiples. En un mezclador de bandas, el dispositivo giratorio es un eje con dos tomillos helicoidales abiertos hacia diferentes direcciones. A medida que se hace girar el eje, las porciones de polvo se mueven en direcciones opuestas para que se verifique el mezclado.

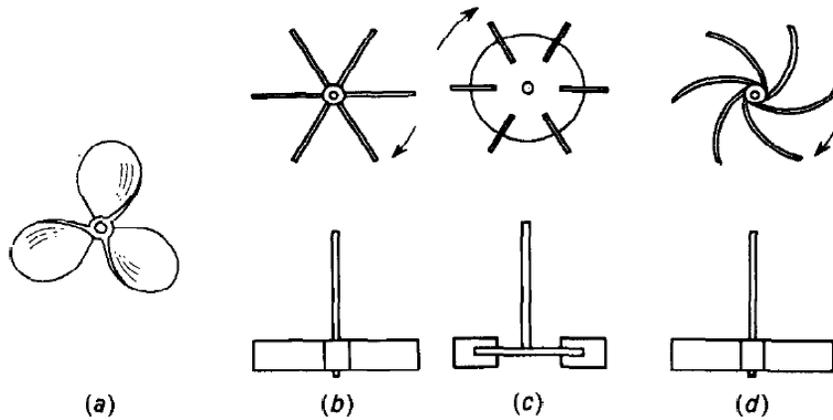
Mezcladoras para líquidos de viscosidad baja o media: la mayor parte de los sistemas de agitación se utilizan para mezclar líquidos en recipientes sin deflectores, pues no se forman remolinos ni turbulencias indeseadas. En la Tabla 5 se presentan las ventajas y desventajas de los diferentes sistemas de agitación (ver Figura 8), que finalmente dependen de las condiciones concretas de utilización.

Tabla 5. Ventajas y desventajas de algunos sistemas de agitación

Tipo de mezclador	Ventajas	Limitantes
Agitadores de hélice	Genera un buen flujo longitudinal, rotacional y radial	Alto costo
Agitadores de turbina	Excelente mezcladora	Alto costo y riesgo de atascos
Agitadores de palas	Económicos, generan buen flujo rotacional y radial	Escaso flujo perpendicular; elevado riesgo de formación de torbellino a velocidades elevadas

Fuente: adaptado de FELLOWS, P. Tecnología del procesado de alimentos: principios y práctica. Zaragoza: Editorial Acribia S.A., 2007. p. 152.

Figura 8. Agitadores o rodetes de mezcla: (a) hélice marina de tres palas; (b) turbina abierta de palas rectas; (c) disco con palas o paletas; (d) turbina abierta de palas curvas.



Fuente: McCABE, Warren L, et al. Operaciones unitarias en ingeniería química. Madrid: McGraw-Hill, 1991. p. 245.

Referencias

FELLOWS, P. Tecnología del procesamiento de alimentos: principios y práctica. Zaragoza: Editorial Acribia S.A., 2007. p. 141-157.

GEANKOPLIS, Christie J. Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias. México: CECSA, 1998. p. 16.

McCABE, Warren L, et al. Operaciones unitarias en ingeniería química. Madrid: McGraw-Hill, 1991. p.245

ORDOÑEZ, Juan A. et al. Tecnología de los alimentos Volumen I: Componentes de los alimentos y procesos. Madrid: Editorial Síntesis S.A. p. 320-323.

ZARTHA SOSSA, Jhon Wilder y PIEDRAHÍTA PALACIO, Juan Carlos. Operaciones y procesos agroalimentarios. Medellín: Universidad Pontificia Bolivariana, 2009. p. 60.

8.4.8. Ejercicios

Ejercicios - Operaciones preliminares		
Establezca las ventajas y desventajas de los métodos de limpieza en húmedo y los métodos de limpieza en seco		
	Métodos de limpieza	
	En seco	En húmedo

Ventajas		
Desventajas		

Realice un paralelo entre las operaciones de selección y clasificación en el que diferencie por lo menos tres características

Ejercicios – Tamizado

- Investiga: ¿cuál es el uso que se da a los sistemas de tamizado en el proceso de trilla del café?, ¿qué clase de arreglos de tamices se utilizan?
- Calcule las relaciones másicas D/F y B/F de un proceso de tamizado del cual se tienen los datos de la siguiente tabla

Tabla. Datos experimentales de un proceso de tamizado

Arreglo de tamices		Fracción acumulativa inferior a D_p		
Malla	D_p (mm)	F	D	B
4	4,699	0	0	-
6	3,327	0,025	0,071	-
8	2,362	0,15	0,43	-
10	1,651	0,47	0,85	0,195
14	1,168	0,73	0,97	0,58
20	0,833	0,885	0,99	0,83
28	0,589	0,94	1,0	0,91
35	0,417	0,96	-	0,94
65	0,208	0,98	-	0,975
Colector	-	1,0	-	1,0

De la tabla anterior se deduce que: $X_F = 0,47$; $X_D = 0,85$ y $X_B = 0,195$. Además, halle el flujo de masa de gruesos y de finos si se tiene una alimentación $F = 2300$ kg/h.

- Calcule el área de un tamiz de malla 20 (obtenga la apertura de la malla en la Tabla 2), que debe procesar 0,15 toneladas/hora de producto. El tamiz es estático, por lo tanto su factor F es de 3

- Halle la capacidad de un tamiz vibratorio de dimensión 60x120 cm y 65 mallas (obtenga la apertura de la malla en la Tabla 2). ¿Cuál es su eficiencia si $X_F = 0,43$; $X_D = 0,90$ y $X_B = 0,1$? Además, encuentre los cambios en la eficiencia luego de 6 meses de uso del tamiz, si las nuevas fracciones másicas son $X_F = 0,43$; $X_D = 0,83$ y $X_B = 0,154$. Concluya sobre el desgaste del tamiz

Ejercicios - Reducción de tamaño

- Con base en la Figura 2, consulte para cuáles procesos se emplean cuatro de los equipos mencionados (un quebrantador, un molino, un molino de ultrafinos y una máquina de corte). Ejemplo: en la trilla de maíz se utilizan molinos de martillos para disminuir el tamaño del grano
- En una empresa minera se requiere triturar 25 Toneladas/h de un mineral de hierro, cuyo E_i es 12,48. El tamaño de la alimentación es tal que el 80% pasa por un tamiz de 3 pulgadas y el del producto debe pasar en un 80% por un tamiz de 1/8 de pulgada. ¿Cuál es la potencia requerida por el equipo?

Ejercicios – Filtración

- Investigue: ¿cuáles son los criterios de selección para elegir un medio filtrante?
- Analice: ¿qué sucede con la resistencia de la torta α y la resistencia del medio filtrante R_m a medida que la viscosidad del filtrado aumenta?, ¿qué implicaciones, positivas o negativas, traería esto para el proceso?
- Un filtro de tambor rotatorio con el 30% de su superficie sumergida se utiliza para filtrar una suspensión acuosa concentrada de un producto en agua que contiene 14,7 lb de sólidos/pie³ de suspensión. La caída de presión del equipo es de 20 pulHg. Calcule el área que ha de tener el filtro para tratar 10 gal/min de suspensión en un tiempo de ciclo de 10 min. Suponga: $S = 0,3$; $\mu = 6,72 \times 10^{-4}$ lb/pie*s; $\alpha_o = 2,08 \times 10^{10}$ pie/lb. Ahora, asumiendo que el área disponible en la planta para instalar el filtro es menor a la obtenida con estas condiciones de operación, ¿qué cambios podrán realizarse en la operación para disminuir dicha área sin afectar las características del producto final? (Tenga en cuenta cómo afecta el volumen de filtrado al área)

Ejercicios – Centrifugación

- Investigue: ¿qué es y cuándo se debe usar la ultra-centrifugación? Enumere algunos ejemplos
- Calcule el radio de la zona neutra cuando el recipiente (vaso) de una centrífuga se utiliza para romper una emulsión de aceite en agua. La densidad de la fase continua es 1000 kg/m^3 y que la densidad del aceite es de 870 kg/m^3 . Los radios de las tuberías de descarga de la centrífuga son de 3 cm y 4,5 cm
- Analice: ¿qué relación de proporcionalidad existe entre el volumen de líquido en la centrífuga y la velocidad del flujo volumétrico?, ¿cómo varía el tiempo de permanencia si se dan cambios en el volumen de líquido en la centrífuga?, ¿cómo varía el tiempo de permanencia si se dan cambios en la velocidad del flujo volumétrico?

Ejercicios – Prensado

Investigue: ¿qué tipo de prensas se emplean en el proceso de elaboración de vino?

Describa una prensa de compresión con tornillos o expulsora. Además, mencione para qué tipo de productos se emplea

Ejercicios - Mezcla y agitación

- Consulte: ¿cómo funciona una mezcladora de cintas? Y ¿para qué tipos de productos se emplea?
- En un tanque con deflectores y un agitador de turbina de paletas planas se somete a agitación un líquido. El diámetro del tanque es de 183cm, mientras que el diámetro del agitador es de 61cm y el ancho es de 1,22cm. La turbina opera a 90 rpm. El líquido tiene una viscosidad de $0,01 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ y una densidad de 929 kg/m^3 . Calcule la potencia necesaria en el equipo si N_p es igual a 4.

8.5. PRUEBA FINAL

- Elabore un mapa conceptual en el que relacione las operaciones unitarias tratadas en la unidad I. Detalle la definición, las variables que intervienen en ella y las aplicaciones de cada una. Sugerencia: tome como guía los mapas conceptuales de la Figura 5 y la Figura 6
- En la empresa Productora de Jugos S.A., ubicada en Tuluá (Valle), las frutas que se convertirán en pulpas congeladas pasan por un proceso estricto de lavado con agua, que de acuerdo al tipo de fruto puede ser:

Lavado por inmersión

Lavado con cepillos

Lavado por aspersion

- ¿Cuál es el objetivo de cada uno de estos tipos de lavado?, ¿cuál es su influencia en el producto final, en este caso la pulpa congelada?
- Se requiere triturar piedra caliza, cuyo E_i es 12,74. El tamaño de la alimentación es tal que el 80% pasa por un tamiz de 2 pulgadas y el del producto debe pasar en un 80% por un tamiz de 1/8 de pulgada. Si se cuenta con un equipo que entrega una potencia de 167,62 kW ¿cuál es la alimentación por hora que puede procesar el molino?
- En la filtración y la centrifugación se logran separar líquidos con distintos fines. Sin embargo, existen entre ellas diferencias en cuanto a los principios de operación y las variables que se controlan, ¿cuáles son esas diferencias?
- Pregunta de selección con única respuesta: cuando se somete a centrifugación una emulsión, el líquido más denso es desplazado hacia:
 - a) El centro de la centrífuga (parte próxima al eje de rotación de la centrífuga)
 - b) La pared del recipiente de centrifugación
 - c) La parte superior del recipiente de centrifugación
 - d) Ninguna de las anteriores
- En una operación de centrifugación de leche, cuál es la distancia del centro al fluido más denso, si el radio neutro de la centrífuga es 0,76 m. La distancia del centro al fluido menos denso es de 0,1 m. La densidad de la fase continua es 1,032 kg/L y la densidad del aceite

es de ≈ 88 kg/L. Los radios de las tuberías de descarga de la centrífuga son de 3 cm y 4,5 cm.

- Cierta sistema de agitación contiene una turbina de aspa plana con un disco y seis aspas. El diámetro del tanque es de 263cm, mientras que el diámetro del agitador es de 87cm y el ancho es de 2,10cm. La turbina opera a 90 rpm. Si el equipo entrega una potencia de 5,7 HP y está diseñado para líquidos con una viscosidad de 0,01 Pa/s y una densidad de 950 kg/m³. ¿Cuál es la densidad del fluido que procesa?. Tenga en cuenta que $N_p=5$

8.5.1. Actividad

- Consulte los diferentes diagramas de los equipos mencionados en este capítulo. Obsérvelos buscando las similitudes y diferencias entre las máquinas empleadas en cada operación
- Consulte en internet algunas empresas que elaboren productos utilizando las operaciones descritas en esta unidad. Observe esos productos y reflexione sobre la importancia de cada una de las operaciones en la industria procesadora de alimentos. Sugerencia: para seleccionar los productos tome como base los mencionados en las aplicaciones agroindustriales de cada tema

9. UNIDAD 2 OPERACIONES UNITARIAS EN ALIMENTOS

9.1. OBJETIVO GENERAL

Describir los fundamentos de las operaciones más relevantes de la industria alimentaria (sedimentación, emulsificación, homogenización, esterilización, pasteurización, escaldado y cristalización), sus principios de funcionamiento y sus aplicaciones específicas.

9.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Describir los tipos de sedimentación y su aplicación en la industria alimentaria
- Explicar la finalidad de las operaciones de emulsificación y homogenización, así como el funcionamiento de los equipos
- Contrastar la utilidad que tienen las operaciones de esterilización, pasteurización y escaldado
- Definir los principios teóricos que definen la cristalización

9.3. PRUEBA INICIAL

Con sus propias palabras defina los siguientes conceptos:

- Solución insaturada
- Solución saturada y punto de saturación
- Solución sobresaturada
- Solubilidad

Defina en sus propias palabras los conceptos de sustancia hidrófila y sustancia hidrófoba.

Consulte: ¿cómo se realiza el cambio de unidades de temperatura de °C a °F, y viceversa?

Practique transformando los siguientes valores: 121°C, 250°F, 65,6°F y 150°F.

9.4. TEMAS

9.4.1. Sedimentación

La sedimentación es la operación unitaria a través de la que se logra separar un sólido presente en un fluido o dos fluidos inmiscibles mediante el aprovechamiento, principalmente, de la fuerza de gravedad. La velocidad de sedimentación depende del tamaño de las partículas o de las gotas del fluido, la diferencia de densidades entre la partícula y el fluido, y la viscosidad del fluido; en este sentido, la separación sólo será posible si las fases tienen densidades diferentes.

Una de las principales características de la sedimentación es el tiempo de operación, que tiende a ser largo, especialmente si la diferencia de densidades entre las fases es pequeña o si existen otras fuerzas que mantengan asociados los componentes.

Aplicaciones agroindustriales

La sedimentación puede utilizarse para la limpieza de materia prima, la separación de sólidos en efluentes y la eliminación de polvo o partículas finas del aire. Algunas aplicaciones de la operación de sedimentación, son:

- En la potabilización de agua y el tratamiento de aguas residuales sirve para clarificar al permitir la decantación de los lodos
- En la producción de azúcar, permite separar las impurezas o lodos, del jugo de caña
- En la extracción de almidones, permite separar el almidón húmedo del lixiviado
- Clarificación de vinos y cerveza
- Recuperación de finos en productos deshidratados por atomización o molidos

Consideraciones sobre los tipos de sedimentación

Las partículas que sedimentan pueden hacerlo de tres formas, que son:

Sedimentación discreta: se caracteriza porque la remoción de las partículas depende solamente de la velocidad de sedimentación, y las propiedades físicas permanecen constantes.

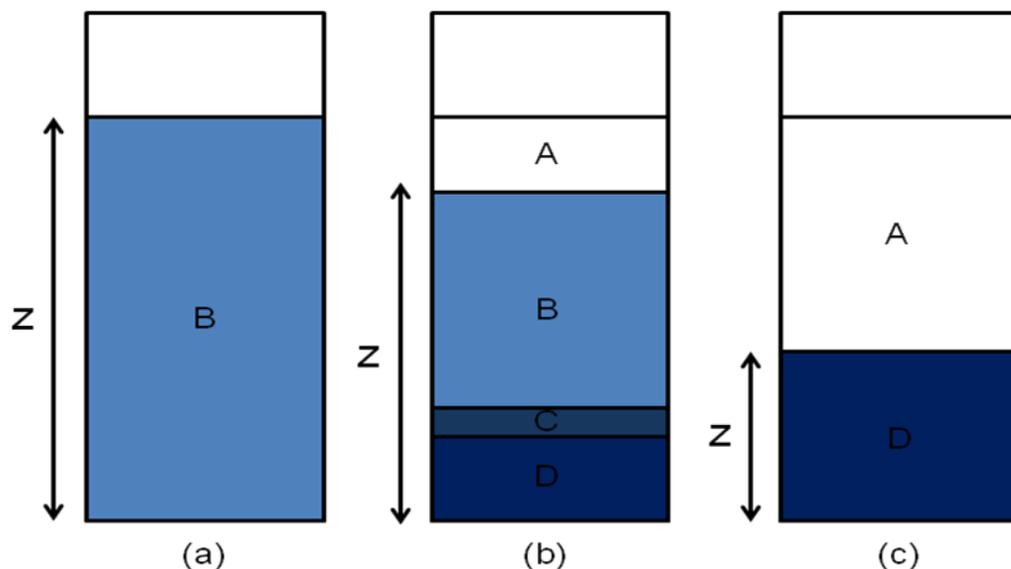
Sedimentación por zonas o intermitente: se presenta cuando la concentración de los sólidos que sedimentan es muy elevada, de modo que se forman diferentes interfases que definen distintas

zonas de sedimentación, donde la remoción de los sólidos es una función tanto de la velocidad de sedimentación, como de la concentración de los sólidos en dicha zona.

En la Figura 9 se representa el proceso de sedimentación por zonas en una probeta. Este proceso se divide en las siguientes etapas: inicialmente el sólido, que se encuentra con una concentración inicial c_0 (Figura 9(a)), comienza a sedimentar (Figura 9(b)), formándose una **interfase 1** entre la superficie de la capa de sólidos que sedimentan y el líquido clarificado que queda en la parte superior (zona **A**). La zona por debajo del líquido clarificado se denomina **zona interfacial** (zona **B**). La concentración de sólidos en esta zona es uniforme, sedimentando toda ella como una misma capa de materia a velocidad constante V_s .

Simultáneamente a la formación de la interfase 1 y de la zona interfacial, se produce una acumulación y compactación de los sólidos en suspensión en el fondo de la probeta, dando lugar a la denominada **zona de compactación** (zona **D**). En esta zona la concentración de sólidos en suspensión es también uniforme y la interfase que bordea esta zona, **interfase 2**, avanza en sentido ascendente en el cilindro con una velocidad constante V .

Figura 9. Posición de las capas de sedimentación en el tiempo



Fuente: creación propia.

Sedimentación floculante: sucede cuando las partículas se aglomeran, ya sea en forma natural o con ayuda de agentes externos (floculantes), cambiando de tamaño, densidad y forma durante la sedimentación. En esta, la remoción de las partículas es una función tanto de la velocidad de sedimentación como del tiempo.

Cálculos importantes en la sedimentación por zonas o intermitente

El principal factor en esta operación es la velocidad de sedimentación (V_s). Este valor se halla experimentalmente luego de tomar múltiples datos de la altura de las interfases (valor z en la Figura 9) en diferentes intervalos de tiempo. Con estos datos, se procede a calcular la nueva concentración buscando llegar a la deseada, teniendo en cuenta que (ecuación (17)):

$$C_i = \frac{C_0 Z_0}{Z_i} \quad (17)$$

Donde:

- C_0 es la concentración inicial en mg/L
- Z_0 es la altura inicial de la sustancia a sedimentar (interfase 1), en cm
- Z_i es la altura final de la interfase 1 (ver Figura X(c)), en cm
- C_i es la concentración final o deseada en mg/L

La velocidad de sedimentación para la primera fracción de tiempo se calcula como se muestra en la expresión (18). Para las siguientes fracciones de tiempo, se utiliza la misma fórmula, pero se toma Z_i como la altura final del instante de tiempo anterior.

$$V_1 = \frac{Z_i - Z_1}{t_1} \quad (18)$$

Donde:

- V_1 es la velocidad de sedimentación (V_s) en el tiempo 1, dada en cm/s
- Z_i es la altura inicial de la interfase 1, en cm
- Z_1 es la altura de la interfase 1 en el tiempo 1, en cm
- t_1 es la primera fracción de tiempo, en s

Después, la velocidad de sedimentación general se calcula a partir de la pendiente de la gráfica de la altura de la interfase 1 (Z) frente al tiempo. Es importante recalcar que en condiciones de caudal constante, la velocidad del clarificado que rebosa por la parte superior del sedimentador, o vertedero, no debe exceder de V_s si se desea evitar el arrastre de las partículas y la clarificación. Por otro lado, el segundo criterio de diseño en esta operación es el área mínima requerida (A_c). Para la precipitación depende de la velocidad (V_s) necesaria para que las partículas en suspensión

se sedimenten antes de alcanzar la concentración crítica interfacial (X_c). Esta área mínima requerida para la clarificación A_c puede calcularse a partir de la ecuación (19):

$$A_c = \frac{Q_e}{V_s} \quad (19)$$

Donde:

- Q_e es el caudal, en m^3/s
- V_s es la velocidad de sedimentación por zonas, en m/s
- A_c el área mínima requerida para la clarificación en m^2

Equipos para sedimentación

Normalmente, un sedimentador consiste en un tanque cuyas dimensiones son adecuadas para permitir la separación de las dos fases, en el cual se controla el flujo de entrada de forma tal que no perturbe la sedimentación de la fase más densa. Aún así, los dispositivos que se utilizan para provocar la sedimentación varían de acuerdo con el producto que se maneja. En general pueden ser:

Desarenador: diseñado para que se sedimenten y retengan sólo partículas mayores de un cierto diámetro nominal y en general de alto peso específico.

Sedimentadores, decantadores, clarificadores o espesadores: normalmente utilizados en plantas de tratamiento de aguas, potables o residuales, así como en el procesamiento de azúcar. Consisten en un tanque circular de una altura definida según el proceso, que termina en forma cónica, y al interior del cual giran paletas o aspas. Estos espesadores pueden ser continuos o discontinuos (operación en baches).

Presas filtrantes: se utilizan para retener los materiales sólidos en corrientes de agua.

Ciclones: se trata de una cámara cilíndrica vertical en la que el aire que contiene las partículas entra por la parte superior y circula en espiral. Sobre las partículas se crean fuerzas centrífugas, que se suman a las gravitatorias, aumentando notablemente la velocidad de sedimentación. El recorrido del aire en el ciclón es lo suficientemente largo para permitir la separación de las partículas presentes en una corriente de aire (o gotas de líquidos en gases).

Referencias

Colaboradores de Wikipedia. Sedimentación [en línea]. Wikipedia, La enciclopedia libre, 2010 [fecha de consulta: 6 de mayo del 2010]. Disponible en <<http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Sedimentaci%C3%B3n&oldid=36794464>>.

ORDOÑEZ, Juan A. et al. Tecnología de los alimentos Volumen I: Componentes de los alimentos y procesos. Madrid: Editorial Síntesis S.A. p. 331-332.

OVIEDO, Juan Camilo et al. Guía de sedimentación intermitente del Laboratorio de Operaciones Unitarias I. Facultad de Ingeniería Agroindustrial, Universidad Pontificia Bolivariana.

ZARTHA SOSSA, Jhon Wilder y PIEDRAHÍTA PALACIO, Juan Carlos. Operaciones y procesos agroalimentarios. Medellín: Universidad Pontificia Bolivariana, 2009. p. 81-92.

9.4.2. Emulsificación

Descripción

La emulsificación es aquella operación en la que dos líquidos normalmente inmiscibles se mezclan íntimamente, uno de los líquidos (la fase discontinua, dispersa o interna) se dispersa en forma de pequeñas gotas o glóbulos en el otro (fase continua, dispersante o externa).

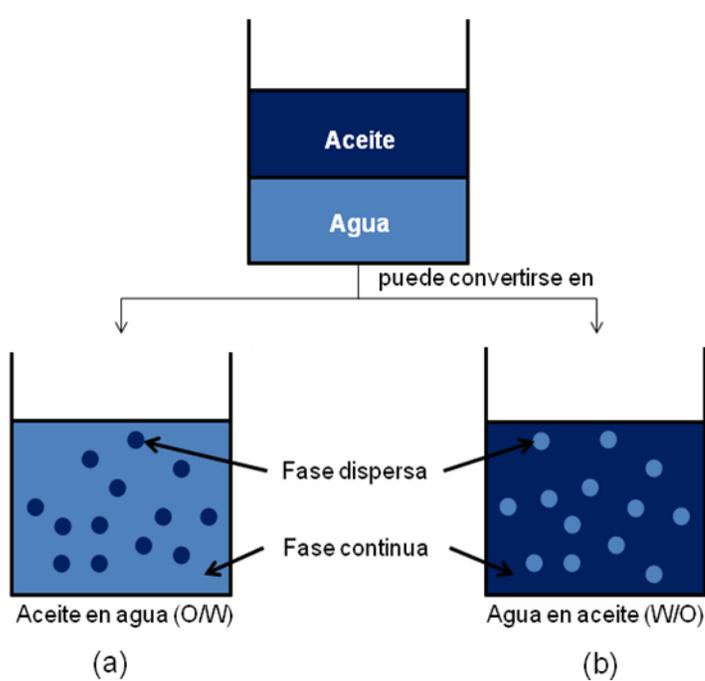
En la mayoría de las emulsiones los dos líquidos utilizados son agua y aceite, aunque rara vez son puros. En general, la fase acuosa pueden ser una solución de sales, de azúcar u otros productos orgánicos o coloidales (sustancias hidrofílicas). La fase de aceite pueden ser aceites, hidrocarburos, ceras, resinas u otras sustancias que se comportan como aceites (sustancias hidrófobas). Para preparar una emulsión estable es necesario añadir una sustancia llamada agente emulsionante.

Cuando se mezclan agua y aceite pueden producirse dos tipos de emulsión (ver Figura 10):

- Emulsión de aceite en agua (O/W), cuando el aceite se convierte en la fase dispersa. Esta puede ser diluida con agua, coloreada con colorantes solubles en agua y presenta la conductividad eléctrica que corresponde a la fase acuosa (ver Figura 10(a))
- Emulsión de agua en aceite (W/O), cuando el agua es la fase dispersa. Sólo puede ser diluida con aceite, teñir con colorantes solubles en aceite y presenta una conductividad eléctrica pequeña (ver Figura 10(b))

Lo anterior, se debe a que la emulsión formada tiene tendencia a exhibir las mayorías de las propiedades del líquido que forma la fase externa.

Figura 10. Tipos de emulsión posibles



Fuente: creación propia.

Aplicaciones agroindustriales

Algunas aplicaciones de la operación de emulsificación son:

- Elaboración de sopas, salsas y aderezos, por ejemplo la mayonesa
- Elaboración de helados y mantequilla en la industria láctea
- Obtención de margarina en la industria de las grasas y aceites
- Se emplean en forma de emulsiones los insecticidas, herbicidas y fungicidas
- Algunas emulsiones son importantes en la industria de las bebidas y los dulces

Consideraciones sobre la tensión superficial y los agentes emulsificantes

Para comprender la importancia que tienen los agentes emulsificantes en el proceso de emulsificación, es necesario entender previamente el concepto de tensión superficial. La tensión superficial es la energía libre que se genera por la desigualdad que existe entre las fuerzas de cohesión de dos líquidos inmiscibles, y que se ubica en la interfase de los dos líquidos. Por esto, en una emulsión la fase interna siempre tiende a formar pequeñas gotas esféricas, gotas que a su vez tienden a coalescer o juntarse formando gotas grandes, y reduciendo así el área interfacial.

Ahora bien, hecha esta claridad, cabe anotar que a mayor tensión interfacial resulta más difícil formar una emulsión, y más inestable tiende a ser esta. Entonces, se hace necesario reducir la tensión interfacial para formar una emulsión estable, objetivo que se logra mediante la adición de un agente emulsionante.

Un agente emulsionante o emulsificante, es una sustancia cuyas moléculas contienen grupos polares y no-polares. Cumple dos funciones en el proceso de emulsificación:

- Como se mencionó anteriormente, reduce la tensión interfacial entre los líquidos a emulsionar
- Protege la emulsión formada previniendo la coalescencia de las gotas de la fase interna, es decir, evita que se junten las gotas del líquido que se separa y queda disperso en la fase externa

Existen numerosas sustancias que son utilizadas como agente emulsionante. Pueden ser naturales como proteínas, fosfolípidos y esteroides; o sintéticas como los ésteres de glicerol propilénico, ésteres sorbitánicos de los ácidos grasos, ésteres celulósicos, carboximetil celulosa, entre otras. Como regla general, los agentes emulsificantes deben ser, en la medida de lo posible: inodoros, incoloros, insípidos, económicamente viables, física y químicamente estables durante el procesamiento, transporte y almacenamiento.

Principios generales de los métodos de emulsificación

Para formar una emulsión hay que hacer trabajo sobre el sistema a fin de superar la resistencia de crear nueva superficie, proveniente de la tensión interfacial. Además de esto se debe suministrar energía para mantener en movimiento y superar la resistencia por fricción. El trabajo sobre el líquido, por norma general, se debe hacer sometándolo a una agitación violenta. La clase de agitación más recomendada es aquella que cizalla las grandes gotas de la fase interna. Por esta acción las gotas se deforman y se rompen en gotas más pequeñas y más finamente dispersas. Si las condiciones son adecuadas la película protectora de agente emulsionante se absorbe en la interfase y se forma una emulsión estable.

El tiempo necesario para que se forme la emulsión varía con la formulación de la misma y la técnica empleada, la cual se determina experimentalmente. Para cada producto existe un tiempo óptimo para lograr formar la emulsión, por debajo del cual se forma solamente una emulsión inestable. Si la agitación continúa por más tiempo de lo requerido la estabilidad de la emulsión puede sufrir, puesto que la película protectora del agente emulsionante, se deteriora por la agitación excesiva; de hecho la agitación es utilizada para romper emulsiones.

Al formular una emulsión se debe tener en cuenta:

- El agente emulsionante utilizado debe favorecer el tipo de emulsión requerido, es decir, o/w o w/o
- La relación de volumen de la fases, pues regula el tipo de emulsión formado
- La temperatura de emulsificación, pues la tensión interfacial y la viscosidad disminuyen al aumentar la temperatura. El límite superior de la temperatura depende de la sensibilidad al calor de los ingredientes. Temperaturas hasta de 70°C se utilizan para los productos lácteos, mientras que muchos productos que contienen yema de huevo sólida, es decir, aderezos para ensaladas y mayonesas, se emulsifican a temperaturas más bajas
- Se deben preparar las dos fases por separado, y en la mayoría de los casos el agente emulsionante se añade a la fase externa. Lo usual, es que al momento de la mezcla, se añada la fase interna gradualmente a la fase externa, mientras ésta es agitada

Equipos

Los equipos que se emplean para elaborar emulsiones son:

- Mezcladoras: los agitadores de baja velocidad, como las mezcladoras de bandeja, mezcladoras de hoja en Z y los tanques rotatorios producen algunas emulsiones, como la mantequilla y la margarina. Sin embargo, las mezcladoras de alta velocidad, por ejemplo las de tipo turbina o hélice son más efectivas, en particular en sistemas de poca viscosidad
- Homogeneizadoras a presión, que se describirán en la sección de Homogenización
- Molinos coloidales: es un equipo que está compuesto por una superficie estacionaria y una superficie rotatoria situadas de forma que queda entre ellas una pequeña separación ajustable a través de la cual se para la mezcla a emulsionar. Al pasar entre la superficie los líquidos son sometidos a cizalla y turbulencia con la consecuente dispersión de la fase interna
- Aparatos de emulsificación ultrasónica: en este tipo de equipos se dispersa un líquido inmisible en otro a través de la utilización de ondas ultrasónicas, es decir, de ondas sonoras con frecuencias superiores a las que puede detectar el oído humano

Referencias

BRENNAN, J.G., et al. Las operaciones en la ingeniería de los alimentos. Editorial Acribia: Zaragoza, 1970. p. 80-89.

ZARTHA SOSSA, Jhon Wilder y PIEDRAHÍTA PALACIO, Juan Carlos. Operaciones y procesos agroalimentarios. Medellín: Universidad Pontificia Bolivariana, 2009. p. 100-109.

9.4.3. Homogenización

Descripción

Esta operación se lleva a cabo principalmente en la industria láctea. Por medio de ella se logra la reducción del tamaño de las partículas de tal forma que las fases, distribuidas no homogénea o irregularmente en un líquido, pasan a estar en un grado de distribución uniforme más elevado.

Además, a través de esta operación también se logra aumentar la superficie total de glóbulos grasos que retrasa notablemente la formación de la nata, brindándole a la leche un sabor agradable, mayor digestibilidad, un color más brillante y atractivo, y una mayor resistencia a la oxidación para evitar olores y sabores desagradables. Sin embargo, pueden presentarse problemas luego de realizar esta operación como el incremento del ataque microbiano, la reducción de la estabilidad ante el calor de las proteínas, y el aumento de la sensibilidad a la luz, que puede desencadenar la aparición de sabores a jabón, rancio u óxido en la leche.

Aplicaciones agroindustriales

Claramente, esta operación está concebida fundamentalmente a contribuir al procesamiento de la leche y los helados. Su efecto sobre este producto se profundiza mejor en el módulo de Procesamiento de Lácteos. Sin embargo, para vislumbrar la importancia que tiene, se destaca que el número de glóbulos de grasa en la leche homogeneizada es 10.000 veces mayor que en la mezcla antes de este tratamiento.

Consideraciones sobre las clases de homogenización

El tipo de homogenización depende de la parte de la leche que se trate, así:

Total: en esta se homogeniza toda la leche.

De la nata: en ella, se homogeniza la nata y luego se vuelve a mezclar con la leche.

En caudal parcial: se mezcla la nata con una parte de la leche desnatada, para luego ser mezclada con el resto de la leche entera.

Procedimiento de homogenización

La leche homogeneizada se consigue con el cabezal de homogeneización de los equipos, en este, y por medio de alta presión, se hace pasar la leche a través de pequeñas ranuras lo que produce la rotura de los glóbulos. El efecto final de homogeneización es el resultado de la conjunción de tres factores:

- Paso por una estrecha ranura a una alta velocidad, lo que somete a los glóbulos de grasa a poderosas fuerzas de rozamiento que los deforman y rompen
- La aceleración que sufre el líquido a su paso por esa estrecha franja va acompañada de una caída de presión lo que crea un fenómeno de cavitación en el que los glóbulos de grasa se ven sometidos a poderosas fuerzas de implosión
- Al chocar los glóbulos de grasa contra las paredes del cabezal de homogeneización, en el impacto, se rompen y dividen
- El efecto de homogeneización puede reforzarse a base de colocar dos cabezales, de modo que el producto pasa primero por uno de ellos sufriendo una primera homogeneización, y luego el otro que toma el producto y lo vuelve a someter a una segunda

Equipos

Los equipos que se utilizan para la homogeneización de la leche son:

Homogeneizadoras a presión: están compuesta esencialmente por una válvula de homogeneización y una bomba de alta presión. La válvula proporciona la abertura ajustable del orden de varias milésimas de centímetro a través de la cual se bombea la emulsión a presiones hasta de 700 kg/cm³. Al entrar en la ranura los líquidos experimentan una gran aceleración, se han reconocido velocidades de 300 m/s, con lo que las gotas de la fase interna se cizallan unas con otras, deformándose y rompiéndose. En muchas válvulas, a medida que el líquido sale de la ranura choca contra una superficie dura y perpendicular a la dirección del flujo, lo que produce más ruptura de las gotas inestables de la fase interna. Es posible que favorezca la reducción del tamaño de la gota la disminución súbita de la presión del líquido al salir de la ranura y el colapso de las gotas por ahogamiento.

Clarificadores: funcionan como unas centrífugas, que por la velocidad de giro que se le proporciona a la leche junto con un disco que gira en sentido contrario rompe las partículas de grasa de la leche produciendo una homogeneización.

Bombas Centrífugas: poseen el funcionamiento de los clarificadores, pero usualmente no resultan tan eficientes.

Equipos de ultrasonido: por medio de frecuencias ultrasónicas de 20-30 kHz se crea una vibración que hace que las partículas de grasa se destruyan homogeneizándose (mencionado en la sección de emulsificación).

Referencias

ZARTHA SOSSA, Jhon Wilder y PIEDRAHÍTA PALACIO, Juan Carlos. Operaciones y procesos agroalimentarios. Medellín: Universidad Pontificia Bolivariana, 2009. p. 96-99.

9.4.4. Esterilización

Descripción

La esterilización por calor es la operación unitaria en la cual los alimentos son calentados a una temperatura elevada y durante un tiempo lo suficientemente largo como para destruir la actividad microbiana, especialmente la de las esporas más termorresistentes, y en menor medida la actividad enzimática en los mismos. Los alimentos sometidos a este tratamiento poseen una vida útil superior a la de los productos sometidos a otros tipos de conservación.

Adicionalmente, y debido a que el calor puede afectar los componentes nutritivos y las características organolépticas, la operación debe diseñarse de forma tal que se reduzca al máximo el tiempo y la temperatura de tratamiento pero se mantenga la termo-destrucción de los microorganismos en los niveles deseados o exigidos por la legislación.

Aplicaciones agroindustriales

Algunas aplicaciones de la operación de esterilización son:

- Elaboración de alimentos enlatados y conservas
- Preparación de jugos y bebidas

Métodos de esterilización

Los métodos de esterilización se dividen en la esterilización de productos ya envasados o discontinuos, y la esterilización de los alimentos fuera de los envases. La esterilización de los alimentos en los envases se puede efectuar: por calefacción indirecta con vapor de agua saturado, con aire caliente en condiciones de circulación forzada o por contacto directo con la llama (en materiales que así lo permitan). De estas técnicas, la más utilizada es la calefacción con vapor de agua saturado. La esterilización tradicional se realiza a 121,1°C y 15 Psig de presión durante 15 minutos.

Ahora, la esterilización de los alimentos fuera de los envases aprovecha el hecho de que se pueden utilizar intercambiadores de calor de gran velocidad para el tratamiento a temperatura elevada de los alimentos (hasta 150°C). Se consigue con ello, una reducción substancial del tiempo de procesamiento y la consecuente mejora general de la calidad de los productos. Los procesos que utilizan la esterilización rápida a estas temperaturas elevadas se conocen por procesos alto-corto y no se deben confundir con los procesos H.T.S.T. utilizados para la pasteurización de la leche.

Factores que influyen en el tiempo de proceso

Como se mencionó, la esterilización puede llevarse a cabo el alimento envasado y en el alimento sin envasar. No obstante, los factores que influyen en el tiempo de proceso son:

- La termorresistencia de los microorganismos y enzimas eventualmente presentes
- Los parámetros de calentamiento, como la temperatura inicial del alimento y la temperatura de la autoclave
- El pH. Lo anterior teniendo en cuenta que el valor del pH óptimo para el crecimiento microbiano se encuentra entre 6,5 a 7,0. El efecto inhibitor de la acidez se evidencia cuando el pH es de 5,3, los microorganismos más tóxicos se inhiben a pH 4,5; y por debajo de un pH de 3,7 pueden proliferar organismos como los hongos y levaduras, que pueden alterar el producto pero son inocuos para el consumidor
- El estado físico (sólido, líquido, etc.) y la consistencia del alimento
- Composición del líquido de llenado o líquido de gobierno (soluciones salinas o azucaradas)
- La forma, el tamaño y el material del envase, si se trata de esterilización de alimentos envasados
- La velocidad de penetración del calor. Esta se mide colocando un termopar en el centro térmico del envase (punto más frío) y registrando la temperatura a lo largo del proceso. Se asume que el resto de los puntos del envase reciben más calor y que, por lo tanto, el proceso es suficiente
- La agitación del producto a esterilizar

Consideraciones sobre los microorganismos

De entre los microorganismos patógenos esporulados eventualmente presentes en los alimentos de baja acidez (pH<4,5) el *Clostridium botulinum* es el más peligroso, pues produce una exotoxina potente. El *Cl. botulinum* se encuentra en el suelo, y por lo tanto es probable encontrarlo en cualquier materia prima que haya tenido contacto con este. Debido a su extremo peligro, los procesos de esterilización se diseñan para que, como mínimo, sean capaces de lograr su destrucción, pero por lo general el tratamiento contra esta bacteria logra afectar también a los demás microorganismos presentes en el alimento, pues si se ataca al más resistente en consecuencia se eliminan todos los demás.

Ahora bien, la termo-destrucción de los microorganismos sigue un curso logarítmico y por ende, la esterilidad absoluta es imposible de alcanzar, aunque el tiempo del tratamiento se prolongue al infinito. Sin embargo, a partir de su termorresistencia y de la temperatura y tiempo de tratamiento, sí puede calcularse la probabilidad de supervivencia de un único microorganismo en un envase. Esto nos conduce al término de esterilidad comercial, que es el riesgo de alteración que el productor está dispuesto a asumir. La esterilidad comercial implica en la práctica, que el tratamiento térmico inactiva a todos los microorganismos y formas esporuladas, los cuales si se encontraran presentes, serían capaces de crecer en el alimento bajo ciertas condiciones de almacenamiento. Algunos valores de termorresistencia se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6. Termorresistencia de algunas de las bacterias esporuladas

Clase de microorganismo	Microorganismos	Valor z	Valor D_{121} (min)	Alimentos típicos
Termófilos (35 a 55°C)	<i>Bacillus stearothermophilus</i>	9-10	3,0-4,0	Verduras, leche
	<i>Clostridium thermosaccharolyticum</i>	7,2-10	3,0-4,0	Verduras
Mesófilos (10 a 40°C)	<i>Clostridium sporogenes</i>	8,8-11,1	0,7-1,5	Carnes
	<i>Bacillus subtilis</i>	4,1-7,2	0,3-0,76	Productos lácteos
	<i>C. botulinum</i> toxinas A y B	5,5	0,1-0,3	Alimentos de baja acidez
	<i>B. coagulans</i>	6-9	0,01-0,07	Leche
	<i>B. cereus</i>	36	3,8	Leche
Psicrófilos (-5 a -1,5°C)	<i>C. botulinum</i> toxina E	10	3,0 (60°C)	Leche

Fuente: adaptado de FELLOWS, P. Tecnología del procesado de alimentos: principios y práctica. Zaragoza: Editorial Acribia S.A., 2007. p. 301.

Cálculos importantes

Los factores que influyen en la resistencia al calor de los microorganismos o de las enzimas y su caracterización se describen mediante los parámetros D , z y F .

D: es el tiempo de reducción decimal: tiempo durante el cual el número original de microorganismos viables presente en el alimento se reduce en una décima parte. Por defecto, este factor se toma a una temperatura de trabajo de 121,1°C o 250°F. La relación que lo define es la expresión (20).

$$\frac{N}{N_0} = \frac{1}{10} = e^{-KD} \quad (20)$$

Donde:

- N es el número de microorganismos que quedan después del tratamiento
- N_0 es el número inicial de microorganismos
- K es la constante de velocidad de crecimiento del microorganismo

z: es el rango de temperatura con la cual se aumenta la tasa de muerte en un factor de 10.

F: es el tiempo en minutos a 121,1°C (250°F) que produciría el mismo grado de esterilización que el proceso dado a una temperatura T. Este valor permite comparar la eficacia de distintos procesos de esterilización o de tiempo de muerte térmica (TDT), pues representa la combinación de tiempo/temperatura recibida por el alimento. Se calcula según la expresión (21).

$$F = D(\log n_1 - \log n_2) \quad (21)$$

F₀: es un valor F de referencia, que corresponde a una temperatura de tratamiento de 121,1°C para un microorganismo con un valor z de 10°C. Se calcula según la expresión (22), o con la expresión (23) cuando se manejan los datos en °C, o con la expresión (24) cuando se manejan los datos en °F.

$$F_0 = D_{250} \log \frac{N_0}{N} \quad (22)$$

$$F_0 = t 10^{((t_c - 121,1)/z_c)} \quad (23)$$

$$F_0 = t 10^{((t_F - 250)/z_F)} \quad (24)$$

Algunos valores típicos de F₀ son:

- Verduras en salmuera: 3-6 min
- Sopas: 4-5 min

- Carnes en salsa: 12-15 min

Equipos

Los equipos utilizados en la esterilización pueden ser de operación continua o discontinua (por lotes o baches), que a su vez están divididos en unidades con agitación o sin agitación. A continuación se presentan algunos ejemplos de ellos:

De operación discontinua se tienen:

Autoclave estática de carga vertical u horizontal (sin agitación): se emplea cuando es necesario esterilizar a temperatura superior a los 100°C. Se debe trabajar bajo presión en recipientes cerrados. Esta autoclave de gran tamaño, que trabaja por lotes, es en la actualidad muy importante para la pequeña y mediana industria, debido a su versatilidad y a su costo razonable. Sin embargo, el consumo de energía puede ser mayor que en equipos más modernos.

Rotomat (con agitación): se caracteriza porque la agitación se efectúa por volcamiento de los recipientes colocados sobre un eje perpendicular. Respecto a la base, la turbulencia interna es mejor cuanto mayor sea el espacio libre (cercano al 6% para latas grandes); este sistema de rotación es ideal para los productos en los cuales un sólido va sumergido en un líquido de llenado, por ejemplo arvejas, tomates pelados, frutas, comidas listas, y también para alimentos líquidos. La ventaja de este equipo es que se pueden esterilizar recipientes de todos los tamaños e incluso de grandes dimensiones. La desventaja es que el volumen de agua consumido es alto porque se utiliza para el calentamiento y enfriamiento del autoclave.

De operación continua se tienen:

Esterilizador hidrostático (sin agitación): en este equipo el agente calefactor es el vapor, el cual alcanza unos 130°C y una presión de 1.5 kg/cm². La presión localizada en la cámara de esterilización se mantiene gracias a dos columnas de agua de las cuales una sirve de precalentamiento y la otra de pre-enfriamiento.

Esterilizador hidropático (sin agitación): la temperatura de esterilización está entre 121°C y 128°C, y el enfriamiento de los recipientes se efectúa en dos columnas; primero bajo presión y luego por aspersión. Después del enfriamiento, el producto se seca con aire caliente para impedir la recontaminación. La ventaja principal es que el consumo de vapor es bajo, lo que lo convierte en uno de los equipos más empleados. La desventaja es que si se van a esterilizar los recipientes de distinto tamaño o de distintas clases de productos, todos deben recibir el mismo tratamiento.

Otros equipos de operación continua sin agitación son: el hidroflext, el carvallo hidroneumático y el hidroflow estático.

Esterilmatic (con agitación): está constituido por un cilindro que contiene en su interior un tambor con eje central en la superficie; posee ejes paralelos que sirven de apoyo a los recipientes de manera que estos avanzan en forma de espiral. Como trabaja sobre presión, el equipo posee válvulas espacialmente diseñadas. La penetración del calor es muy rápida debido a la agitación del recipiente, y consta de tres fases de acuerdo con su posición en el tambor: parte de rotación libre, parte de rodamiento y finalmente rotación fija.

Referencias

BRENNAN, J.G., et al. Las operaciones en la ingeniería de los alimentos. Editorial Acribia: Zaragoza, 1970. p. 199-205.

FELLOWS, P. Tecnología del procesado de alimentos: principios y práctica. Zaragoza: Editorial Acribia S.A., 2007. p. 299-313.

ORDOÑEZ, Juan A. et al. Tecnología de los alimentos Volumen I: Componentes de los alimentos y procesos. Madrid: Editorial Síntesis S.A. p. 147-151.

9.4.5. Pasteurización

Descripción

La pasteurización es un tratamiento térmico relativamente suave en el que el alimento, generalmente líquido o semi-líquido, se calienta a temperaturas inferiores a 100°C. El objetivo de la pasteurización es destruir los gérmenes patógenos y una gran porción de la flora microbiana total, conservando en forma óptima la estructura, composición y características sensoriales de los productos alimenticios.

Los principales factores que se deben tener en cuenta en la pasteurización son la temperatura y tiempo de duración del tratamiento, ya que estos deben permitir la destrucción de los microorganismos manteniendo el mayor número de características del alimento. Además, es importante que la calidad higiénica inicial del alimento sea buena, pues la pasteurización no puede transformar un producto de baja calidad en otro de calidad superior. Los productos pasteurizados poseen una flora termófila que es capaz de desarrollarse entre 30°C y 60°C y aún puede multiplicarse a temperatura ambiente, así que para detener su crecimiento es necesario almacenarlos entre 3°C y 4°C, es decir, en refrigeración.

Aplicaciones agroindustriales

Algunos de los procesos de elaboración en los que interviene la operación de pasteurización son:

- Bebidas en botella: agua, zumo de fruta y verduras, vino y cerveza
- Productos lácteos: leche, mantequilla, helado
- Huevo líquido y otros ovoproductos
- Miel de abejas
- Salsas y aderezos

Tipos de pasteurización según la temperatura y duración del tratamiento

Los tipos de pasteurización según la temperatura y duración del tratamiento se dividen en: pasteurización VAT o lenta, pasteurización a altas temperaturas durante un breve período de tiempo (HTST: High Temperature/Short Time) y el proceso a ultra-altas temperaturas (UHT: Ultra-High Temperature). Estos tipos de pasteurización se describen en la Tabla 7.

Tabla 7. Tipos de pasteurización

Proceso	Temperatura/Tiempo	Sistema de producción	Observaciones
VAT	63 - 65°C/30 min	Por lotes o baches	Este proceso se utiliza para manejar grandes volúmenes de producto. Debe pasar mucho tiempo para continuar con el proceso de envasado del producto, a veces más de 24 horas
HTST	72°C/15 s	Por lotes o baches Continuo	Necesita poco equipamiento industrial, pero requiere controles estrictos durante todo el proceso de producción
UHT	138°C/2 s	Continuo	Produce una mínima degradación del alimento
Por microondas	Esta tecnología está siendo apenas estudiada		Adecuado para los alimentos líquidos ligeramente ácidos, tal como los zumos de frutas y de verduras

Parámetros y cálculos importantes

Para calcular los parámetros más relevantes de la pasterización se utilizan los mismos procedimientos matemáticos que para los procesos de esterilización ya mencionados. Los tiempos que se necesitan son mucho menores y las temperaturas de pasterización son mucho más bajas que en la esterilización. Generalmente, el valor F_0 se da a 65.6 °C (150°F) o a una temperatura similar en lugar de los 121,1°C (250 °F) de la esterilización. Además, se emplea el concepto de valor z, según el cual un aumento de temperatura de z (°C ó °F) aumenta la tasa de muerte en un factor de 10. Un valor F_0 escrito como F_{150}^9 significa un valor F a 150 °F con un valor z de 9 °F (ecuación (25)).

$$F_{T_1}^z = t * 10^{(T-T_1)/z} \quad (25)$$

Donde:

- $F_{T_1}^z$ es el tiempo en minutos a la temperatura y el valor z estándar que produciría el mismo grado de pasterización que el proceso dado a una temperatura T.
- t es el tiempo de operación, en min.
- T es la temperatura de proceso real, en °C ó °F.
- T1 es la temperatura estándar de proceso, en °C ó °F.
- z es la temperatura con la cual se aumenta la tasa de muerte en un factor de 10, en °C ó °F.

Unidades de pasterización (UP)

Debido a que la determinación de la inactivación es un procedimiento algo dispendioso, en algunas aplicaciones industriales se ha optado por considerar la cantidad de calor necesario para pasterizar un producto. Es así como se habla de un número mínimo de unidades de pasterización que deben suministrarse a un producto con el fin de reducir en un 90% la carga microbiológica. Una unidad de pasterización (UP) corresponde al calentamiento durante un minuto, a 60°C. En la Tabla 8 se presentan algunos valores de UP para bebidas.

Tabla 8. Unidades de pasterización que se aplican a bebidas

Producto	UP a aplicar	
	Mínimo	Máximo
Cerveza tipo Pilsen	15	25

Limonada	300	500
Jugo de frutas	3000	5000

Fuente: ZARTHA SOSSA, Jhon Wilder y PIEDRAHÍTA PALACIO, Juan Carlos. Operaciones y procesos agroalimentarios. Universidad Pontificia Bolivariana: Medellín, 2009. p. 141.

Equipos de pasteurización

En la Tabla 9 se presentan algunos equipos de pasterización.

Tabla 9. Equipos de pasterización

Equipo	Características	Alimentos que procesa
Pasteurizador de tanque o marmita	Es un tanque especial con camisa de calentamiento provisto de un agitador para facilitar el intercambio de calor. Estos equipos son discontinuos adecuados para cargas de baja y media capacidad (aproximadamente entre 50 y 1500L). Cuando se trabaja con volúmenes grandes se genera un choque térmico para hacer continua la operación. Es un equipo sencillo de operar y fácil de limpiar, pero ocupa gran espacio, la operación es lenta y se da la destrucción de vitaminas por exposición al aire.	Líquidos (leche)
Pasteurizador de tanque de agua caliente	Consta de un tanque de agua caliente en el cual se sumergen los en recipientes llenos y cerrados durante un tiempo determinado de acuerdo con el tamaño del envase y con las características del alimento, a una temperatura entre 70°C y 85°C	Alimentos previamente envasados
Pasteurizadores de ducha	Están constituidos por un transportador de cinta o de soportes colocados en un riel con el fin de mantener los envases en posición vertical a través de duchas con incremento de temperatura regulada para evitar el choque térmico. Las temperaturas y los tiempos más recomendados son: alcanzar 70°C en 15 minutos mantener ésta temperatura 15 minutos y enfriar a 40°C en 15 minutos.	Únicamente empleado en las cervecerías
Pasteurizadores tubulares	Es un conjunto de tubos, con los extremos comunicados por medio de conexiones de codos; el	Líquidos

Equipo	Características	Alimentos que procesa
	<p>producto circula a través de ellos donde es calentado por una o dos superficies de agua caliente que fluyen en contracorriente. La transmisión de calor es rápida y homogénea debido al espesor pequeño de la capa del producto. Las ventajas más representativas son la ausencia de oxígeno, debido a la rapidez de la transmisión del calor, y que el medio calefactor puede utilizarse a temperaturas ligeramente mayores a las del tratamiento térmico, dando un uso eficiente de la energía térmica. La limpieza es una operación complicada debido a que el equipo debe desarmarse totalmente.</p>	
<p>Pasteurizador de placas</p>	<p>Son una serie de placas onduladas dispuestas en forma vertical o, en ciertos casos, horizontal, unidas entre sí, mediante aros de caucho. La separación entre placas es de 3 mm a 4 mm por donde circula el alimento, mientras que el fluido calefactor recorre a contracorriente las otras caras de la placa estableciéndose el gradiente de transferencia de calor. Las placas se agrupan en secciones de precalentamiento, calentamiento y enfriamiento. Cada sección aislada se ordena de tal forma, que los líquidos fluyen por una o más placas en paralelo. Las placas contienen estrías o nervaduras que provocan turbulencia; de esta manera, hacen más homogénea la transferencia de calor y aumentan la superficie.</p>	<p>Líquidos</p>

Referencias

- Colaboradores de Wikipedia. Pasteurización [en línea]. Wikipedia, La enciclopedia libre, 2010. Disponible en: <http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Pasteurizaci%C3%B3n&oldid=37576396>.
- GEANKOPLIS, Christie J. Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias. México: CECSA, 1998. p. 641-642, 649.
- ZARTHA SOSSA, Jhon Wilder y PIEDRAHÍTA PALACIO, Juan Carlos. Operaciones y procesos agroalimentarios. Universidad Pontificia Bolivariana: Medellín, 2009. p. 127-142.

9.4.6. Escaldado

Descripción

La principal función del escaldado es destruir la actividad enzimática de vegetales antes de que sean sometidas al procesamiento, como envasado, deshidratación o congelamiento. El escaldado en sí no constituye un método de conservación, sino un pre-tratamiento para acondicionar para la materia prima o como preparación para otras operaciones de conservación. La adecuada inactivación de las enzimas se da en tres pasos, comenzando con el calentamiento rápido hasta una temperatura determinada, seguido del mantenimiento de esta por un tiempo establecido, y terminando con un enfriamiento rápido hasta la temperatura ambiente.

El tiempo de exposición es generalmente de unos pocos minutos (de 1 a 5) y las temperaturas van desde los 85 a 100°C, sin embargo los factores que determinan estas variables para un producto específico son:

- El tipo de fruta o verdura y su estado de madurez
- El tamaño y la forma de la fruta o verdura, ya sea que se someta al escaldado entera o partida
- La temperatura de escaldado
- El sistema de calentamiento, ya sea por medio de atmósferas de vapor saturado o por inmersión en baños de agua caliente

Las ventajas y desventajas del proceso de escaldado se presentan en la Tabla 10.

Tabla 10. Ventajas y desventajas del escaldado

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> ● En general, reduce la contaminación inicial. ● Además de inactivar enzimas, contribuye a la destrucción de algunos microorganismos. ● Ablanda el producto. ● Expulsa el aire atrapado intermolecularmente en el alimento, eliminando del gas ocluido en los tejidos. Esto evita que se presente una sobre-presión interna al momento de envasar, disminuyendo el riesgo de explosión del envase. ● Fija el color del alimento. ● Remueve sabores y aromas indeseables. 	<ul style="list-style-type: none"> ● Solubiliza nutrientes hidrosolubles. ● No se puede trabajar en forma continua.

Aplicaciones agroindustriales

La operación de escaldado se emplea para tratar frutas, verduras y granos, que continúan en operaciones sub-siguientes como el pelado, la congelación, la deshidratación o el envasado. Es común su uso en aquellas frutas y verduras que presentan pardeamiento enzimático (oscurecimiento), es el caso de la manzana y la pera, y en diferentes clases de guisantes.

Relación del escaldado con otras operaciones de preparación y conservación

A continuación se enuncian algunos ejemplos de la influencia que tiene el escaldado en el procesamiento de los alimentos.

- En la esterilización por calor, el tiempo y temperatura de operación dependerán del grado de reducción alcanzado por el escaldado en la tasa de contaminación
- Las temperaturas máximas utilizadas en los procesos de congelación y deshidratación resultan insuficientes para la inactivación de enzimas y para la reducción de los microorganismos, así que el escaldado de las frutas y verduras es casi obligatorio antes someterse a la conservación por los métodos mencionados. Si el alimento no se escalda, es susceptible de sufrir cambios durante el almacenamiento
- El ablandamiento de las frutas y verduras facilita la operación de envasado y de pelado

Consideraciones sobre las enzimas y la medición de la efectividad del escaldado

Como el fin principal del escaldado es controlar la actividad enzimática, se hace importante elegir una enzima para monitorear su velocidad y la inactivación de la misma, pues así se conoce tiempo en el que se destruye efectivamente esa enzima en el proceso de escaldado. Esto ha llevado a una controversia acerca de la enzima indicadora que se debe considerar, ya que no hay enzima clave responsable de todos los cambios de calidad posibles durante el almacenamiento de los productos.

Inicialmente, se estableció la catalasa como enzima indicadora para granos, mientras que la peroxidasa se utilizó para los demás vegetales. Esta última se ha utilizado y modelado, debido a su alta estabilidad al calor, a que está presente en la mayor parte de las frutas y vegetales y a que es fácil de medir. Adicionalmente, la ausencia de actividad peroxidasa indica que otras enzimas menos termorresistentes han sido destruidas. En las pruebas de catalasa y peroxidasa se deben mostrar valores de actividad enzimática residual entre 1% y 10% para concluir que el proceso fue adecuado y suficiente. Lo anterior, teniendo en cuenta que un escaldado insuficiente puede llegar a acelerar las reacciones enzimáticas, acelerando el proceso de degradación del alimento.

Equipos para el escaldado

Los dos métodos de escaldado más usados son, o bien mantener durante un tiempo el alimento en un atmósfera de vapor saturado, o bien sumergirlo en un baño de agua caliente. Algunos equipos empleados en la industria son:

Escaldadores a vapor continuo (cámara de vapor): se basan en el principio de un sistema de arrastre (cinta transportadora) que lleva al producto distribuido en capa fina por un túnel dentro del cual se inyecta vapor. Tiene la que puede trabajar en forma continua, no presenta problemas de contaminación y hay menos pérdidas nutricionales, pero su costo es muy elevado.

Escaldadores de rueda perforada sumergida parcialmente en un tanque de agua hirviendo.

Cilindros giratorios con aberturas de entrada y salida apropiada.

Tornillo sin fin, que consiste en un tambor de acero inoxidable el cual posee un tornillo helicoidal que conduce el producto a través de agua hirviendo desde la entrada a la salida.

Referencias

FELLOWS, P. Tecnología del procesado de alimentos: principios y práctica. Zaragoza: Editorial Acribia S.A., 2007. p. 277-285.

ZARTHA SOSSA, Jhon Wilder y PIEDRAHÍTA PALACIO, Juan Carlos. Operaciones y procesos agroalimentarios. Universidad Pontificia Bolivariana: Medellín, 2009. p. 123-126.

9.4.7. Cristalización

Descripción

La operación de cristalización, que constituye una separación sólido-líquido se utiliza para dos fines en la industria de los alimentos. El primero de ellos, es separar un producto líquido en una fase sólida (cristales) y una fase líquida (líquido o licor madre) que difieren en composición, siendo uno o ambos productos los deseados. El otro, es la separación de la fase sólida buscando retener toda la materia prima en el cristal formado.

Se debe tener en cuenta entonces que para cristalizar un producto se parte de una disolución que está compuesta de soluto+disolvente+impurezas. Ahora, y vista globalmente, en la cristalización la

solución se concentra hasta que la concentración del soluto es superior a la solubilidad a dicha temperatura, entonces, el soluto sale de la solución formando cristales casi puros.

Aplicaciones agroindustriales

La cristalización es una operación que se utiliza para obtener sal a partir del agua de mar y azúcar, ya sea partiendo de jugo de caña de azúcar o de jugo de remolacha. Estos dos procesos tienen en común el hecho que la cristalización implica una separación entre el soluto y el líquido madre. Sin embargo, la cristalización también es un fenómeno que se presenta naturalmente en la transformación de varios productos, por ejemplo cuando se congela un alimento se forman cristales de hielo. Otros ejemplos son la cristalización de la lactosa cuando se congela la leche y la cristalización de la grasa en la elaboración de margarina, teniendo en común que no se busca separar el componente, sino que se forme un producto con ciertas características de textura y consistencia.

Consideraciones sobre las etapas de cristalización

La cristalización se divide en dos etapas que son la formación de los núcleos (nucleación) y el crecimiento de los cristales. Para la realización de estos dos procesos es indispensable que la solución esté sobresaturada, ya que la fuerza impulsora de la cristalización.

Etapas 1: nucleación o formación de núcleos

La formación de núcleos puede darse de dos formas, ya sea por choque o por la inducción con semilla. En la cristalización por choque para la producción de azúcar, la solución se concentra gradualmente en el tacho (tanque de nucleación) y cuando se sobresatura (a una concentración de 80°Brix), el grano se presenta espontáneamente. En este momento se introduce al tacho un poco de meladura y se disminuye la entrada de vapor con el fin de inducir aun más la formación del grano. Al bajar la temperatura se induce a la cristalización, ya que se disminuye la concentración obligando a la formación de los cristales de azúcar apenas visibles.

Por otro lado, la cristalización por semilla se lleva a cabo adicionando al tacho soluto en polvo. Una consideración importante es que antes de agregar la semilla se suspende el suministro de vapor para evitar que la semilla en polvo (cristales) se disuelva al entrar en contacto con la superficie caliente.

Tan pronto como el núcleo o grano sea lo suficientemente grande para poder observarlo en una muestra, se observa si el grano formado es insuficiente o excesivo. Si es demasiado se procede a disolver parte de él, introduciendo rápidamente una carga de solución. Si el grano es insuficiente la situación es grave ya que se verá obligado a cocer cristales muy grandes.

Durante este proceso es indispensable mantener la temperatura constante, ya que cualquier cambio brusco de ésta, produce una segunda cristalización llamada grano falso. Esto constituye un problema ya que los cristales formados en las dos cristalizaciones presentan granulometrías muy diferentes, lo que ocasiona serias dificultades en la centrifugación debido a la diferencia de tamaños.

Etapas 2: crecimiento de los cristales

Luego de formarse los primeros cristales o núcleos se pasa la masa cocida al cristizador. Éste es como una especie de mezclador que conserva la temperatura, y mantiene la solución en movimiento para que las moléculas del soluto que se encuentran dispersas se vayan adhiriendo a los cristales o núcleos ya formados; de esta forma se hace que los cristales vayan creciendo y se va forzando con esto el agotamiento del licor madre.

El tamaño y la forma de los cristales que se forman deben ser uniformes para evitar apelmazamientos en el empaque (Presentación del producto), para facilitar la descarga, el lavado, el filtrado y para el comportamiento uniforme en su uso.

Cálculos importantes: coeficiente de solubilidad y coeficiente de sobresaturación

Es importante tener en cuenta que en la práctica siempre se manejan materiales impuros y por lo tanto puede formar un cristal mixto. Las impurezas pueden aumentar o disminuir la solubilidad del soluto en el disolvente. A veces, las impurezas carecen de influencia importante y otras se forma un compuesto doble. Se puede definir un coeficiente de solubilidad c , así (expresión (28)):

$$c = \frac{\% \text{ de soluto en un peso dado de solución impura}}{\% \text{ de soluto en un peso dado de solución pura}} \quad (26)$$

Si $c > 1$, indica que las impurezas salifican el producto, es decir, lo afectan negativamente. En cambio, si $c < 1$, significa que el soluto queda desalinizado.

Ahora bien, se sabe que el punto de saturación o solubilidad varía linealmente con la temperatura, y que cuando una solución contiene el total de soluto que es capaz de disolver se dice que está saturada. Cuando se concentra una solución más allá de su punto de saturación, ya sea por evaporación o por enfriamiento, se sobresatura la solución, condición indispensable para que se dé la cristalización. El coeficiente de sobresaturación S , se calcula como se presenta en la expresión (29), con ambos porcentajes de soluto medidos a la misma temperatura.

$$S = \frac{\% \text{ soluto en el disolvente}}{\% \text{ de soluto en el disolvente en una solución saturada}} \quad (27)$$

Si $S > 1$ se dice que la solución está sobresaturada, si $S = 1$ entonces la solución es saturada, y si $S < 1$ se dice que se tiene una solución insaturada.

Equipos para la cristalización de alimentos

Ya que los productos obtenidos mediante la cristalización son muy diversos, los equipos de cristalización suelen diferir mucho entre sí, sin embargo algunos principios básicos aplican para el diseño de cada uno de ellos. Uno de estos principios es el favorecimiento de la formación y crecimiento de los cristales, ya sea por la temperatura, el movimiento de la solución o la forma de sembrar de la semilla.

Para clasificar los equipos de cristalización se tiene en cuenta el método para generar la sobresaturación o el método para suspender el crecimiento de los cristales. Algunos equipos de común uso son:

- Cristalizador Howard
- Cristalizador a tubo con raspadores
- Cristalizador tipo Swenson Walker
- Cristalizador tipo tanque agitado con serpentines
- Cristalizador de refrigeración por contacto directo
- Cristalizadores por evaporación: cristalizadores Oslo, cristalizadores evaporadores de circulación forzada y cristalizadores adiabáticos al vacío

En el siguiente enlace Web se encuentran las imágenes de cada uno de los equipos mencionados y se profundiza en los criterios de diseño de los mismos: cristalizadores.

Referencias

BRENNAN, J.G., et al. Las operaciones en la ingeniería de los alimentos. Editorial Acribia: Zaragoza, 1970. p. 145-149.

SALAS ARAÚJO, Carlos Luis. Equipos de cristalización [en línea]. Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela. Disponible en:

<http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/csalas/OPIV/EQUIPOS%20DE%20CRISTALIZACION.pdf>

ZARTHA SOSSA, Jhon Wilder y PIEDRAHÍTA PALACIO, Juan Carlos. Operaciones y procesos agroalimentarios. Universidad Pontificia Bolivariana: Medellín, 2009. p. 110-115.

9.4.8. Ejercicios

Ejercicios - Sedimentación

- Investigue: ¿cómo está conformado un clarificador de meladura en la industria azucarera?, y ¿en cuál etapa del proceso se emplea?.
- Investigue algunos floculantes que se utilicen a nivel industrial y mencione algunas de sus principales características.
- Un lodo biológico de una planta de tratamiento de aguas residuales debe concentrarse de 2500 mg/L a 10900 mg/L en un espesador continuo. El flujo de alimentación al equipo es de 4,5x10⁶ L/día. Los datos de altura de la interfaz y tiempo se presentan en la siguiente tabla

Tabla. Datos experimentales de la sedimentación de un lodo biológico

Tiempo (min)	0	1	2	3	5	8	12	16	20	25
Z (cm)	51	43,5	37	30,6	23	17,9	14,3	12,2	11,2	10,7
Concentración (mg/L)										
Velocidad de sedimentación (m/s)										

Identifique las variables conocidas y desconocidas, según las ecuaciones descritas en la sección

- Halle las concentraciones y la velocidad de sedimentación para cada fracción de tiempo

Nota: recuerde mantener un estricto manejo de unidades, para evitar errores en los cálculos

Ejercicios - Emulsificación

- Investigue: ¿qué influencia tiene la yema de huevo en la elaboración de mayonesa?
- Investigue: ¿en el proceso de elaboración de salchichas se genera una emulsión?, si es así: ¿cuál es la fase interna y cuál la externa?

Ejercicios - Homogenización

- Elabore un diagrama en el que se evidencie como se organizan las partículas de la fase dispersa antes, durante y después del proceso de homogenización, por ejemplo, como se distribuyen las partículas de grasa en la leche
- Investigue: ¿por qué se aumenta la susceptibilidad al ataque microbiano en los alimentos homogenizados?

Ejercicios - Esterilización

- Investigue: ¿qué factores ocasionan el hinchamiento de las latas previamente esterilizadas?
- Las latas de un alimento se calientan en un autoclave con el fin de esterilizarlo. El F_0 tabulado para el *Clostridium botulinum* en este tipo de comida es de 2,5 min, y su z es igual a 18°F. Las temperaturas en el centro de la lata son:

Tabla. Datos de esterilización de un alimento enlatado

Tiempo (min)	Temperatura (°F)
0 – 20	160
20 – 40	210
40 – 73	230

- Determine si este proceso de esterilización es adecuado, calculando el F_0 (como la sumatoria de los F_0 de cada periodo de tiempo) y comparándolo con el F_0 dado para el *Cl. botulinum*. Tenga en cuenta que cuando F_0 calculado > F_0 tabulado, entonces el proceso no es adecuado.

Ejercicios - Pasteurización

- Investigue: ¿cómo es el funcionamiento de un intercambiador de calor de tubos y coraza?. Indique algunos criterios de diseño para un equipo de esta clase si planea ser utilizado en la pasteurización de un alimento

- Calcule el tiempo en minutos que se requiere para pasteurizar un lote de leche, si la temperatura de proceso es 62.8°C. Suponga que el valor de F0 a 65.6°C es 9 min y el valor de z es a 5°C

Ejercicios - Escaldado

- Consulta: ¿cuáles son las enzimas responsables del deterioro de las frutas y verduras? ¿qué daño específico generan: sobre el color, el sabor, la textura o la composición nutricional?. Mencione por lo menos cuatro.

Enzima	Deterioro que ocasiona
1	
2	
3	
4	

- Cuando se realiza el escaldado en agua se debe tener en cuenta que el pH del líquido de escaldado va disminuyendo, porque los líquidos vegetales son ácidos. Entonces ¿cuáles sustancias se emplean en la industria para controlar el pH en el escaldado?
- Investigue: ¿con que objetivo se añaden fosfatos en el escaldado de las zanahorias?

Ejercicios - Cristalización

- Investigue: ¿qué representan la zona metaestable, la zona intermedia y la zona lábil en la sobresaturación de las soluciones necesaria para la cristalización?
- Investigue: ¿cuál es la importancia de la cristalización en la fabricación de helados?

9.5. PRUEBA FINAL

- Elabore un mapa conceptual en el que relacione las operaciones unitarias tratadas en la unidad II. Detalle la definición, las variables que intervienen en ella y las aplicaciones de cada una. Sugerencia: tome como guía los mapas conceptuales de la Figura 5 y la Figura 6
- Halle el área de un sedimentador que recibe una alimentación de 4500000 cm³/min a una velocidad de 1,7 cm/min. Proponga una configuración geométrica para tal equipo (forma, altura, ancho, lugar de alimentación y evacuación de sedimentos, entre otros aspectos)
- En un hato lechero, se tiene un tanque de almacenamiento de leche recién ordeñada. Cuando el camión colector se tarda más de lo usual para recolectar la leche, el encargado descubre se ha separado en dos fases. Bajo su criterio de Tecnólogo Agroindustrial y para explicarle lo sucedido al encargado, a qué variables asociaría usted este fenómeno de separación de fases. Elija una o varias opciones y explique su respuesta

a) A la temperatura y la densidad.

b) A la concentración de partículas y el tamaño de las partículas.

c) A la densidad y tamaño de partícula.

d) Ninguna de las anteriores.

- ¿Cuál es la relación que existe entre la emulsificación y la homogenización?
- Elabore un cuadro comparativo en el que indique en qué se diferencian la esterilización, la pasteurización y el escaldado
- Ingrese al siguiente enlace Web: Ingenio Manuelita: producción de azúcar, y elabore un diagrama de flujo del proceso productivo que allí adelantan. Indique el tipo de material que entra, así como el producto y los sub-productos que salen de cada una de las operaciones

9.5.1. Actividad

- Consulte los diferentes diagramas de los equipos mencionados en este capítulo. Obsérvelos buscando las similitudes y diferencias entre las máquinas empleadas en cada operación

- Consulte en internet algunas empresas que elaboren productos utilizando las operaciones descritas en esta unidad. Observe esos productos y reflexione sobre la importancia de cada una de las operaciones en la industria procesadora de alimentos. Sugerencia: para seleccionar los productos tome como base los mencionados en las aplicaciones agroindustriales de cada tema

10.UNIDAD 3 EVAPORACIÓN

10.1.OBJETIVO GENERAL

Definir los fundamentos de la operación de evaporación, su principio de funcionamiento y sus aplicaciones en la agroindustria alimentaria.

10.2.OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Resaltar la importancia de la operación de evaporación en la transformación de alimentos
- Describir las variables que intervienen en el proceso de evaporación
- Enumerar los principales equipos industriales de evaporación y sus aplicaciones específicas

10.3.PRUEBA INICIAL

- Investigue: ¿cuál es el proceso de elaboración del arequipe a nivel industrial? En dicho proceso, ¿cómo se logra que aumente la concentración de sólidos en el producto?
- Defina los siguientes conceptos y mencione las unidades en que se expresan:

Calor específico o capacidad calorífica

Calor latente

Calor sensible

10.4.TEMAS

10.4.1. Evaporación

Definición

La evaporación es una operación unitaria, en la cual gracias a la transferencia de calor, se concentra una solución al eliminar el vapor formado por ebullición de una solución líquida. Esto se hace para disminuir la cantidad de agua presente en la materia prima cuando contiene más de la que es deseada en el producto final. La evaporación se da a causa de una diferencia de temperaturas entre el nivel de calefacción y la solución a concentrar.

El vapor que se elimina debe ser más volátil que el soluto o que los demás componentes de la solución obteniéndose una solución más concentrada mediante una transferencia de calor. El calor transferido proviene del vapor de calefacción, que cede al sistema su calor de condensación, con lo cual cambia de fase y abandona el equipo en forma líquida (condensado). Ese calor de condensación cedido por el vapor de calefacción es aprovechado por la alimentación o solución a concentrar. Una vez dicho esto, se entiende que en la evaporación se obtienen dos productos: el vapor de agua eliminado y la solución concentrada.

El nivel de degradación de los materiales biológicos durante la evaporación es una función de la temperatura y del tiempo de procesamiento. Para evitar esa degradación, se suele mantener la temperatura baja haciendo la evaporación al vacío para reducir el punto de ebullición de la solución y se disminuye al máximo el tiempo de contacto o tiempo de retención.

Objetivos de la evaporación

Los objetivos de la operación de evaporación, dependiendo del producto elaborado, pueden ser:

- Concentrar una solución para facilitar su tratamiento posterior, que pueden ser operaciones como el secado o la cristalización
- Reducir problemas de ataques microbianos o de reacciones químicas indeseadas, problemas que se aumentan considerablemente en presencia del agua

- Disminuir el peso de los productos, con lo cual se disminuyen los costos de labores, tales como su transporte, su almacenamiento o su empaque

Aplicaciones agroindustriales

Algunas aplicaciones de la evaporación en la industria son:

- Concentración de soluciones acuosas de azúcar, cloruro de sodio, hidróxido de sodio, glicerina, gomas, leche y jugo de naranja. En estos casos, la solución concentrada es el producto deseado y el agua evaporada suele desecharse
- Evaporación productos farmacéuticos, leche, jugos cítricos y extractos vegetales
- Evaporación de agua de mar para obtener agua potable
- La cristalización, es una operación unitaria que se basa en la evaporación para concentrar una solución de tal manera que, al enfriarse ésta, se formen cristales que puedan separarse
- En la industria de los aceites se evaporan los solventes (hexano) del aceite en evaporadores de dos y hasta tres efectos
- En la industria sucroquímica se emplean evaporadores múltiple efecto para obtener ácido cítrico

Factores del proceso

Los principales factores a tener en cuenta cuando se realice la operación de evaporación y cuál es su principal influencia en la operación.

- La concentración del líquido varía a lo largo de la operación de evaporación, cambiando así las propiedades del fluido. Entonces, es usual recibir una alimentación con una viscosidad bastante baja y un coeficiente de transferencia de calor bastante alto. A medida que avanza la evaporación, la solución se concentra y su viscosidad puede elevarse notablemente, causando una marcada disminución del coeficiente de transferencia de calor. Esta situación se controla generando una circulación y/o turbulencia adecuada para evitar que el coeficiente se reduzca en exceso
- Cuando se calienta la solución, aumenta la concentración del soluto. Si ocurre esto, puede excederse el límite de solubilidad del material en solución y se formarán cristales. La cristalización es pues un limitante, porque determina la concentración máxima que puede obtenerse por la evaporación
- Los alimentos y otros materiales biológicos, pueden ser sensibles a las temperaturas altas y los tiempos prolongados de exposición al calor, degradándose cuando se someten a esas

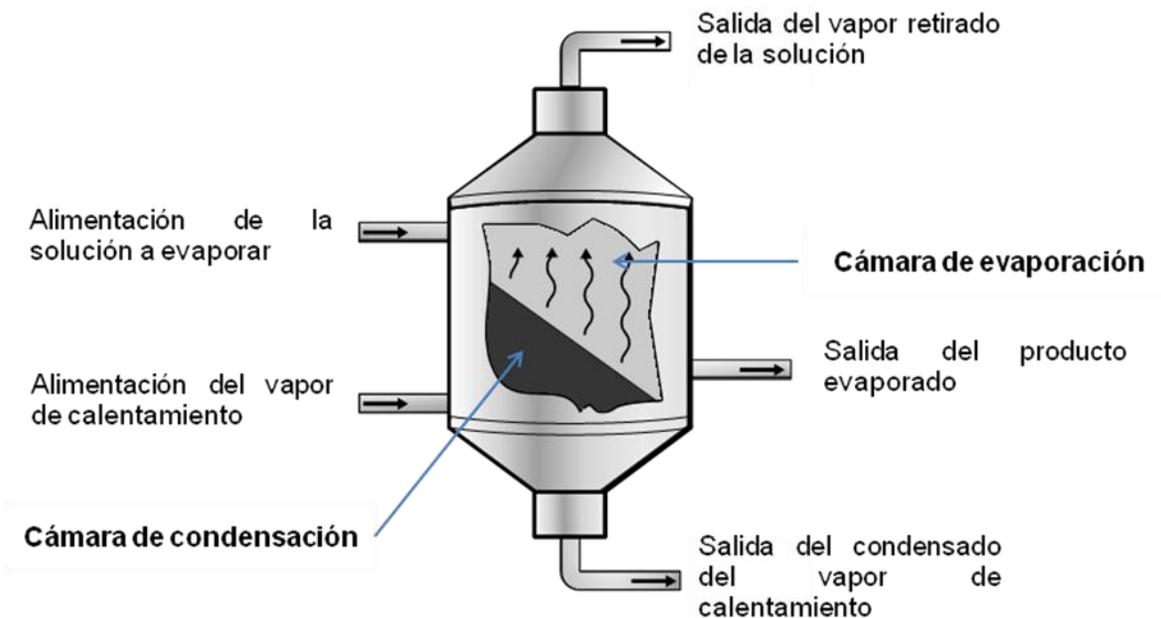
condiciones. La cantidad de degradación es una función de la temperatura y del tiempo de permanencia

- En algunos casos, los materiales constituidos por soluciones cáusticas (soluciones de leche desnatada y de ácidos grasos) forman espumas durante la ebullición. Esta espuma es arrastrada por el vapor que sale del equipo y puede ocasionar pérdidas de material
- El punto de ebullición de la solución será mayor a medida que aumenta la presión del sistema. Al mismo tiempo, la temperatura de ebullición también se eleva a medida que aumenta la concentración del soluto. Este fenómeno se llama elevación del punto de ebullición, y para mantener baja la temperatura de los materiales termosensibles es usual operar a presiones inferiores a 1 atm (presiones de vacío)
- Cuando se evaporan ciertas soluciones se depositan materiales sólidos sobre las superficies de calentamiento, lo que se conoce como incrustaciones. Estas incrustaciones pueden formarse a causa de la descomposición de los productos o por la disminución de la solubilidad. El resultado de ello es una reducción del coeficiente de transferencia de calor, por ello se hace necesario limpiar el evaporador con regularidad
- La selección de los materiales de construcción es un factor clave para diseñar o elegir un evaporador, pues tiene importancia en la prevención de la corrosión
- La calidad del producto puede demandar un tiempo de retención bajo y el funcionamiento a bajas temperaturas, para evitar la degradación térmica. También puede requerir de materiales especiales de construcción, para evitar la contaminación metálica o un efecto catalítico sobre la descomposición del producto

Cálculos para un evaporador simple

Antes de comenzar a exponer los cálculos que se emplean para hallar las variables que se manejan en un evaporador simple, se muestran en la Figura 11 las entradas y salidas del proceso.

Figura 11. Corrientes en un evaporador simple



Fuente: Adaptado de ZARTHA SOSSA, Jhon Wilder y PIEDRAHÍTA PALACIO, Juan Carlos. Operaciones y procesos agroalimentarios. Universidad Pontificia Bolivariana: Medellín, 2009. p. 182.

Una vez presentadas estas corrientes, se procede a describir en la Tabla 11, las variables que intervienen en cada una de ellas.

Tabla 11. Variables de las corrientes de un evaporador de simple efecto

Cámara	Corriente	Variables
Cámara de evaporación	Alimentación de la solución a evaporar	<p>F: Flujo másico de la alimentación (kg/h).</p> <p>X_f: Fracción másica de sólido (soluto) en la alimentación (varía entre 0 y 1, no tiene unidades).</p> <p>C_{p_f}: Capacidad calorífica de la alimentación (kcal/kg°C).</p> <p>T_f: Temperatura de entrada de la alimentación (°C).</p> <p>P_f: Presión de entrada de la alimentación (Psi ó lb/pie²).</p>
	Salida del vapor retirado de la solución	<p>E: Flujo másico del vapor de agua producido (kg/h).</p> <p>λ_E: Calor de evaporación del vapor (kcal/kg).</p> <p>T_E: Temperatura del vapor de salida (°C).</p> <p>P_E: Presión mantenida dentro de la cámara de evaporación (Psi ó lb/pie²).</p>

Cámara	Corriente	Variables
	Salida del producto evaporado	S: Flujo másico de la solución concentrada (kg/h). X _s : Fracción másica de los sólidos (soluto) en el producto concentrado (varía entre 0 y 1, no tiene unidades). C _p : Capacidad calórica de la alimentación en S (kcal/kg°C). T _s : Temperatura a la cual se evapora el agua dentro de la cámara de evaporación (°C). λ _s : Calor de evaporación del solvente (agua) separado de la solución (kcal/kg).
Cámara de condensación	Alimentación del vapor de calentamiento	W: Flujo másico del valor de calefacción (kg/h). T _w : Temperatura de vapor de calefacción (°C). P _w : Presión absoluta del vapor de calefacción (Psi ó lb/pie ²). λ _w : Calor de condensación del vapor de calefacción (kcal/kg).
	Salida del condensado del vapor de calentamiento	Esta corriente es la misma que W, pero en estado líquido. No se emplea usualmente en los cálculos.
Ambas cámaras	-	U: Coeficiente integral de transferencia de calor (Kcal/hm ² °C).

Ahora bien, las variables en el evaporador simple se pueden calcular con base en los balances de masa y el balance de calor, así:

Balances de masa (cámara de evaporación):

Balance total: este balance se emplea para despejar el flujo másico de las corrientes (ecuación (28)).

$$F = E + S \quad (28)$$

Balance de sólidos: con esta ecuación (29) se relacionan los porcentajes de soluto en las corrientes.

$$FX_F = EX_E + SX_S \quad (29)$$

Balance de solvente: con esta ecuación (30) se relacionan los porcentajes de solvente en las corrientes.

$$F(1 - X_F) = E + S(1 - X_S) \quad (30)$$

Balances de energía (cámara de condensación):

Con este balance se calcula el calor cedido (calor latente) como la suma del calor retirado más el calor perdido (calor sensible + calor latente) en el proceso (ecuación (31)).

$$W\lambda_w = FCp_F(T_E - T_F) + E\lambda_E \quad (31)$$

Además, se tiene la ecuación de diseño que relaciona el calor cedido con el coeficiente integral de transferencia de calor y el área del evaporador así:

$$Q = UA\Delta T \quad (32)$$

De donde se puede llegar a calcular el área del evaporador (ecuación (33)):

$$A = \frac{W\lambda_w}{U(T_w - T_E)} \quad (33)$$

Por último, se suele calcular la economía del evaporador (ecuación (34)), que es la relación del vapor de agua que sale y el vapor de agua que entre. Este valor nunca será 1, pues el flujo de la corriente de vapor E no es igual al de la corriente de vapor W, por sus diferentes calidades y por las pérdidas de calor.

$$Economía = \frac{E}{W} \quad (34)$$

Nota: cabe destacar que no es objeto de este módulo profundizar en el manejo de las variables en evaporadores de múltiple efecto, sin embargo existen cálculos para evaporadores desde dos hasta n efectos, que parten de la base de los cálculos para un evaporador simple.

Equipos de evaporación

Los equipos de evaporación se diseñan teniendo en cuenta:

- Las necesidades del producto que se va a concentrar
- El método empleado para transferir calor, que puede ser por calefacción directa, mediante el empleo de resistencias eléctricas o con el empleo de vapor de agua. La forma más utilizada es la calefacción por vapor de agua, ya que las demás tienden a suministrar altas temperaturas en determinadas partes del equipo, lo que puede causar daños en la solución, especialmente en productos de origen animal o vegetal
- La configuración de la superficie para la transferencia de calor
- Los medios usados para lograr la circulación del líquido
- El número de evaporadores. Si únicamente se utiliza un evaporador, el sistema recibe el nombre de simple y si se usan varios evaporadores en serie, se denomina de múltiples efectos

Ahora, las partes que normalmente conforman un evaporador simple son:

- Una cámara de condensación, que es la zona donde el vapor de calefacción se condensa
- Una cámara de evaporación, que es la zona donde el líquido ebulle y se evapora el agua
- Un separador, que es la zona que mantiene aislados el vapor de agua producido y el líquido arrastrado, ya que el vapor por ser más liviano que el líquido tiende a buscar la parte superior del equipo

Algunos de los equipos de evaporación que se encuentran usualmente en la industria se reportan en la Tabla 12.

Tabla 12. Equipos de evaporación

Equipo	Características	Soluciones que procesa
Marmita abierta	Es económico y de simple operación. Se presentan altas pérdidas de calor	
Evaporador de tubos horizontales con circulación natural	El vapor de agua entra a los tubos y se condensa; el condensado sale por el extremo contrario de los tubos. La solución a ebullición permanece siempre por fuera de ellos	Líquidos no viscosos con alta transferencia de calor y que no formen incrustaciones
Evaporador vertical con circulación natural	El líquido está por dentro de los tubos y el vapor se condensa en el exterior	No es útil con líquidos viscosos; es usado frecuentemente en las industrias de

Equipo	Características	Soluciones que procesa
		azúcar, sal y soda caústica
Evaporador vertical de tubos largos	Se utilizan velocidades altas para el líquido (tiempo de permanencia corto), puesto que el coeficiente de transferencia de calor del lado del vapor es muy alto con respecto al del lado del líquido. En este equipo el líquido está en el interior de los tubos	
Evaporador de caída de película	El líquido se alimenta por la parte superior de los tubos y fluye por sus paredes en forma de película delgada	
Evaporador de circulación forzada	En este equipo se aumenta el coeficiente de transferencia de calor del líquido en el interior de los tubos por medio de un bombeo	Útil para líquidos muy viscosos
Evaporador de película agitada	Se aumenta la transferencia de calor y la turbulencia del líquido por medio de su agitación mecánica (aspas verticales), el líquido entra por la parte superior del tubo y fluye hacia abajo dispersándose; la solución concentrada sale por el fondo y el vapor pasa por un separador y sale por la parte superior	Materiales viscosos, tales como látex de caucho, gelatina, antibióticos y jugos de frutas
Evaporador solar de artesa abierta	El agua salina se introduce en bateas abiertas poco profundas y se deja evaporar al sol hasta la cristalización	Agua de mar

10.4.2. Ejercicios

Ejercicios - Evaporación

¿Cuál es el objetivo de emplear presiones de vacío en el proceso de evaporación?

Analice: ¿qué significa que un proceso de evaporación tenga una economía de 0,5?.

En una procesadora de jugos, se requiere concentrar 10000 kg/h de jugo de mora desde un 10% de sólidos solubles a un 40%. Calcule el flujo másico de las corrientes de salida del vapor retirado de la solución (E) y de salida del producto evaporado (S). Además, calcule el calor cedido por el vapor de calentamiento ($W\lambda_w$) y la corriente W. Los datos de las corrientes son:

- $T_F = 26^\circ\text{C}$
- $C_{pF} = 0,9 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C}$
- $T_E = 75,62^\circ\text{C}$
- $\lambda_E = 554,14 \text{ kcal/kg}$
- $T_W = 120^\circ\text{C}$
- $\lambda_w = 525,7 \text{ kcal/kg}$

Sugerencia: realice un diagrama de flujo en el que muestre como ingresan las variables al proceso (tome como base la Figura X y añada las variables). Organice un sistema de ecuaciones con el balance total de masa y uno de los balances parciales de masa, sea el de soluto o el de solvente.

Con los datos del ejercicio anterior, y si se tiene un coeficiente U de $2000 \text{ kcal/hm}^2\text{C}$, calcule el área del evaporador.

10.5.PRUEBA FINAL

- Analice: ¿cuál es la relación que existe entre la operación de cristalización y de evaporación?
- Complete el siguiente cuadro con la información sobre los factores que influyen en el proceso de evaporación:

Factor	Problema que ocasiona	Estrategia de control
Viscosidad de la solución a concentrar		
	El material en solución se cristaliza	
		Operar a presiones inferiores a 1 atm
Formación de incrustaciones		
	Contaminación del alimento con trazas de metales	

- Se concentra jugo de tomate con un 14% de sólidos hasta un 28% de sólidos, en un evaporador de tipo película. La temperatura máxima permisible para el jugo de tomate es 57,22°C que será la temperatura del producto, mientras que la alimentación entra a 37,7°C; y se usa vapor de H₂O saturado a 25 Psi de presión absoluta, como medio de calentamiento. El coeficiente total de transferencia de calor $U=2800$ kcal/hm²°C y el área es de 4,645 m². ¿Cuál es el flujo de alimentación del jugo de tomate al evaporar?

Otros datos:

Capacidad calorífica de alimentación= 0,95 kcal/kg°C.

$\lambda_E= 564,78$ kcal/kg

$T_w= 115,16^\circ\text{C}$

$\lambda_w= 524,31$ kcal/kg

Sugerencia: utilice la fórmula para calcular el área, después el balance de energía y por último los balances de materia.

- En un evaporador simple se han de concentrar 10000 Kg/h de una solución desde el 10% hasta el 50% en peso. El vapor de calefacción es vapor saturado a 0,6 kg/m² de presión absoluta y el condensado sale a la temperatura de condensación. El vapor procedente de la solución condensa a 50°C

Otros datos:

$$T_F = 26^\circ\text{C}$$

$$C_{pF} = 0,9 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C}$$

$$T_E = 85,45^\circ\text{C}$$

$$\lambda_E = 547,99 \text{ kcal/kg}$$

$$T_W = 120^\circ\text{C}$$

$$\lambda_w = 527,7 \text{ kcal/kg}$$

$$U = 3000 \text{ Kcal/hm}^2^\circ\text{C}$$

- Realice el diagrama de flujo y calcule:
 - a. El consumo de vapor por hora
 - b. La superficie de calefacción (área del evaporador)
 - c. La economía

10.5.1. Actividad

- Consulte los diferentes diagramas de los equipos de evaporación mencionados en este capítulo. Obsérvelos buscando las similitudes y diferencias entre ellos
- Consulte en internet algunas empresas que elaboren productos utilizando la operación de evaporación. Observe esos productos y reflexione sobre la importancia de esta operación en la industria procesadora de alimentos. Sugerencia: para seleccionar los productos tome como base los mencionados en las aplicaciones agroindustriales de la evaporación

11.UNIDAD 4 SECADO

11.1.OBJETIVO GENERAL

Definir los fundamentos de la operación de secado, las variables que intervienen en ella y sus aplicaciones en la agroindustria alimentaria y no-alimentaria.

11.2.OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Resaltar la importancia de la operación de secado en la transformación y conservación de alimentos
- Describir las variables que intervienen en el proceso de secado
- Establecer las diferencias que existen entre los métodos de secado
- Enumerar los principales equipos industriales de secado y sus aplicaciones específicas
- Explicar el principio de funcionamiento de los equipos de secado

11.3.PRUEBA INICIAL

Defina en sus propias palabras: ¿a qué se refieren los términos humedad libre y humedad ligada en el procesamiento de alimentos?.

La humedad inicial de un lote de arroz que ingresa a la planta procesadora es de 25%, y debe secarse hasta que tenga una humedad del 12%. Estas humedades se encuentran expresadas en base húmeda, pero el software de registros de la empresa requiere que se ingresen los datos de humedades en base seca. Realice el procedimiento de conversión y defina que significa cada una de estas unidades.

Consulte los siguientes términos y las unidades en que se expresan:

Presión de vapor de agua.

Temperatura de bulbo húmedo.

Temperatura de bulbo seco.

11.4.TEMAS

11.4.1. Secado

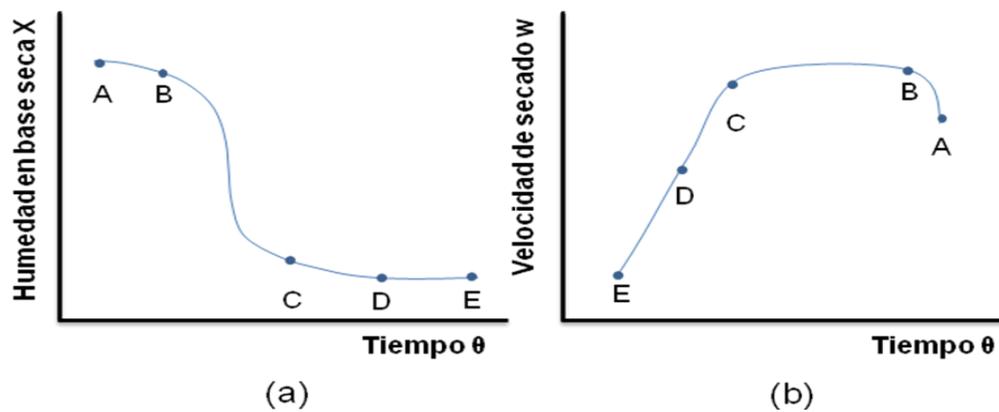
Definición

El secado es una operación unitaria mediante la cual se separan líquidos de sólidos, y en algunas ocasiones líquidos de líquidos. La humedad de los sólidos se retira por evaporación en una corriente gaseosa, es decir, por lo general es vapor de agua y el gas más utilizado para la aplicación del secado es aire.

El secado se puede realizar o catalogar como secado por contacto directo, éste tiene la característica de que el calor necesario para que se dé la vaporización del agua sea suministrado por el aire, se puede realizar de modo continuo o discontinuo. Cuando se emplea el método discontinuo, una vez cargado el secadero se hace circular el aire de secado y se supone que sus condiciones permanecen constantes con el tiempo. Por el contrario, en el método continuo, tanto la alimentación del sólido como el aire entran de forma continua al secadero, variando las condiciones del aire y del sólido a secar.

Las curvas de secado se presentan en la Figura 12. La Figura 12(a) presenta el cambio de la humedad en base seca en el tiempo, mientras que la Figura 12(b) muestra la velocidad de secado. Los factores que controlan la velocidad de secado son la superficie del secado y la diferencia de humedad entre el sólido y el aire de secado.

Figura 12. Curvas de secado



Fuente: creación propia.

Las zonas de secado, que se aprecian en las curvas de secado de la Figura X son:

A-B: este es el periodo de ajuste inicial. Aquí se llega a las condiciones de estabilidad del equipo y del producto. Este periodo implica muchos costos, y lo usual es que no se tenga en cuenta para el cálculo del tiempo del secado.

B-C: es el periodo de secado con velocidad de secado constante. En éste la velocidad de separación del agua, desde la superficie es igual a la velocidad del movimiento del agua desde el interior del sólido hasta la superficie. En este caso la temperatura de la superficie del sólido es igual a la temperatura de bulbo húmedo del aire del secado.

C-E: en este periodo la velocidad de secado es decreciente. El punto C es el punto crítico de la sustancia y la humedad que el sólido tenga. En este punto se llama humedad crítica X_c .

Humedad crítica, humedad de equilibrio y humedad libre

La humedad crítica (X_c), es aquella humedad del alimento en la que comienzan a aparecer las primeras zonas secas, esto dado porque la velocidad del movimiento del agua desde el interior a la superficie es menor que la velocidad de evaporación del agua desde la superficie. En este punto, la superficie del alimento tiene temperatura mayor y se aproxima a la temperatura de bulbo seco del aire. La humedad crítica aumenta ligeramente con la temperatura, con la velocidad del aire y el espesor del material.

Por otra parte, la humedad de equilibrio corresponde a la máxima humedad extraída. Ésta se alcanza cuando la presión parcial que el agua ejerce en el sólido es igual a la presión parcial del vapor de agua en el aire. Si el sólido presenta una humedad menor que la humedad de equilibrio absorbe agua del aire. Ahora, conociendo la humedad de equilibrio y la humedad total, se puede calcular la humedad libre del alimento (ecuación (35)), así:

$$\textit{Humedad libre} = \textit{Humedad total} - \textit{Humedad de equilibrio} \quad (35)$$

La humedad libre hace referencia a la cantidad de agua que es realmente posible extraer del alimento, es decir, el agua libre del alimento. El agua ligada se encuentra retenida en las estructuras del alimento, y por lo general no es retirable.

Aplicaciones agroindustriales

El secado es una operación que se encuentra en múltiples procesos productivos, ya que puede ser concebido como una operación para adecuar, transformar y/o conservar una materia prima. Algunas aplicaciones comunes son:

- Secado de granos y cereales para su posterior almacenamiento o comercialización
- Elaboración de condimentos y especias
- Elaboración de frutas y verduras secas: uvas, ciruelas, dátiles, tomates, pimentones
- Preparación de carnes y embutidos madurados
- Conservación de pescado
- Obtención de leche y jugos en polvo
- Aprovechamiento de subproductos agroindustriales como cáscaras y semillas de frutas y verduras
- Transformación de maderas

Fenómenos que se presentan en el secado de alimentos

Los alimentos son estructuras complejamente formadas, pues contienen distintas proporciones de diversos componentes como proteínas, carbohidratos, ácidos grasos, enzimas, vitaminas, sales inorgánicas y compuestos que son altamente hidratados. En ellos normalmente el agua no está pura, sino que se presenta formando emulsión, y adicionalmente están formados por células que actúan como membranas dificultando la salida del agua. Por lo anterior, habitualmente se presentan tres fenómenos cuando se secan alimentos:

Movimiento de solubles: las sustancias solubles en agua (carbohidratos, minerales) tiende a emigrar con el agua hacia la superficie del sólido. A veces, muchos de estos sólidos se devuelven al centro del alimento por difusión (de mayor a menor concentración), sin embargo cuando no regresan se presenta una pérdida de nutrientes.

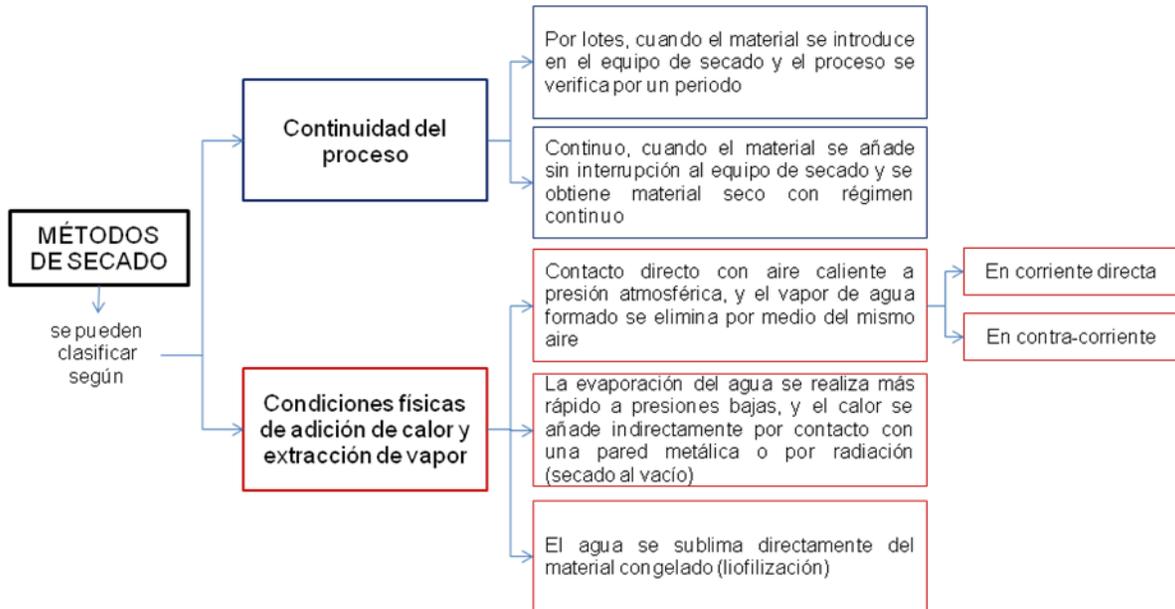
Encogimiento: antes de terminar el secado, la nueva forma y tamaño del alimento están definidos. Generalmente, la pérdida de agua ocasiona una deformación del alimento y una disminución del tamaño, es el caso por ejemplo de las uvas pasas.

Endurecimiento: el endurecimiento se presenta en la carne de res, el pescado y algunas frutas, por lo tanto se hace más difícil la transferencia de calor y el movimiento del agua desde el interior del alimento.

Cálculos en el proceso de secado

Antes de comenzar a comprender los cálculos que se emplean en la operación de secado, se hace necesario conocer los métodos de secado. Estos métodos se presentan en la Figura 13.

Figura 13. Métodos de secado



Fuente: creación propia.

Método para calcular el periodo de secado de velocidad constante (para el secado en continuo)

El cálculo más importante cuando se seca un producto a velocidad constante es el tiempo de secado. Para esto se divide dicho tiempo en el periodo ante-crítico θ_c (antes de alcanzar la humedad crítica) y el periodo post-crítico θ_p (después de alcanzar la humedad crítica). Por lo tanto, el tiempo de secado en horas, se calcula así:

$$\theta_{Total} = \theta_c + \theta_p \quad (36)$$

Siendo

$$\theta_c = \frac{S}{AW_c} (X_1 - X_c) \quad (37)$$

Y

$$\theta_p = \frac{S(X_c - X^*)}{AW_c} \ln \left(\frac{X_c - X^*}{X_2 - X^*} \right) \quad (38)$$

Donde:

- S es el peso del producto seco, en kg de sólido seco
- A es el área de superficie de secado, en m²
- W_c es la velocidad de secado en el periodo antecrítico, en kg de agua/hm²
- X₁ es la humedad inicial del producto en base seca, en kg de agua/kg de sólido seco
- X₂ es la humedad final del producto en base seca, en kg de agua/kg de sólido seco
- X_c es la humedad crítica del producto en base seca, en kg de agua/kg de sólido seco
- X* es la humedad de equilibrio del producto en base seca, en kg de agua/kg de sólido seco

Método para calcular las variables del secado continuo

Cuando se evalúa un proceso de secado continuo no se busca conocer el tiempo de secado, sino hacer balances de materia y energía para hallar las características de las distintas corrientes. En este módulo se profundizará en la comprensión y aplicación de los balances de materia. Esos balances dependen del sentido que tengan el flujo másico del producto seco y el aire caliente, pues si van en la misma dirección se denomina secado en corriente directa, pero si van en direcciones contrarias, se denomina secado a contracorriente.

Para el secado en corriente directa las variables involucradas se presentan en la Figura 14. El balance de materia para el secado en corriente directa, que es un balance parcial de agua, se efectúa según la ecuación (39), así:

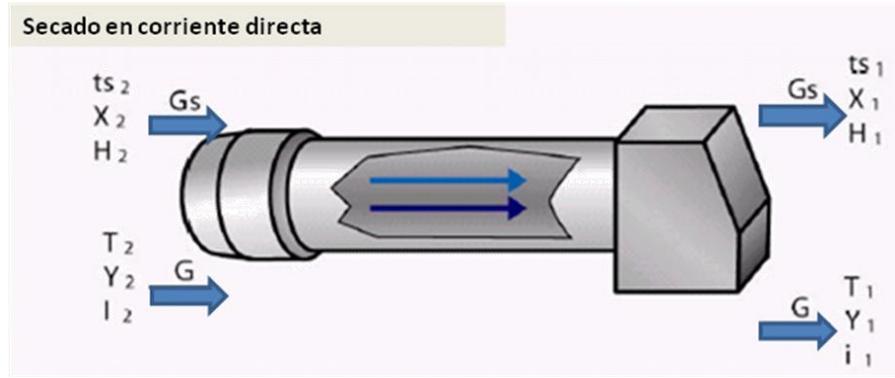
$$G_s X_2 + G Y_2 = G_s X_1 + G Y_1 \quad (39)$$

Donde:

- G_s es el flujo másico del sólido seco, en kg de sólido seco/h
- G es el flujo másico de aire caliente, en kg de aire seco/h
- X₂ es la humedad en base seca de entrada del sólido, en kg de agua/kg de sólido seco
- Y₂ es la humedad en base seca del aire que entra al secador, en kg de agua/kg de aire seco
- X₁ es la humedad en base seca de salida del sólido, en kg de agua/kg de sólido seco

- Y_1 es la humedad en base seca del aire que sale del secador, en kg de agua/kg de aire seco

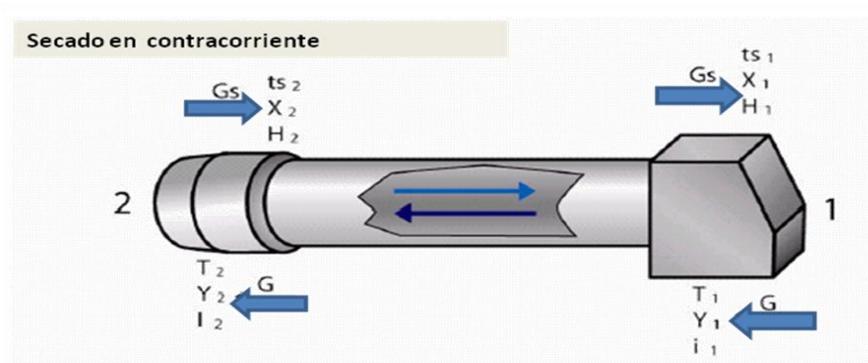
Figura 14. Variables del secado en corriente directa



Fuente: adaptado de ZARTHA SOSSA, Jhon Wilder y PIEDRAHÍTA PALACIO, Juan Carlos. Operaciones y procesos agroalimentarios. Medellín: Universidad Pontificia Bolivariana, 2009. p. 230.

Por otra parte, las variables involucradas en el secado a contracorriente se presentan en la Figura 15.

Figura 15. Variables del secado en contracorriente



Fuente: adaptado de ZARTHA SOSSA, Jhon Wilder y PIEDRAHÍTA PALACIO, Juan Carlos. Operaciones y procesos agroalimentarios. Medellín: Universidad Pontificia Bolivariana, 2009. p. 229.

El balance de materia para el secado en corriente directa también es un balance parcial de agua, pero a diferencia del secado en corriente directa se efectúa según la ecuación (40), así:

$$G_s X_2 + G Y_1 = G_s X_1 + G Y_2 \quad (40)$$

Donde:

- G_s es el flujo másico del sólido seco, en kg de sólido seco/h
- G es el flujo másico de aire caliente, en kg de aire seco/h
- X_2 es la humedad en base seca de entrada del sólido, en kg de agua/kg de sólido seco
- Y_2 es la humedad en base seca del aire que sale del secador, en kg de agua/kg de aire seco
- X_1 es la humedad en base seca de salida del sólido, en kg de agua/kg de sólido seco
- Y_1 es la humedad en base seca del aire que entra del secador, en kg de agua/kg de aire seco

Equipos de secado

La configuración de los equipos de secado depende exclusivamente de la materia prima a secar. En la Tabla 13 se presentan algunos de los equipos más utilizados, sin embargo en la industria se pueden encontrar variaciones de ellos y otros equipos como liofilizadores.

Tabla 13. Secadores

Equipo	Funcionamiento	Materiales para los que se usa
Secador de bandejas, de anaqueles, de gabinete o de compartimientos	Tiene bandejas sobre las que se esparce el sólido, y que se cargan y descargan de un gabinete. Un ventilador recircula aire calentado con vapor o con calor eléctrico paralelamente sobre la superficie de las bandejas. Más o menos del 10 al 20% del aire que pasa sobre las bandejas es nuevo, y el resto es aire recirculado. Después del secado, se abre el gabinete y las bandejas se remplazan por otras con más material para secado	Sólido en forma de terrones o una pasta
Secadores al vacío con anaqueles	Consta de un gabinete metálico con puertas herméticas, ya que opera al vacío. Los anaqueles huecos de acero se montan dentro de unas cámaras y se conectan en paralelo, con los colectores de vapor	Materiales costosos o sensibles a la temperatura, o

Equipo	Funcionamiento	Materiales para los que se usa
	de entrada y de salida. Las bandejas que contienen los sólidos húmedos se colocan sobre los anaqueles huecos. El calor se conduce a través de las paredes metálicas y por radiación entre los anaqueles. Para operaciones a temperaturas más bajas, se usa circulación de agua caliente en lugar de vapor para suministrar el calor que vaporiza la humedad. Los vapores se colectan en un condensador	bien que se oxiden fácilmente. También materiales con disolventes tóxicos o valiosos
Secadores continuos de túnel	Tienen compartimentos de bandejas o de carretillas que operan en serie. Los sólidos se colocan sobre bandejas o en carretillas que se desplazan continuamente por un túnel con gases calientes que pasan sobre la superficie de cada bandeja. El flujo de aire caliente puede ser a contracorriente, en paralelo, o una combinación de ambos. El secador consta de diversas secciones en serie, cada una con un ventilador y serpentines de calentamiento. Un ventilador adicional extrae cierta cantidad de aire hacia la atmósfera.	Materiales granulares y materiales en forma de pasta
Secador rotatorio	Consta de un cilindro hueco que gira por lo general, sobre su eje, con una ligera inclinación hacia la salida. Los sólidos granulares húmedos se alimentan por la parte superior y se desplazan por el cilindro a medida que éste gira. El calentamiento se lleva a cabo por contacto directo con gases calientes mediante un flujo a contracorriente. En algunos casos, el calentamiento es por contacto indirecto a través de la pared calentada del cilindro.	Sólidos granulares
Secador de tambor	Consta de un tambor de metal calentado, en cuyo exterior se evapora una capa delgada de un líquido o una suspensión hasta que se seca. El sólido seco final se le raspa al tambor, que gira lentamente. El tambor funciona en parte como evaporador y en parte como secador	Suspensiones o pastas de sólidos finos (puré de papa)
Secador por aspersión (<i>Spray dryer</i>)	Un líquido o una suspensión se atomiza o se roela en una corriente de gas caliente para obtener una lluvia de gotas finas. El agua se evapora de dichas gotas con	Líquidos o suspensiones (a través de este

Equipo	Funcionamiento	Materiales para los que se usa
	<p>rapidez, y se obtienen partículas secas de sólido que se separan de la corriente de gas. El flujo de líquido de la cámara de aspersión puede ser a contracorriente, en paralelo, o una combinación de ambos.</p> <p>Las gotas finas se forman al introducir el líquido en toberas de atomización o discos giratorios de rociado de alta velocidad en el interior de una cámara cilíndrica. Es necesario asegurarse de que las gotas o partículas húmedas del sólido no choquen ni se adhieran a las superficies solidas antes de que hayan secado. Por consiguiente, se emplean cámaras bastante grandes. Los sólidos secos salen por el fondo de la cámara a través de un transportador de tornillo. Los gases de escape fluyen hacia un separador de ciclón para filtrar las partículas muy finas. Las partículas que se obtienen son muy ligeras y bastante porosas</p>	<p>equipo se obtiene (leche y jugos en polvo)</p>
<p>Secador de flujo continuo para granos</p>	<p>En la tolva de secado, el espesor de la capa de granos, a través de la cual pasa el aire caliente, es 0.5 m o menos. Una corriente de aire (sin calentar) en la sección del fondo, enfría los granos secos antes de la salida</p>	<p>Granos y cereales</p>

Referencias

GEANKOPLIS, Christie J. Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias. México: CECSA, 1998. p. 580-584.

OCÓN GARCÍA, Joaquín y TOJO BARREIRO, Gabriel. Problemas de Ingeniería Química Tomo 2. Madrid: 1977.

ZARTHA SOSSA, Jhon Wilder y PIEDRAHÍTA PALACIO, Juan Carlos. Operaciones y procesos agroalimentarios. Medellín: Universidad Pontificia Bolivariana, 2009. p. 220-245.

11.4.2. Ejercicios

Ejercicios - Secado

- Consulte: ¿cuáles son las ventajas y desventajas del secado en corriente directa y del secado a contracorriente?. Para qué se emplea cada uno de estos métodos
- Investigue: ¿en qué consiste el secado por liofilización?, ¿cuáles son sus ventajas y desventajas?, y ¿a qué productos se aplica?
- Un secador se carga con bandejas de 100cmx80cmx1cm, que se secan en condiciones constantes. Calcule el tiempo de secado si se tienen los siguientes datos adicionales:
 - a) $S=4$ kg de sólido seco
 - b) $W_c= 3$ kg de agua/hm²
 - c) Humedad inicial del producto= 50% en base húmeda
 - d) Humedad final del producto= 5% en base húmeda
 - e) Humedad crítica del producto= 28% en base húmeda
 - f) Humedad de equilibrio del producto= 3% en base húmeda
- Se requiere secar un lote de arroz cuya que ingresa a contracorriente al equipo con una humedad inicial es de 18% y desea llevarse hasta el 12% (las humedades del producto están expresadas en base húmeda). Calcule la cantidad de aire que debe ingresar al equipo por hora, si tiene una humedad inicial de 0,007 kg de agua/kg de aire seco y se proyecta una humedad de 0,2 kg de agua/kg de aire seco cuando termine el proceso. El secador tiene una capacidad de de 4800 kg/h

11.5.PRUEBA FINAL

- Analice: ¿qué significado tiene que un sólido tenga una humedad crítica igual a 25%?
- Si la humedad libre de un alimento es del 43%, y la humedad de equilibrio es del 6%, ¿cuál es la humedad total del alimento? ¿Cuánta de esa humedad puede retirarse realmente del sólido?
- Analice: ¿qué implicaciones puede tener el movimiento de solubles en un eventual proceso de deshidratación de moras?
- Durante un estudio técnico del proceso de secado de un subproducto agroindustrial, se encontró que el tiempo de secado (a condiciones constantes) necesario para alcanzar las características deseadas en el material es de 4,8 horas. Mediante la revisión bibliográfica se halló que el período ante-crítico es de 1,1 h, y el período post-crítico es de 3,7 h. Pero los investigadores necesitan conocer la velocidad de secado en el periodo ante-crítico para rediseñar el proceso. Halle dicha velocidad si:
 - a) $S=8$ kg de sólido seco
 - b) $A= 0,75m^2$
 - c) Humedad inicial del producto= 47% en base húmeda
 - d) Humedad final del producto= 6% en base húmeda
 - e) Humedad crítica del producto= 25% en base húmeda
 - f) Humedad de equilibrio del producto= 3% en base húmeda
- Se requiere secar un lote de arroz cuya que ingresa en corriente directa al equipo con una humedad inicial es de 18% y desea llevarse hasta el 12% (las humedades del producto están expresadas en base húmeda). Si la cantidad de aire que debe ingresar al equipo por hora de 2800 kg, la una humedad inicial de 0,0068 kg de agua/kg de aire seco y se proyecta una humedad de 0,25 kg de agua/kg de aire seco cuando termine el proceso. Cuál es la cantidad de sólido que puede secarse por hora
- Consulte: ¿qué efecto tiene la operación bajo condiciones de vacío en un secador?, por ejemplo en el secador al vacío con anaqueles

11.5.1. Actividad

- Consulte los diferentes diagramas de los equipos de secado mencionados en este capítulo. Obsérvelos buscando las similitudes y diferencias entre ellos
- Consulte en internet algunas empresas que elaboren productos utilizando la operación de secado. Observe esos productos y reflexione sobre la importancia de esta operación en la industria procesadora de alimentos. Sugerencia: para seleccionar los productos tome como base los mencionados en las aplicaciones agroindustriales del secado

12. BIBLIOGRAFÍA

BRENNAN, J.G. las operaciones de la ingeniería de los alimentos. Editorial Acribia. Zaragoza.

EARLE. R.L. Ingeniería de los alimentos. Zaragoza: Editorial Acribia.

FELLOWS, P. Tecnología del procesado de alimentos: principios y práctica. Zaragoza: Editorial Acribia S.A., 2007.

GEANKOPLIS, Christie J. Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias. México: CECSA, 1998. p. 16.

McCABE, Warren L., et al. Operaciones unitarias en ingeniería química. Madrid: McGraw-Hill, 1991.

OCÓN GARCÍA, Joaquín y TOJO BARREIRO, Gabriel. Problemas de Ingeniería Química Tomo 2. Madrid: 1977.

ORDOÑEZ, Juan A., et al. Tecnología de los alimentos Volumen I: Componentes de los alimentos y procesos. Madrid: Editorial Síntesis S.A.

OVIDO, Juan Camilo et al. Guía de filtración del Laboratorio de Operaciones Unitarias I. Facultad de Ingeniería Agroindustrial, Universidad Pontificia Bolivariana.

OVIDO, Juan Camilo et al. Guía de sedimentación intermitente del Laboratorio de Operaciones Unitarias I. Facultad de Ingeniería Agroindustrial, Universidad Pontificia Bolivariana.

VALIENTE, Antonio. Problemas de balance de materia y energía en la industria alimentaria. Limusa - Noriega editores.

VIAN A. y OCON J. Elementos de ingeniería química. Aguilar Editores S.A.

ZARTHA SOSSA, Jhon Wilder y PIEDRAHÍTA PALACIO, Juan Carlos. Operaciones y procesos agroalimentarios. Medellín: Universidad Pontificia Bolivariana, 2009.

Fuentes digitales

Operaciones preliminares:

<http://www.ual.es/~jfernand/TA/Tema5/Tema5-OperacionesPreliminares.pdf>

Reducción de tamaño:

http://descom.jmc.utfsm.cl/jcarmi/proyectos_de_ingenieria/material/apuntes%20II/03-Reduccion%20de%20tamano.pdf

Sedimentación:

<http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Sedimentaci%C3%B3n&oldid=36794464>

Pasteurización:

<http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Pasteurizaci%C3%B3n&oldid=37576396>

Equipos de cristalización:

<http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/csalas/OPIV/EQUIPOS%20DE%20CRISTALIZACION.pdf>

Proceso productivo del azúcar:

http://www.manuelita.com/html/sitio/index.php?view=vistas/es_ES/pagina_53.php