

Ingeniería

Revista Semestral de la Universidad de Costa Rica

Vol. 16 (1)

Ene/Jul 2006

CONTENIDO

Artículos

1. La compensación serie controlada y el relé de impedancia..... 15-26
Araya, Eddie.
2. Estudio de los factores que afectan la hidrólisis enzimática y el proceso fermentativo para la producción de alcohol a partir de papa (*Solanum tuberosum*) 27-37
Molina, Manuel; González, Jorge.
3. Reducción de la radiación electromagnética en las líneas de alta tensión 39-49
Araya, Eddie.
4. Gravity signatures of the Gibraltar Strait 51-58
Bakkali, Saad; Amrani, Mahacine.
5. Influencia de la distancia epicentral sobre los factores de reducción por ductilidad 59-79
Vielma, Juan Carlos; Lobo, William; Rivero, Pedro.
6. Diseño no lineal del AVR de un generador sincrónico 81-93
Araya, Eddie.
7. Despacho óptimo de MVAR en sistemas de potencia 95-104
Acuña, Marco; Araya, Eddie.
8. El concepto de calidad: un marco conceptual 105-119
Herrera, Rodolfo.

Nota técnica

9. Aspectos teóricos y aplicaciones de la operación unitaria de cristalización 121-131
Aguilar, Noé; Román, Carlos.

Normas

Normas para la presentación de artículos a la Revista Ingeniería..... 133-138



EDITORIAL DE LA UNIVERSIDAD DE COSTA RICA

<http://www.revistaingenieria.inii.ucr.ac.cr>
www.ucr.ac.cr
ISSN 1409-2441

Ingeniería

Revista de la Universidad de Costa Rica

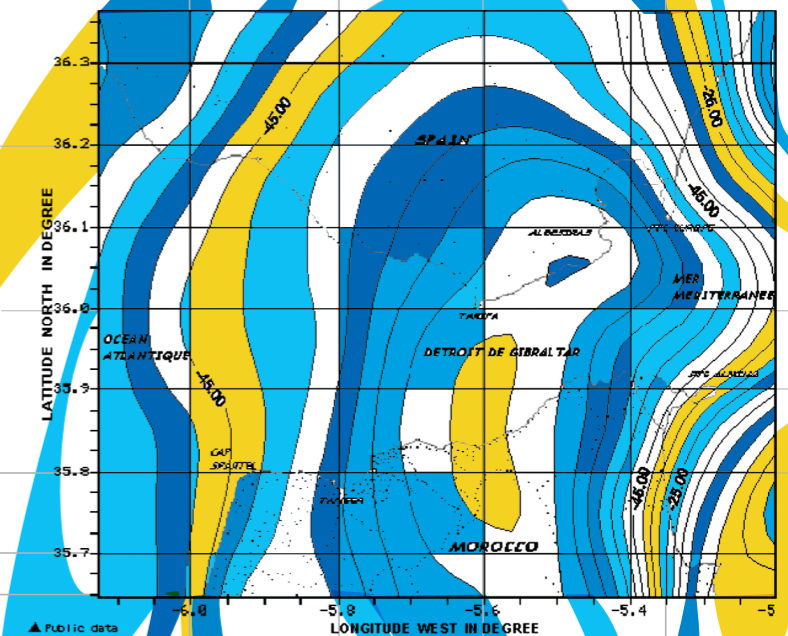
ENERO/JULIO 2006 - VOLUMEN 16 - Número (1)

Número (1)

Enero / Julio 2006

Volumen 16

REVISTA INGENIERÍA



ASPECTOS TEÓRICOS Y APLICACIONES DE LA OPERACIÓN UNITARIA DE CRISTALIZACIÓN

*Noé Aguilar Rivera
Carlos Román Gamboa*

Resumen

La cristalización es la operación unitaria basada en la formación de sólidos cristalinos en el seno de una solución homogénea; la formación de los cristales toma bases científicas para la obtención de productos derivados de las actividades industriales. Tradicionalmente, la cristalización discontinua o "batch" ha sido empleada para extraer el azúcar (sacarosa) del jugo de la caña recién cortada. Esta tecnología es bien conocida por los técnicos y no genera problemas de manera especial, pero, la falta de información científica disponible para el control de parámetros del proceso, es aún causa de dificultades. Este trabajo hace una revisión de los aspectos teórico-prácticos de la operación unitaria de cristalización y las oportunidades que actualmente se presentan en la industria azucarera en este sentido.

Palabras clave: industria azucarera, ingeniería, sacarosa, cristalización.

Abstract

The crystallization, is the process of formation of solid crystals from a homogeneous solution, it's a concept of unitary operations their formation takes scientific bases to obtain prime matters from industrial activities. Traditionally, the discontinuous "batch" crystallization has been used to extract sugar (sucrose) from freshly harvested sugarcane and is well known and given no special problem, but the no scientific information available for measurement control parameters used in this process are still the cause of difficulties. This work constitutes a review of the art and practice of the crystallization and of the opportunities that are offered in the important current moment to the sugar industry

Key words: sugar cane industry, engineering, sucrose, crystallization.

Recibido: 12 de diciembre del 2005 • **Aprobado:** 20 de enero del 2006

1. INTRODUCCIÓN

El azúcar de caña enfrenta una serie de dificultades comerciales ante el fenómeno de la globalización, así como la incorporación en el mercado de edulcorantes bajos en calorías en diversas presentaciones, aunado a las agresivas campañas publicitarias sobre los peligros del consumo de azúcar. Lo anterior hace que los países productores de azúcar de caña tengan que disminuir costos de producción mediante la optimización, la modernización de la agricultura y la industrialización de los derivados, lo cual permite hacer más rentables las economías azucareras. Para acelerar el incremento de ingresos netos mediante la disminución de los costos, el

programa de reingeniería del proceso del azúcar debe plantear una cuidadosa y técnicamente fundamentada selección de las instalaciones industriales de mejor desenvolvimiento operacional y mayor eficacia productiva. En este sentido, los esfuerzos de desarrollo de la industria azucarera mexicana deberán incrementar la eficiencia técnica y económica de las fábricas existentes, capaces de autoabastecerse de energía y aun tener excedentes; las líneas de desarrollo y transformación de los ingenios deberán configurarse bajo las siguientes características:

- Un alto grado de preparación, disminución del peso de los molinos y de los niveles de agua extra necesaria en los molinos

(imbibición), así como total automatización con bajos niveles de mantenimiento a un alto nivel de extracción de jugos.

- Transferir la tecnología que permita reducir el consumo de energía, sin afectar la producción del azúcar.
- Elaborar una estrategia ambientalmente compatible, energética y económicamente competitiva en la industria de azúcar, así como producciones diversificadas a través de acciones específicas para cada instalación de las diferentes zonas del territorio.
- Determinar las mejores condiciones de operación en las etapas de fermentación y reparación en las industrias productoras de alcohol y levaduras.
- Introducir esquemas tecnológicos avanzados en las diferentes etapas de los procesos de producción de azúcar y otros derivados de la caña de azúcar que favorezcan la compactación del proceso y la competitividad de los productos.
- Desarrollar tecnologías que permitan una mayor producción de azúcar. Introducir innovaciones tecnológicas en la industria con el objetivo de asegurar, en cantidad y calidad, la producción de azúcar.
- Aumentar la eficiencia de los diferentes procesos empleados en la producción de azúcar para incrementar el recobrado de los azúcares que entran en la fábrica y el rendimiento en azúcar de la industria. O sea, trabajar para producir una mayor cantidad de este producto a partir de igual cantidad de caña molida.
- El mantenimiento industrial, después del periodo de zafra, es una vía para disminuir o eliminar la importación de componentes y repuestos, y de evitar o disminuir las roturas e interrupciones operativas que inciden desfavorablemente sobre la operación de las fábricas al detenerse la producción durante la molienda de caña, lo que afecta la eficiencia del proceso e incrementa el costo de producción de la sacarosa.
- Introducir nuevos materiales con diseños que impidan las incrustaciones y maximicen la transferencia de calor.
- Incrementar el empleo de acero inoxidable, plásticos, recubrimientos especiales en tanques y tuberías y materiales no convencionales, así como la introducción de métodos químicos y físicos para esterilizar y purificar.
- Maximizar la eficiencia energética de generación de vapor a partir de bagazo, mediante el secado de este con gases de combustión y energía solar.
- Desarrollar generadores de vapor con alta superficie de transferencia y altas presiones.
- Emplear sistemas de cogeneración para suministrar energía eléctrica a la red local.
- Desarrollar el mantenimiento con técnicas de recuperación de piezas y métodos para la detección de fallas, grietas y espesores.
- Mejorar los problemas de lubricación, soldadura, inventarios, repuestos críticos, en cuanto a su calidad y diversidad.
- Transferir la tecnología de uso de lubricantes biodegradables para disminuir la contaminación.
- Transferir la tecnología en sistemas de agotamiento de mieles con el fin de reducir las pérdidas de sacarosa en las mieles finales.
- Transferir tecnología para la diversificación de los subproductos de la agroindustria azucarera (miel, alcohol, bagazo, cachaza).
- Transferir tecnologías que diversifiquen el uso de la sacarosa.

- Capacitar en normas de certificación de calidad del producto.
- Transferir tecnología para el uso eficiente del agua en todo el proceso industrial.
- Transferir tecnología para reducir las emisiones contaminantes en las calderas.
- Transferir tecnología para el tratamiento de aguas residuales para su uso en el riego agrícola.
- Transferir tecnología para la comercialización de subproductos agroindustriales de la caña de azúcar.
- Perfeccionar la gerencia del proceso de producción de azúcar, considerando incluso su vinculación al proceso de innovación tecnológica.
- Perfeccionar y tecnificar los cristalizadores batch (tacho o pan) y continuos desde el punto de vista del conocimiento del fenómeno de la formación del cristal de azúcar, estabilidad en la operación y automatización (García, 2003) y (Williams, 2001).

Este Programa de reestructuración integral de la producción de azúcar identifica tres direcciones estratégicas:

- Disminución de los costos de producción de azúcar.
- Diversificación integral de todo el proceso productivo.
- Sostenibilidad de todo el proceso.

Para acelerar el incremento de ingresos netos mediante la disminución de los costos y del impacto ambiental es necesaria la cuidadosa y técnicamente fundamentada, en la industria del conocimiento, selección, modificación, y/o reingeniería de las instalaciones industriales de mejor desenvolvimiento operacional, mayor eficacia productiva y más alto potencial para la

diversificación de su producción, una de estas áreas de oportunidad es la etapa de cristalización de azúcar de caña.

2. TEORÍA BÁSICA DE LA CRISTALIZACIÓN

Los cristales, como el de azúcar de caña, debido a sus formas regulares, y en ocasiones también a su belleza, han atraído la atención del hombre desde tiempos remotos. El conocimiento de los cristales se inició a través del estudio de la composición mineralógica y de su estructura cristalográfica. Actualmente, se publican aproximadamente unos dos mil trabajos por año que tratan sobre todas las ramas de la cristalización. La cristalización es una de las primeras operaciones de la Ingeniería Química utilizada comercialmente, ya que en la antigua China se producía sal de cocina mediante este proceso. Este interés no es sorprendente, pues la cristalización representa un proceso vital en muchas ramas de la industria de nuestros tiempos como la azucarera, química, farmacéutica, biotecnología, electrónica, etc. A pesar de este interés, la cristalización se considera en la actualidad como una ciencia y un arte. Esto es debido a la transición de fases líquido-sólidas que la cristalización supone. Este tipo de transición aún no se conoce totalmente, y la fisicoquímica la describe insuficientemente, al contrario de lo que ocurre con las transiciones gas-líquido.

La cristalización se puede dividir en muchos subgrupos, tales como preparación de cristales individuales (monocristales), cristalización en masa, producción de capas delgadas, cristalización de azúcares, solidificación de metales, biomineralización, etc. Sin embargo, todos ellos están gobernados por los mismos principios y procesos (nucleación, crecimiento cristalino, cambios secundarios), que son básicamente idénticos (Bolaños, 2000). La importancia de la cristalización dentro de la industria azucarera es aún mayor, ya que de esta etapa del proceso depende el tamaño del producto final que son los cristales de azúcar como tales, y por consecuencia, de ello depende también la

calidad, el tamaño y la forma del cristal. En una palabra, es el alma de todo el proceso productivo, desde que se recibe la caña en el patio de recepción de materia prima (batey) hasta que emerge como producto final envasado.

La cristalización es la conversión de una o algunas sustancias de un estado sólido amorfo, líquido o gas, al estado cristalino. Para que los cristales puedan ser formados o exista su crecimiento, se requiere de una fase líquida sobresaturada, la cual puede ser obtenida por el enfriamiento de una solución. La cristalización tiene como finalidad obtener un producto que tenga una distribución de tamaño de cristal (DTC) específica, tamaño de grano y pureza definidos, en lugar de un producto aleatorio (Rawlings et al., 1993).

La cristalización es importante como proceso industrial por los diferentes materiales o productos que se obtienen y que pueden ser comercializados en forma de cristales, como el caso particular del azúcar de caña o sacarosa. Su empleo tan difundido se debe, probablemente, a la gran pureza y la forma atractiva del producto químico sólido que se puede obtener a partir de soluciones relativamente impuras como la meladura o jugo de caña concentrado en evaporadores de múltiple efecto, en un solo paso de procesamiento. La cristalización requiere mucho menos energía para la separación, en comparación con la destilación y otros métodos de purificación utilizados comúnmente. Además, se puede realizar a temperaturas relativamente bajas y a una escala que varía desde unos cuantos gramos hasta miles de toneladas diarias. La cristalización se puede realizar a partir de un vapor, una fusión o una solución (Perry & Green, 2001).

Algunos factores importantes en la operación industrial de los cristalizadores de azúcar (tachos) involucran:

- Distribución del tamaño del cristal de sacarosa (DTC)
- Pureza del cristal
- Contaminación

- Estabilidad del cristizador

Todos estos factores interactúan fuertemente con la DTC producida y son considerados como problemas. El mecanismo principal de interacción de estos factores con la distribución de tamaño de partícula (DTP) del azúcar es el nivel de sobresaturación en el proceso (Randolph & Larson, 1971). La sobresaturación en cristalizadores “batch” es usualmente generada por uno de los tres métodos siguientes:

- a) En cristalizadores por enfriamiento, la sobresaturación es generada por la reducción de la solubilidad con la temperatura; el volumen del sistema se vuelve aproximadamente constante.
- b) En cristalizadores por evaporación, la sobresaturación es producida por la disminución del solvente con la subsecuente reducción del volumen con el tiempo; la solubilidad del soluto permanece casi constante, si la operación se asume isotérmica.
- c) En cristalizadores por disolución, la sobresaturación es generada por la adición de un diluyente que reduce la solubilidad del soluto y el volumen del sistema se incrementa consecuentemente con el tiempo (Tavare, 1980) y (Grases, 2000).

3. SOBRESATURACIÓN EN UNA SOLUCIÓN DE SACAROSA (MELADURA)

El número de colisiones entre unidades elementales (átomos, iones, moléculas) en la fase fluida o en la interfase de la fase cristalina de la sacarosa, depende del número de unidades por unidad de volumen de la fase líquida (meladura):

$$\frac{\text{Número de unidades}}{\text{Volumen de la fase líquida}} = \frac{nN_A}{V} = CN_A \quad (1)$$

donde C (mol/L o kmol/m³) es la concentración molar y N_A es el número de Avogadro. Por razones prácticas, la concentración masa ρ es frecuentemente utilizada:

$$\rho = CM \left[\frac{\text{kmol}}{\text{m}^3} \cdot \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} [=] \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} [=] \frac{\text{g}}{\text{dm}^3} [=] \frac{\text{g}}{\text{L}} \right] \quad (2)$$

Además de las concentraciones volumétricas, resulta útil también usar la fracción mol (y) o la fracción masa (w), como también la razón mol (Y) o la razón masa (W).

Una fase fluida saturada (meladura) que tiene concentración C^* o ρ^* está en equilibrio termodinámico con una fase sólida (sacarosa) a una temperatura pertinente. Si la solución es líquida, la concentración de saturación depende fuertemente de la temperatura y sólo ligeramente de la presión. Si una fase fluida tiene más unidades que C^*N_A se dice que está sobresaturada o supersaturada. El proceso de cristalización puede tomar lugar solamente en fases sobresaturadas y la velocidad de cristalización es frecuentemente determinada por el grado de sobresaturación. La sobresaturación es expresada como una diferencia en concentración:

$$\Delta C = C - C^* \quad (3)$$

$$\Delta \rho = \rho - \rho^* \quad (4)$$

o como la sobresaturación relativa:

$$S_r = \frac{C - C^*}{C^*} \quad (5)$$

$$\sigma = \frac{\Delta C}{C^*} = \frac{\Delta \rho}{\rho^*} \quad (6)$$

En el caso de que la concentración de soluto en la solución sea menor que la concentración de saturación y que existan cristales de sacarosa en el seno de la meladura, se producirá el fenómeno inverso a la cristalización, la dilución (Mersmann, 1995).

4. SOLUBILIDAD

La concentración de saturación de la sacarosa en un solvente es obtenida experimentalmente por la determinación de la máxima cantidad que es soluble. La solubilidad frecuentemente se incrementa con la temperatura, pero existen otros sistemas donde la concentración de saturación permanece casi constante o decrece, cuando se incrementa la temperatura. Los datos experimentales generalmente se reportan en gráficos llamados diagramas de solubilidad, existen gráficos x - y para componentes anhidros y componentes hidratados o diagramas triangulares donde se reporta información de sistemas multicomponentes (disolución de dos sustancias en un solvente) (Perry & Green, 2001) y (Grases, 2000).

5. CINÉTICAS DE LA NUCLEACIÓN DEL CRISTAL DE SACAROSA

Los fenómenos cinéticos que influyen directamente en la distribución de tamaño de cristal de sacarosa son la nucleación y el crecimiento, aunque la rotura y aglomeración de los cristales pueden tener gran importancia en algunos sistemas (Rawlings et al., 1993).

La fuerza impulsora para que la nucleación y crecimiento tengan lugar, es la sobresaturación de la meladura. Esta varía dependiendo de las diferentes zonas que pueden ocurrir durante el enfriamiento de una solución y permite que la nucleación y el crecimiento existan simultáneamente y compitan por el soluto disponible. En la Figura 1 se ilustran algunos tipos de procesos de nucleación y las diferentes zonas de sobresaturación. La zona inestable corresponde a la zona donde ocurre la nucleación espontánea homogénea o heterogénea de una fase sólida. La zona metaestable corresponde a la zona en la cual la nucleación homogénea y heterogénea no ocurrirá inmediatamente, pero sí el crecimiento de cristales de sacarosa y la zona insaturada corresponde a la región en donde no hay formación ni crecimiento de cristales.

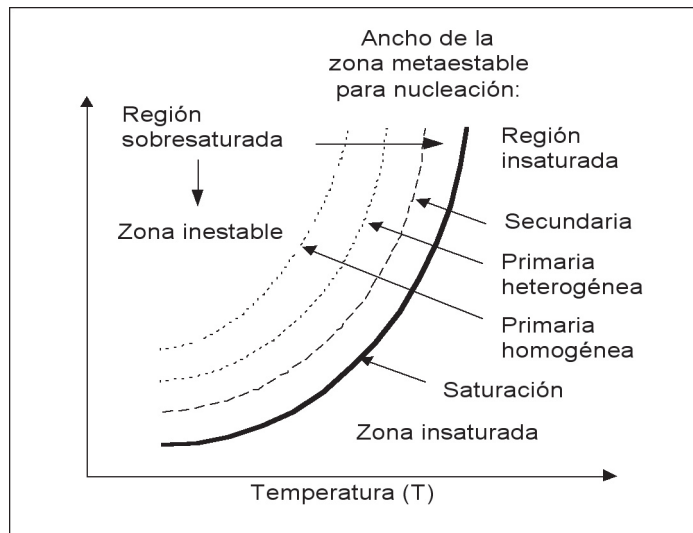


Figura 1. Procesos de nucleación y las diferentes zonas de sobresaturación

Fuente: (Rawlings et al., 1993).

6. NUCLEACIÓN Y LA ZONA METAESTABLE

La velocidad de nucleación, la cual aparece como una condición frontera en $L = 0$ para el balance de población, es generalmente el factor dominante que influye en la distribución de tamaño de cristal de sacarosa. La nucleación es también el proceso menos entendido de los dos procesos involucrados en la cristalización de azúcar y el más difícil para ser descrito por expresiones cinéticas (Botsaris, 1980). Los procesos cinéticos de nucleación requieren de la sobresaturación para que los núcleos sean formados y después crezcan. El sistema intenta alcanzar el equilibrio termodinámico a través de la nucleación y el crecimiento del núcleo del cristal de sacarosa. Si una solución no contiene partículas sólidas extrañas ni cristales de su propio tipo, el núcleo puede ser formado solo por nucleación homogénea. Si algunas partículas extrañas están presentes, la nucleación se facilita y el proceso es conocido como nucleación heterogénea. Ambas nucleaciones, la homogénea y la heterogénea, toman lugar en ausencia de cristales de la propia solución y son colectivamente conocidas como nucleación primaria. Esto ocurre cuando la

sobresaturación metaestable ΔC_{met} es obtenida en el sistema.

En la cristalización comercial de la sacarosa en el tacho o cristizador, se ha observado continuamente que la nucleación ocurre hasta en niveles muy bajos de sobresaturación $\Delta C < \Delta C_{met}$ cuando existen cristales propios de la solución; por ejemplo, en la forma de fragmentos agotados o en el sembrado de cristales. Tales nucleaciones son conocidas como nucleación secundaria, la cual puede definirse como la nucleación que toma lugar solo por la previa presencia de cristales del material que empieza a ser cristalizado. Se sabe también que existen diferencias entre nucleaciones secundarias resultantes de contacto, rotura, abrasión, agotamiento y fraccionamiento de los cristales de azúcar. Algunos autores como (Grases, 2000) y (Botsaris, 1980), han clasificado el mecanismo de nucleación secundaria en aparente, verdadero y de contacto. La Figura 2 ilustra la clasificación de los mecanismos de nucleación.

La nucleación secundaria aparente es un caso trivial y se refiere; por ejemplo, al lavado de pequeños fragmentos de la superficie de un cristal

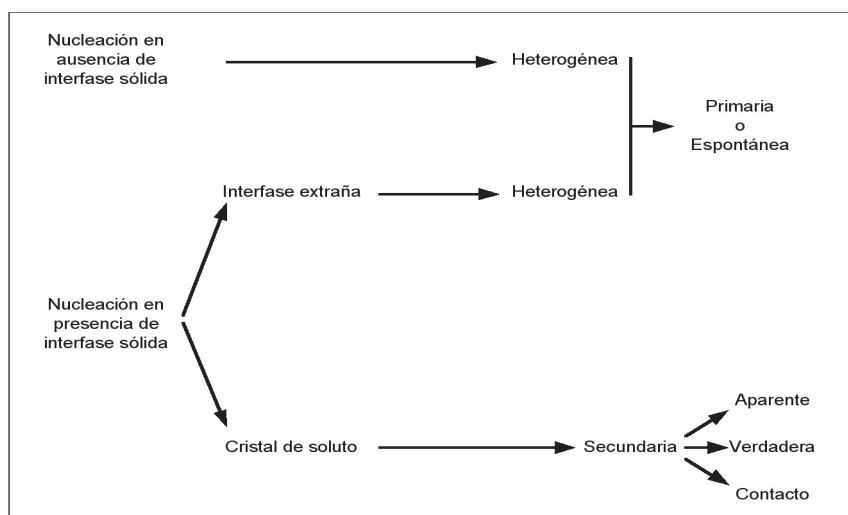


Figura 2. Clasificación de la nucleación

Fuente: (Botsaris, 1980)

seco, cuando este es introducido en la solución. La única operación de cristalización industrial de sacarosa donde tal mecanismo puede ser importante, es cuando los cristalizadores son sembrados con material fresco, como es algunas veces practicado en la cristalización “batch” (tacho o pan). En la nucleación secundaria verdadera, la presencia de cristales de soluto es prevista por la perturbación de la distribución de estado estable de los agregados ordenados o “embriones” presentes en la solución. Bajo tales condiciones, la introducción de “embriones” más pequeños que el tamaño de cristal puede aparentemente sobrevivir y llegar a ser núcleos. La nucleación secundaria de contacto ha sido más ampliamente estudiada que las otras categorías. Según (Garside & Davey, 1980), el contacto entre un cristal creciente y las paredes del contenedor (tacho o cristalizador “batch”), el agitador o la bomba impulsora u otros cristales, conducen a la formación de un núcleo de contacto.

7. CRECIMIENTO DEL CRISTAL DE SACAROSA

Una vez que los cristales de sacarosa han sido producidos por el proceso de nucleación, estos

crecerán. El tamaño del cristal (frecuentemente el factor de mayor importancia) y la forma o hábito, son propiedades comunes del cristal relacionadas con el proceso de crecimiento. La pureza del cristal, perfección, dureza y la resistencia a la abrasión son otros parámetros que frecuentemente determinan las características de un cristal en particular. El proceso del crecimiento del cristal puede ser descrito por diferentes escalas: nivel molecular, microscópico y macroscópico (Bolaños, 2000).

En el nivel molecular, las unidades de crecimiento están previstas para sujetarse a la superficie del cristal de sacarosa, difundirse sobre esta superficie y, eventualmente, integrarse en el enrejado de un sitio de pliegue o retornar a la fase fluida. La suerte de alcanzar tal sitio depende del pliegue en la superficie. Así, el mecanismo y velocidad de crecimiento dependen de la naturaleza de la superficie del cristal en el nivel molecular. En una superficie rugosa hay muchos sitios de pliegues potenciales y ni la difusión superficial, ni detalles finos de la topografía superficial, son importantes. Bajo tales condiciones continuas, son usados los modelos de crecimiento normal. Por otro lado, cuando la interfase es lisa, el crecimiento es más difícil. Los sitios de pliegue sólo están

presentes en el borde de núcleos bidimensionales o en escalones de superficie. La difusión superficial de las unidades de crecimiento es ahora probablemente importante y la topografía de superficie debe ser definida. Los modelos de crecimiento por capa son ahora aplicables. En la escala microscópica, se observan frecuentemente las capas superficiales o grupos de escalones. Estos son varios cientos de dimensiones atómicas y están formados de grupos de pequeños escalones que han llegado a agruparse, probablemente por las perturbaciones en las velocidades progresivas de un tren equidistante de escalones. Todavía en el nivel macroscópico, los efectos de las limitaciones de transporte sobre la velocidad de crecimiento pueden ser vistos. La transferencia de calor rara vez controla las velocidades de crecimiento del cristal de sacarosa, pero las limitaciones de transferencia de masa son frecuentemente importantes. Los gradientes de sobresaturación resultantes en la solución pueden influenciar los perfiles superficiales y causar inestabilidad en el proceso de crecimiento y provocar cristales amorfos.

8. ETAPAS DEL CRECIMIENTO DEL CRISTAL DE SACAROSA

Elwell y Scheel (1975) describen dos tipos de sitios superficiales donde los átomos (o unidades

de crecimiento) pueden ser integrados en la estructura del cristal de sacarosa creciente: un sitio escalón y un sitio de pliegue. Como se ilustra en la Figura 3, un sitio escalón es una localización donde dos uniones cercanas pueden ser hechas por un átomo y un cristal. Un sitio de pliegue es una localización donde tres uniones cercanas pueden ser hechas con el cristal. El proceso de crecimiento del cristal sacarosa dentro del tacho ocurre en las siguientes etapas:

1. Transporte de soluto de la solución a la superficie del cristal.
2. Adsorción en la superficie del cristal.
3. Difusión sobre la superficie.
4. Fijación en un escalón.
5. Difusión a través de un escalón.
6. Integración en el cristal en un punto de pliegue.
7. Difusión de moléculas del solvente afuera de la superficie del cristal.
8. Liberación de calor de cristalización y su transporte lejos del cristal.

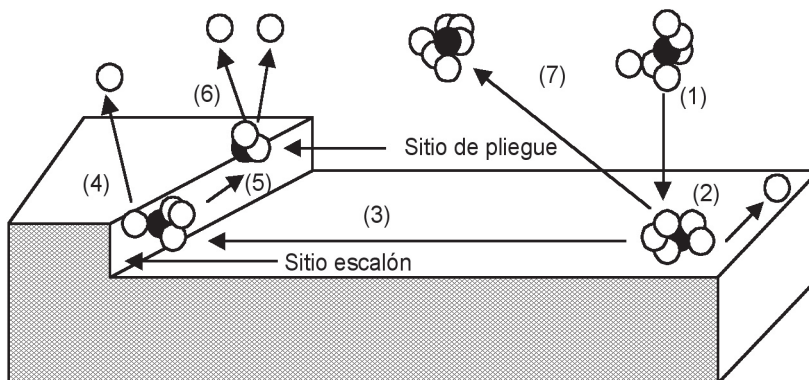


Figura 3. Etapas de crecimiento de un cristal. Movimientos de la molécula de soluto solvatada

Fuente: (Elwell & Scheel, 1975).

El sembrado con una distribución angosta de productos de cristales de sacarosa previene la nucleación espontánea y resulta en una mejor DTC. El sembrado es frecuentemente manual. El tiempo de adición de los cristales sembrados es crítico y debe ser al principio de la operación, cuando la nucleación espontánea es nula. El grado de nucleación o sembrado al inicio del “batch” puede algunas veces determinar la distribución de tamaño de cristal de azúcar. El fin es hacer crecer sólo los cristales sembrados. Sobresaturaciones pequeñas dan como resultado velocidades de crecimiento bajas, requiriéndose largos ciclos de “batch”, mientras que una sobresaturación que produce velocidades grandes de crecimiento, puede originar una nucleación excesiva al principio del “batch” o presentarse nucleación indeseable durante todo el ciclo. En este trabajo, se considera el sembrado de cristales de sacarosa en la solución, la cual tiene gran influencia sobre el balance de población y la DTC. Con el sembrado de cristales en cristalizadores “batch”, seguido por enfriamiento o evaporación (transferencia de energía programada), es posible controlar la distribución del tamaño de partícula y determinar la velocidad máxima permisible de crecimiento (Genck, 1991).

9. ESTRUCTURAS Y SISTEMAS CRISTALINOS

Si bien es cierto que los cristales son sólidos con arreglos periódicos tridimensionales de unidades (átomos, iones, moléculas) en un enrejado espacial, los cristales por su perfecta estructura organizada, difieren de los sólidos amorfos, resultado de las variadas fuerzas de enlace. El enrejado cristalino de un cristal ideal está hecho de celdas elementales cuyas esquinas, superficies lisas y centros espaciales tienen componentes ordenados sobre ellos para formar estructuras completamente regulares en su forma. Las celdas elementales determinan un sistema coordinado con ejes x , y , z y ángulos α , β y γ . Los cristales de diferentes sustancias, incluida la sacarosa, varían en sus longitudes elementales a , b , c y en el tamaño de sus ángulos (Ver Cuadro 1). Una distinción se hace entre al menos seis

sistemas cristalinos diferentes, dependiendo del arreglo periódico espacial de los componentes (Ver Figura 4). La figura externa de un cristal formado no es completamente determinada por el tipo de enrejado. Se requiere información de las superficies interfaciales, las cuales son representadas por una red de planos con una alta densidad de componentes elementales. Las condiciones de crecimiento pueden caracterizar la impresión externa general o hábito de los cristales de la misma sustancia en diferentes maneras, para la formación de la misma periferia (Mersmann, 1995).

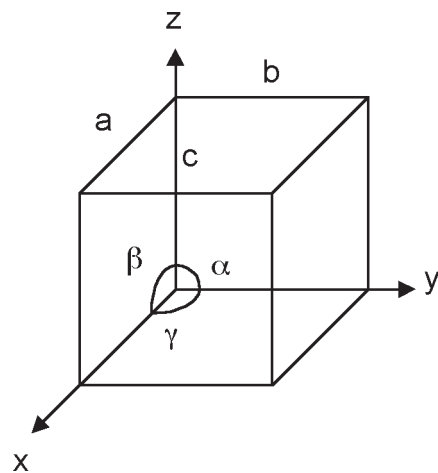


Figura 4. Celda elemental de un cristal ideal.

Fuente: (Smythe, 1971)

10. APLICACIONES INDUSTRIALES

La fabricación de monocristales, como el caso de la sacarosa, puede considerarse en la actualidad como una importante rama en la industria. A pesar de que se fabrican monocristales de sustancias diferentes a la sacarosa en cantidades que a menudo no superan una tonelada al año en todo el mundo, la importancia de este sector para la técnica moderna es absolutamente excepcional. Estos se ocupan principalmente en artículos de decoración, en construcción de aparatos ópticos, en la fabricación de cojinetes y fieles de balanza, en ventanillas transparentes resistentes a altas temperaturas de hasta 1300 °C y presión de 2000

Cuadro 1. Sistemas cristalinos más comunes

Sistema cristalino	Longitud elemental	Ángulo de ejes
Triclínico	$a \neq b \neq c$	$\alpha \neq \beta \neq \gamma$
Monoclínico	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$
Ortorrómbico	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
Tetragonal	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
Hexagonal	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$
Trigonal romboédrico	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$

Fuente: (Perry & Green, 2001)

atm., para moduladores de rayos láser, esto debido principalmente debido a sus propiedades físicas (color y brillo) y ópticas (alto índice de refracción, anisotropía, doble refracción, etc.) (Bolaños, 2000).

En la cristalización industrial en masa se forman y crecen al mismo tiempo millones de cristales, las aplicaciones con respecto a esta forma se hacen mediante el aislamiento y limpieza de productos finales e intermedios de productos químicos, actualmente se producen cien millones de toneladas de sal de cocina, más de sesenta millones de toneladas de azúcar, más de treinta millones de toneladas de soda y otras grandes cantidades de muchos otros productos. La gran importancia de la cristalización en la tecnología química queda demostrada si se considera que gran parte de la producción orgánica e inorgánica ha pasado por esta operación en al menos uno de los pasos de su fabricación. La biomineralización también es una aplicación importante, ya que es una secuencia de acontecimientos a través de los cuales los organismos vivos producen minerales que cristalizan, y que unidos entre sí contribuyen a la formación de piezas duras, mismas que están formadas por el mismo principio y están compuestas por sustancias orgánicas e inorgánicas. Existen también procesos patológicos de biomineralización, como la formación de cálculos renales, vesícula biliar, etc.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bolaños, R. E. (2000). *Control y optimización de las condiciones de operación de cristalizadores batch por enfriamiento*. Tesis para la obtención del título de Doctor en Ciencias en Ingeniería Química, Instituto Tecnológico de Celaya, Celaya Guanajuato, México.
- Boltsaris, G. D. (1980). *Lecture at British Association for crystal growth meeting on secondary nucleation. Industrial crystallization*. New York: Plenum Press.
- Elwell, D. & Scheel, H. (1975). *Crystal growth from high-temperature solutions*. London: Academic Press.
- García, A. (2003). Necesidad vital de la asistencia técnica y capacitación. *Revista de la Asociación de Técnicos Azucareros de México*, 4 (10), 22-27.
- Garside, J. & Davey, R. J. (1980). Secondary contact nucleation: Kinetics, growth and scale-up. *Chem. Eng. Commun.*, 4, 393-424.
- Genck, J. (1991). Control crystal size distribution from batch crystallizers. *Chemical Processing*, 50-55. Extraído 11 noviembre del 2005 de <http://www.chemicalprocessing.com/>.

Grases, F.; Costa, A. & Söhnel, O. (2000). *Cristalización en disolución*. Barcelona, España: Reverté.

Mersmann, A. (1995). *Crystallization technology handbook*. New York: Marcel Dekker, Inc..

Perry, R. & Green, D. (2001). *Manual del Ingeniero Químico*. México: McGraw-Hill.

Randolph, A. & Larson, M. (1971). *Theory of particulate processes*. New York: Academic Press.

Rawlings, J.; Miller, S. & Witkowski, W. (1993). Model identification and control of solution crystallization process: a review. *Ind. Chem. Res*, 32.

Smythe, B. M. (1971). Sucrose crystal growth. *Sugar Technology Reviews*, 3(1), 191-231.

Tavare, N. S. & Garside, J. (1986). Simultaneous estimation of crystal nucleation and growth kinetics from batch experiments. *Chem. Eng. Res*, 64.

Williams K. (2001). Recent developments in the sugar industry. *International Sugar Journal*, 1225 (103).

SOBRE LOS AUTORES

Noé Aguilar Rivera

Ingeniero Químico

Profesor Investigador

Universidad Veracruzana

Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias.

Carretera Peñuela-Amatlán de los Reyes S/N. km 1. Córdoba Veracruz México

Teléfono: (52) 271 71 6 64 10

Correo electrónico: naguilar@uv.mx

Carlos Román Gamboa

Ingeniero Químico

Universidad Veracruzana

Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias

Carretera Peñuela-Amatlán de los Reyes S/N. km 1. Córdoba Veracruz México

Teléfono: (52) 271 71 6 73 92

Correo electrónico: coro02@hotmail.com