



**Universidad de Matanzas
Facultad de Ingenierías Química-Mecánica**

MONOGRAFÍA

AGOTAMIENTO DE MIELES EN LA INDUSTRIA AZUCARERA

Autor: Dr. Félix Juan Domínguez Alonso
Colectivo de Análisis de Procesos
Facultad de Ingenierías Química y Mecánica

Dr. Tito Díaz Bravo
Dpto de Informática
Escuela Latinoamericana de Medicina

**Matanzas
2003**

Introducción

El central azucarero tiene como objetivo principal de sus operaciones, la extracción de la mayor cantidad posible de la sacarosa contenida en la caña que reciben en sus molinos.

Sin embargo, a lo largo del proceso van a surgir cuatro pérdidas que contrarrestan la eficiencia de la fábrica, puesto que van a constituir fugas de azúcar no recuperada y por lo tanto, no disponible para la economía nacional. Estas pérdidas se pueden enumerar como siguen:

- ? Pérdidas en bagazo
- ? Pérdidas en cachaza
- ? Pérdidas indeterminadas
- ? Pérdidas en miel final

Aunque la reducción de cada una de éstas pérdidas es de gran importancia, las pérdidas en miel final, por su magnitud y volumen ocupan un lugar preponderante, motivo de preocupación para los técnicos azucareros del país, dada la tendencia a incrementarse que se observa durante las últimas tres décadas [Domínguez (1993); Martín (1998), Guerra (1999), Casanova y Lodos (2000)].

A lo antes expuesto le se puede agregar que, influenciado por los cambios económicos ocurridos a nivel internacional, durante la década pasada la industria azucarera se ha visto muy afectada teniendo un descenso en la producción que llegó a alcanzar el 16, % en la zafra de 1995.(Rabassa, 1999). Lo dicho hasta aquí motiva que desde la década de los 80, varias universidades y centros de investigación de nuestro país centren su atención en buscar vías y métodos para disminuir las pérdidas en mieles finales, como una vía para incrementar la producción de azúcar y con ello disminuir los costos de producción. Un ejemplo de ello es el proyecto de investigación "Miel Final" presentado al CITMA en 1997, donde participan un gran número de instituciones científicas.

Si se considera que *"...cualquier país que quiera mantenerse en el mercado internacional como productor de azúcar en el año 2000, tendrá que disminuir sus costos de producción a través del aumento del rendimiento agroindustrial, haciendo más competitivos sus productos"* (GEPLACEA, 1995), por lo que puede señalarse que es un reto disminuir los costos y un problema científico de gran importancia, y más en Cuba, bajo las condiciones actuales, si se tiene en cuenta que en la década del 80, caracterizada por cierta estabilidad en la producción azucarera, el costo de producción de una tonelada de azúcar

fue del orden de los 290,96 USD, ocupando el lugar 17 entre los países cañeros. (Domínguez, 1997).

La solución a este problema anterior no puede ser política de precios bajos que arruinen la competencia, pues arruina también a la industria de azúcar de caña. La solución entonces debe estar en la disminución de los costos de producción mediante la introducción sistemática de los resultados de la revolución científico técnica y la experiencia de vanguardia de otras ramas y de la propia industria azucarera.

Basado en lo anterior, este trabajo muestra una recopilación bibliográfica que incluye el análisis de la situación de agotamiento de mieles en Cuba y de los factores más influyentes en el mismo, así como una valoración crítica de diferentes métodos que pudieran ser usando para incrementar la eficiencia del proceso de cristalización de azúcar por enfriamiento.

1. ANÁLISIS CRÍTICO DE LA LITERATURA CONSULTADA

1.1. Situación actual del agotamiento de mieles en Cuba.

En la década del 50 los ingenios cubanos (Pedrosas Puerta, 1975) presentaban caídas de pureza de masa a miel superiores a 25 puntos en la masa cocida final, y en una gran mayoría eran superiores a 30; y valores superiores a 20 puntos para las masas cocidas comerciales. Sin embargo, en la provincia de Matanzas [Domínguez (1993); ICINAZ.(1995); Martín (1998); Díaz (1998) y Guerra (1999)] se observan muy pocas empresas azucareras con caídas de pureza superiores a 25 puntos en la masa cocida final, evidenciándose una tendencia a disminuir éstas. De forma similar, para las masas cocidas comerciales existe una tendencia a la pérdida de eficiencia observándose que se incrementan los centrales con caídas de pureza inferiores a 15 puntos para estas masas, lo cual puede considerarse como crítico. Estudios realizados en otras provincias [Rodríguez, Anzardo y Santana (1989); Rodríguez et al. (1989); Domínguez et al. (1993); Lodos, Rodríguez y Rostgard (1998a,b); Casanova y Lodos (2000) y Rabassa (1999)] muestran comportamientos similares al obtenido en Matanzas, lo que indica que la pérdida de eficiencia en el proceso de cristalización no es un problema local de esta provincia, sino un problema que concierne a todo el país.

Motivado por lo anterior se reportan varios estudios del comportamiento de los parámetros fundamentales del proceso de cristalización, con vistas a establecer las posibles causales de estos malos agotamiento [Domínguez (1993); Lodos, Rodríguez y Rostgard (1998a,b); Martín (1998), Díaz (1998) y Casanova (1998)], pudiéndose destacar como significativos, los evidentes cambios de la calidad de la materia prima que se procesa hoy en día, observándose una tendencia a incrementar los no azúcares que entran al proceso lo cual motiva un incremento significativo de la viscosidad de los materiales y se correlaciona linealmente con la pérdida de eficiencia en el área de cristalización y con un incremento significativo de la producción de mieles.

A lo anterior debe añadirsele, para completar el criterio que se pueda hacer sobre la situación actual de este proceso, que en un curso para tecnólogos azucareros de alto nivel Haces (1984), se expone: *"Son muchos los factores que se deben controlar para realizar un agotamiento eficiente, tanto en tacho como en cristalizadores, por lo cual se han llevado a cabo muchos trabajos de investigación y se han hecho esfuerzos para desarrollar técnicas y métodos que permitan obtener cristales uniformes, así como aumentar el agotamiento de las masas de tercera; sin embargo las dificultades en el*

agotamiento, en el ámbito nacional, se han incrementado en las últimas zafras. Podrán plantearse que las condiciones climatológicas han sido adversas durante la cosecha y podrán referirse problemas generales y particulares en cada caso, pero lo cierto es que los resultados se empeoran cada vez más en este campo y que las soluciones que hace unos años eran clásicas para los problemas de agotamiento ahora ya son inoperables, por lo cual se impone un análisis científico técnico que contemple soluciones que normalmente nunca se han utilizado tanto dentro como fuera de la fábrica"

En la actualidad éste problema se ha acrecentado aún más, dado que en los comienzos de la década de los 90 ocurrió un deterioro sustancial de las zafras azucareras, asociado a las circunstancias de esa etapa inicial del período especial en el cual ha estado inmerso el país, que en la práctica industrial limitó severamente las posibilidades de continuar la realización de experiencias a largo alcance en toda la industria azucarera, y muy especialmente en el agotamiento de mieles, ya que en opinión de éste autor, la primera condición que se requiere para obtener buenos resultados en tal propósito, es lograr trabajar con molidas altas y estables.

1.2. Cristalización de azúcar. Factores que influyen en el mismo.

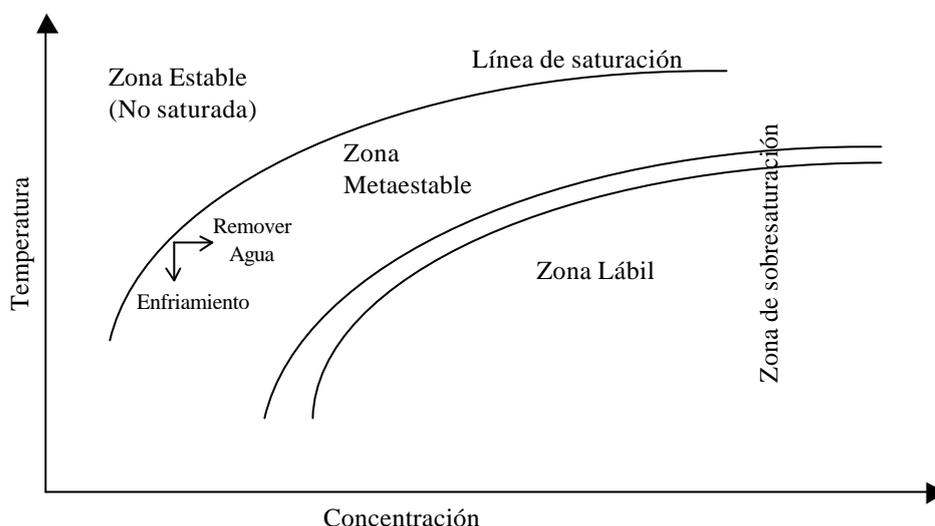
Según aparece en varios textos [Nyvlt, J. et al.(1995); Bostsaris and Tokoyra (1997); Ohtaki (1997); Myerson (1998); Mullin (1999); Chen and Chou (1999)] la cristalización en el seno de soluciones impuras, es un proceso químico-físico, y la formación y crecimiento de los cristales está asociado con la creación de cierto grado de inestabilidad en el medio, para conseguir que las moléculas del soluto, se difundan a través del seno de la misma y se depositen sobre los cristales ya presentes o formen nuevos cristales. La inestabilidad que se necesita en el medio, para que se formen nuevos cristales o crezcan los ya existentes, se obtiene manipulando la solubilidad del soluto en el sistema, es decir, mediante un estado de sobresaturación del sistema, por lo que la información de solubilidad es básica a la hora de seleccionar el método de cristalización que será usado.

Hoy en día existen varios libros y un gran número de artículos técnicos, donde aparece información sobre la solubilidad de diferentes sistemas y para el caso específico de la industria azucarera (Domínguez, 1997) se publica una amplia gama de información, la cual se puede clasificar dentro de dos grupos, debido a la **poca similitud** que existe entre ellos:

1. Datos de solubilidad para la industria de remolacha
2. Datos de solubilidad para la industria cañera,

Debe ser señalado que sobre los datos de la industria azucarera de caña, no existe mucha información de aplicabilidad general publicada, pues hay diferencias importantes entre ellos, que a criterios del autor del presente trabajo son motivadas por la influencia que ejerce sobre la solubilidad de las soluciones azucaradas impuras las sales inorgánicas presentes en las mismas, las que a su vez están influenciadas por múltiples causas agroindustriales y climatológicas de la región. [Marañón (1996); Voit (2000); Wright (2000)].

Muchas veces la información de solubilidad se publica en forma de diagramas, denominados Diagramas de Miers, los cuales son gráficos de concentración vs temperatura, en los que se representan las diferentes regiones o estados de saturación del sistema, según se muestra en la siguiente figura:



En el mismo se indica que cualquier combinación de temperatura-concentración que se ubique por encima de la línea de saturación, es indicativo de que la solución se encuentra insaturada, mientras que hacia debajo de ésta línea se encuentra la solución sobresaturada.

La gran mayoría de los autores, según Perry and Green (1999), subdividen en dos la zona de sobresaturación: Una zona donde es moderadamente superior a la unidad, que se denomina metaestable; y una zona de alta sobresaturación, por ende muy inestable, que se denomina zona lábil. En la zona metaestable sólo crecen los cristales existentes en el seno de la solución, mientras que en la zona lábil, además de crecer los existentes se forman nuevos cristales. Sin embargo en la literatura azucarera [Meade (1977), Hugot (1974), Guillet (1965), García López y Clark, 1970; Honing (1987); Carrazana (1982) y

Chen and Chou (1999)], se reconoce como otra zona independiente, a la zona de sobresaturación metaestable superior que le nombra zona intermedia, definiéndose ésta como una zona donde, además de crecer los cristales, también existe formación de nuevos cristales.

Basados en los principios anteriores se han diseñado y aplican a escala industrial las técnicas o métodos de cristalización siguientes [Perry and Green , 1999]:

- Disminuir la temperatura de solución
- Remover el solvente de la solución mediante evaporación.
- Enfriar al vacío la solución con calentamiento externo de la misma.
- Adicionar algún agente precipitante.
- Mediante combinación algunas de las técnicas anteriores.

A continuación y de modo sucinto se plantean algunos aspectos que caracterizan a estas técnicas.

Disminuir la temperatura manteniendo la concentración constante para lograr sobresaturar una solución con el objetivo de formar y/o crecer cristales, es el método más simple, antiguo y usado de los métodos de cristalización, y se le señala como desventaja fundamental el no poder ser usado cuando la solubilidad del soluto varía poco con la temperatura. [Perry and Green (1999) y Mersmann and Lofferman (2000)]

El método de cristalización por evaporación del solvente a temperatura constante, es también muy simple. Las desventajas fundamentales del mismo son: que no puede usarse para cristalizar solutos termolábiles y un costo energético elevado. Estos dos métodos son los de mayor uso en las aplicaciones industriales, según se indica en la literatura consultada.[Nyvlt, J et al., (1995); Perry and Green (1999); Mersmann et al (2000)].

La **cristalización al vacío con calentamiento externo** se usa para casos muy específicos de materiales que no permiten ser trabajados a altas temperaturas, y que presentan bajas solubilidades; es uno de los métodos menos usados en la actualidad. [Perry and Green (1999); Mersmann et al.(2000)].

La **cristalización por adición de agente precipitante**, es otro de los métodos tradicionalmente empleados en la industria química para generar sobresaturación en una solución. El mismo consiste [Cartón (1999); Lora et al.(2000) y Amaro (2000)] en adicionar un tercer agente al sistema que disminuya la solubilidad del soluto; este nuevo

componente puede ser un gas, un líquido o un fluido en condiciones supercríticas y en función de ello el método de cristalización recibe diferentes denominaciones, las cuales son:

- **Cristalización por cambio de solvente:** Cuando se refiere a la adición de un disolvente orgánico a una disolución acuosa se le nombra *drowning-out* o *solveting-out*, mientras que cuando se quiere la precipitación de una sustancia orgánica disuelta, mediante la adición controlada de agua, se le denomina *watering-out*. Este método, aunque es relativamente nuevo, ya se emplea en un grupo importante de aplicaciones industriales, fundamentalmente para precipitación de soluto de las disoluciones acuosas que presentan muy escasa variación de la solubilidad con la temperatura o en algunos casos que es necesario controlar la razón de formación y crecimiento de los cristales, así como su granulometría.
- **Cristalización Extractiva:** En este caso la solubilidad de ambos disolventes es parcial, por lo que se generan dos fases líquidas y la extracción de agua de la fase acuosa hacia la nueva fase induce a la precipitación del soluto. Esta es una técnica que se ha desarrollado a partir de la década de los 80 para cristalizar solutos termolábiles desde el seno de disoluciones acuosas que presentan muy escasa variación de la solubilidad con la temperatura, por lo que la generalidad de los trabajos se encuentran en un nivel de investigación de laboratorio o planta piloto.

En estos dos métodos que se acaban de reseñar, lo habitual es utilizar algún compuesto orgánico en condiciones moderadas de presión y temperatura como agente precipitante.

- **Cristalización Supercrítica:** Cuando como agente precipitante se usa un fluido comprimido en condiciones supercríticas o muy próximo a éstas. En tal caso, al disolverse el fluido a alta presión en el disolvente de la fase líquida se produce una expansión volumétrica de esta fase, disminuye el equilibrio de solubilidad y precipita el soluto. Los primeros estudios del proceso **GAS** (Gas Antisolvent Process) fueron presentados por Gallagher et al en 1989, según Cartón (1999), Lora et al. (2000) y Amaro (2000); y desde entonces se han realizados diferentes investigaciones aplicando este proceso para la cristalización, especialmente de compuestos orgánicos, farmacéuticos y polímeros, pero todos a escala de laboratorio y planta piloto.

En la última década se ha publicado un volumen grande de libros sobre diferentes aspectos de la operación unitaria de cristalización, que incluyen el análisis del proceso

industrial [Garcide (1991); Tavare (1995); NYVLT, J et al. (1995); Ohtaki (1997); Botsaris and Tayokura (1997); Myerson (1998) y Mullin (1999)] y estudios sobre la fenomenología, modelación y simulación de dicho proceso [Tiller (1991a); Tiller (1991b); Tiller (1992a); Tiller (1992b); Meadhra (1995)]; sin embargo no aparece ninguno que aborde la cristalización azucarera como tal, siempre haciéndose recomendación a los clásicos, cuando se refieren a equipos y tecnologías, y no se hace ninguna referencia sobre la modelación y simulación de dicho proceso, lo cual ha sido estudiado desde la década de los años 70, como se refleja en los trabajos presentados a eventos o publicados en tal sentido.

El método de cristalización por semillamiento completo (Zamora, 1999) es el usado en Cuba hoy en día, por su mayor flexibilidad y por garantizar un cristal mucho más uniforme. En este método, una suspensión de cristales de azúcar (Cristal 600) se introduce en el material sobresaturado, que ebulle dentro del tacho, cuando su grado de sobresaturación se encuentra en la zona metaestable superior o intermedia, observándose en poco tiempo los cristales en el sistema. En este instante se baja la sobresaturación hasta la zona metaestable, mediante alimentación de miel, debiéndose garantizar que la temperatura, y concentración del material durante el tiempo posterior al semillamiento se mantengan lo más estable posible para que no ocurra formación de nuevos cristales, ni desaparezcan los cristales introducidos. Posteriormente sigue un proceso de crecimiento de los cristales, el cual se realiza alimentando un material de menor pureza que es concentrado usando vapor como medio de calentamiento. Con ello se busca mantener la sobresaturación dentro de la zona metaestable, para que la sacarosa disuelta en este material se transfiera a los cristales, sin que se vayan a producir nuevos cristales o desaparecer los existentes. Llega un momento en que la concentración es tan elevada que la cristalización por evaporación se hace antieconómica, por lo cual se descarga dicha masa cocida a los cristalizadores por enfriamiento, donde se mantiene la sobresaturación por disminución de la temperatura del material, para lograr un agotamiento del licor madre que permita obtener las menores pérdidas posibles de sacarosa.

Para lograr el agotamiento máximo de las soluciones azucaradas (tanto en tacho como en cristalizadores), se hace necesario controlar un grupo grande de factores. Autores como Meade (1977), Hugot (1974), Guillet (1965), García López y Clark, 1970; Honing (1987); Carrazana (1982) y Chen and Chou (1999) consideran que la velocidad de cristalización en los cristalizadores depende de factores como: sobresaturación, viscosidad,

temperatura, velocidad de agitación, velocidad de enfriamiento, tamaño y contenido de cristales y tiempo de retención, entre otros.

Realizar una distinción entre los factores que influyen sobre el sistema, en cuanto a su grado de independencia, y establecer la relación que pueda existir entre ellos, es un aspecto que debe realizarse en el comienzo de cualquier investigación (Walton, 1995; Himmemblau, 1997; Seider et al, 1998; Biegler et al, 1999), por lo que antes de entrar a valorar cada factor individualmente, se realizara un análisis de la repercusión de los mismos en el proceso. Buriavnek (1989) y Domínguez (1997) exponen que conocidas la temperatura, concentración, pureza y contenido de cristales de la masa cocida, pueden ser estimados los restantes parámetros que caracterizan al sistema, a excepción de la composición de las impurezas presentes (solo pueden ser conocidas mediante métodos analíticos) y la composición granulométrica de los cristales, que se determina a través de la medición de los mismos. Basado en lo antes expuesto queda definido que tanto los parámetros de calidad de la miel madre, como sus propiedades químico-físicas son dependientes de las variables anteriores, y por ende cambian en función de éstas.

Las propiedades químico-físicas de la masa cocida (Domínguez, 1997), son dependientes de los parámetros característicos de éstas, y en consecuencia de los parámetros característicos del licor madre y del tamaño y distribución de los cristales en la misma; por lo tanto, éstas propiedades también son variables dependientes. Por otra parte, la política de enfriamiento, la velocidad rotacional de las paletas y el tiempo de retención, se pueden clasificar como los factores operacionales del sistema, por lo que se puede establecer de antemano que para lograr una mayor recuperación de azúcar en el sistema, es necesario buscar las vías para controlar y/o fijar las variables de operación del mismo y los factores que se establecen como independientes en el sistema, en aquellos valores que hagan máxima la transferencia de masa en el mismo.

1.2.1. Análisis de las variables más importantes que influyen en el proceso de cristalización por enfriamiento.

En este tópico se centrará la atención en valorar brevemente la influencia de cada factor de forma individual. Se muestran resumidos en forma de tablas, el(o los) valor(es) recomendados por diferentes autores, para cada uno de los factores analizados. Para más detalles se recomienda consultar el informe de investigación desarrollado por Márquez y Domínguez (1992). Debe ser señalado que en las tablas se muestran con un <*> las adiciones que se han realizado al documento original en años posteriores.

Sobresaturación: Según Nyvlt et al.(1995); Nyvlt (1996); Mersmann and Lofferlmann (2000), una solución está sobresaturada cuando posee una concentración más alta que la que contendría una solución saturada bajo las mismas condiciones de temperatura. Meade (1967), García López y Clark (1970), Carrazana (1982) y Honig (1987) comparten este criterio, aunque indican que para la industria azucarera es muy importante la influencia que ejerce la relación impurezas/agua y el tipo de impurezas, y expresan también que la sobresaturación es la fuerza impulsora del crecimiento de los cristales. Según Carrazana (1982), Domínguez y Márquez (1992); Nyvlt, J et al., (1995) y Lang, Cervantes and Biegler (1999), las condiciones óptimas de un cristizador son aquellas donde la sobresaturación tiene un valor que garantice una velocidad de cristalización elevada y que no provoque formación del falso grano.

Para el proceso en cristalizadores Márquez y Domínguez (1992) reportan los valores que se muestran en la tabla 1.

TABLA 1. Sobresaturación de la solución.

Años	Valores de sobresaturación Recomendados	Autor
1942	Mayor de 1,5	Mc Ginnis, Moore y Ulston
1960	Menor de 1,44	Hugot
1963	1,1 a 1,2	Jenkins
1964	1,1 a 1,2	Irimia
1969	1,1 a 1,2	West
1975	1,1 a 1,2	Awad
1982	1,08 a 1,20	Carrazana
1988	1,25 a 1,6	Maurandi V., Montovani G. y Vaccai, G

Un análisis de la misma indica que la mayoría de los autores coinciden al plantear que la sobresaturación debe mantenerse en la zona metaestable con el propósito de desarrollar el grano formado sin la aparición de nuevos núcleos cristalinos, aunque éste autor desea destacar que en un sistema de cristalización por enfriamiento con un buen grado de automatización, y debidamente identificada la solubilidad de los materiales (Voit, 2000; Wright, 2000) con los que se trabaja, existe la potencialidad asociada a operar con valores altos de sobresaturación, dentro de la correspondiente zona metaestable.

Viscosidad: Son muchos los autores que hablan de esta variable, definiéndola como la resistencia al flujo de un líquido al moverse [Haces (1984); Nytvlt et al. (1995); Meyerson (1998) y Mullin (1999)] y exponen que la difusión del soluto puede hacerse más lenta o impedirse con un valor excesivo de la misma, además de entorpecer la agitación de los cristalizadores, por lo que es considerada el factor limitante en la tecnología de cristalización por enfriamiento. Según Domínguez (1997), “...*esta propiedad establece, en mayor medida, las condiciones límites de trabajo, es decir, el rango en que puede tener lugar el procesamiento en los cristalizadores por enfriamiento...*”.

La tesis doctoral de Zumalacárregui (1997) muestra el estudio reológico más completo de mieles realizado en Cuba, así como la influencia de diferentes impurezas, sobre esta variable, y Rabassa (1999) referencia un grupo grande de investigaciones que abordan el estudio de esta variable. En ambos trabajos se muestra que la viscosidad se ve influenciada grandemente por la temperatura y por las impurezas presentes en el medio, principalmente las cenizas y los polisacáridos, aunque no existe coincidencia sobre el efecto que provocan las cenizas sobre la viscosidad de las soluciones azucaradas.

Se hace necesario resaltar la importancia de moler caña fresca a ritmos altos y estables, reduciendo al mínimo la retención de materiales en el proceso, y garantizando la debida desinfección del tandem y demás áreas, para que no ocurran indeseables aumentos de viscosidad, dado que es bien conocida la negativa repercusión de ésta variable sobre la velocidad de cristalización y en el consumo de energía en los cristalizadores.

Temperatura de calentamiento y enfriamiento

Enfriamiento: Esta es uno de los principales factores que influyen en el proceso de cristalización por enfriamiento, dado que el propósito del enfriamiento es continuar la cristalización de la sacarosa después de que la cristalización isotérmica ha sido llevada hasta el límite viable en el tacho, según Haces (1984). La temperatura mínima a alcanzar es la limitada por la viscosidad y sus valores, en la actualidad, no son inferiores a 40 - 42 °C, ya que se dificulta mucho el manejo de la masa cocida en el cristizador.

La relación entre el tiempo de residencia dedicado al enfriamiento y la variación de temperatura en el proceso, definen la velocidad de enfriamiento reportándose en la literatura clásica que la velocidad óptima de enfriamiento es aquella en la que se logra mantener la sobresaturación lo más alta posible, sin formarse falso grano, siendo los valores de temperatura de enfriamiento que han sido recomendadas, los que aparecen en

la tabla 2, y para la velocidad de enfriamiento se reportan en la literatura diferentes criterios, los cuales se muestran en la tabla 3.

TABLA 2. Temperatura mínima de Enfriamiento en los Cristalizadores.

Años	Valores de temperaturas de enfriamiento recomendados	Autores
1960	41 – 43	Berr
1960	38	Hugot
1963	38	Jenkins
1965	40 – 45	Hames
1974	37 – 40	Valdés
1975	40 – 45	Spencer- Meade
1975	38 – 40	Pedrosas
1979	45 – 50	Rguez y Delgado
1980	38	Gallardo
1982	50	Carrazana
1984	40 – 45	Morrel
1985	50	Morera
1988	40	Mantovani Vaccari
1995	50 - 55	MINAZ*
1999	50 - 55	López*

TABLA 3. Velocidad de Enfriamiento en los Cristalizadores.

Años	Gradientes de enfriamiento (°C/h)	Horas de enfriamiento	Autor
1936	0,34 - 0,41	72	Tromp
1954	0,69 - 0,83	36	Borge
1957	0,55	45	Escalona
1964	0,5 - 1	36 - 72	Bruyn
1974	0,59 - 1,07	78 - 42	Castañeda
1975	0,69 - 0,83	36	Awad
1975	1,7 - 2,08	12 - 20	Cardet
1975	1,17	21 - 25	Pedrosas
1977	1,19	21	Alemán
1980	1,25 - 1,87	16 - 20	MINAZ
1982	1 oF/hora	-	Carrazana
1995	1,2 – 1,6	16 – 18	MINAZ*
1999	3 – 5	8 - 10	López*

En esta tabla se observa una tendencia a realizar en la actualidad, un enfriamiento más rápido de la masa cocida, para disminuir el tiempo de retención en el proceso, así como un incremento de los valores mínimos de la temperatura de enfriamiento, lo cual se justifica por el incremento de la viscosidad de los productos manipulados.

Calentamiento: La masa cocida después de haber sido enfriada, se debe calentar hasta 52 -55 °C, para realizar una adecuada centrifugación de la misma, siendo los valores de temperatura recomendados los que se indican en la Tabla 4, donde se muestra que existe correspondencia entre los diferentes autores, dado que el calentamiento sólo puede llegar hasta el valor en el cual la sobresaturación no se haga menor que uno.

TABLA 4. Temperatura de calentamiento de la Masa Cocida C en Cristalizadores.

Años	Valores de temperatura recomendados	Autor
1965	50 – 55	Hames
1969	40 – 45	Payne
1975	Aumentar 5	Spencer, Meade
1981	55	Ríos
1968	aumentar de 3 – 5	Thompson
1979	53 – 56	Rguez y Delgado
1982	55	Carrazana

Basado en los criterios anteriores, es opinión del autor del presente trabajo que una buena programación en la elaboración de las masas cocidas finales contribuye a la efectividad del agotamiento, porque propicia que el enfriamiento se aplique con mayor efectividad. Asimismo se requiere velar por la buena operación del sistema de enfriamiento de agua que haya instalado, así como disponer de un nivel mínimo de instrumentación para registrar el comportamiento de la temperatura.

Además debe ser chequeado con frecuencia la posible perforación de las paletas o ejes, porque el pase de agua hacia la masa puede provocar una elevada disolución de los cristales, con el consecuente incremento de las pérdidas en miel final.

Rendimiento y tamaño en cristales: El rendimiento en cristales es una medida de la eficiencia con que se ha llevado a cabo la operación de cristalización y viene expresado como el porcentaje de cristales presentes en la masa cocida [Carrazana (1982); Buriaknev (1989); Nyvlt et al. (1995) y Myerson (1998)]. En la literatura consultada se

recomiendan los valores de contenidos de cristales y tamaños que se muestran en las Tablas 5 y 6.

TABLA 5. Contenidos de cristales en la Masa Cocida C.

Años	Contenidos de cristales recomendados (%)	Autor
1951	Límite superior 45	Alkins
1965	44	Guillet
1969	Límite superior 45	West
1979	35 – 40	Honig
1980	40	Díaz
1982	43	Carrazana
1986	50	Pérez y col.

TABLA 6. Tamaño Medio de los cristales en la Masa Cocida C.

Años	Tamaño de cristales recomendados	Autor
1963	0,20 - 0,35	Jenkins
1975	0,35	Pedrosas
1979	0,25 - 0,35	Honig
1980	0,30	Díaz
1988	0,45 - 0,50	Maurandi, y col.

Del análisis de las mismas se concluye que el tamaño medio de los cristales puede variar desde 0,20 - 0,50 mm y que existe diversidad de criterios acerca del contenido de cristales, lo cual puede estar motivado por la estrecha relación que hay entre ésta variable, la viscosidad y la velocidad de cristalización; sin embargo, éste autor quiere expresar que con los valores de viscosidad que se tienen hoy en la actualidad, no es recomendable trabajar a contenidos de cristales superiores a 40 %, por lo en éstos casos debe realizarse una adecuada lubricación de las templeas usando mieles saturadas.

Velocidad de agitación: Esta variable ha sido muy poco estudiada a nivel internacional, sólo aparece un estudio publicado por Lionnet en 1978 (Domínguez, 1997), donde se valora la influencia de cambiar la agitación entre 0,25 y 2 rpm en el contenido de sacarosa de la miel madre. Este autor obtiene mejores resultados con la velocidad rotacional mayor, lo cual es lógico por la influencia marcada que ejerce el movimiento relativo del sistema cristal-solución sobre la disminución de la capa difusional y con ello en el incremento de la velocidad de transferencia de masa. Rouillard (1980) utiliza en sus

estudios de simulación, dos correlaciones desarrolladas por Calderbank and Moo-Young (1960) para estimar los coeficientes de transferencia de calor y masa en recipientes agitados, la cual depende, entre otros factores, del consumo de potencia en el equipo, y Honig (1952) una correlación para estimar éste último en cristalizadores Blanchard y Fletcher Blanchard en función de las características del cristizador, la viscosidad de la masa cocida y la velocidad rotacional de las paletas; variables estas que fueron utilizadas por Yakubo (1999) y Domínguez (1999) para investigar la influencia de la velocidad de agitación sobre la cinética de cristalización en los cristalizadores por enfriamiento de tercera. Se observa que con velocidades superiores a las que actualmente se utilizan en la mayoría de las empresas, se obtienen resultados más favorables, y que el incremento de la misma repercute de forma exponencial en la pureza de la miel final obtenida..

En los clásicos se plantean diferentes criterios, aunque en sentido general se expone que un aumento favorece la velocidad de cristalización pero a su vez tiende a disolver los cristales pequeños, lo cual puede resultar perjudicial, si no ocurre una recristalización de ésta sacarosa. Los valores recomendados para esta variable se muestran en la Tabla 7.

TABLA 7. Velocidad de Agitación en los Cristalizadores por Enfriamiento.

Años	Velocidad de agitación (rpm)	Autor
1953	0,36 - 1	Tuerdochebov
1968	0,33 - 0,5	Ariosa, Moritsegu
1971	0,25 - 0,5	López
1975	0,33	Pedrosas
1979	0,3 - 1,5	Honig
1980	0,33	Díaz
1988	0,25 - 0,5	Herrero
1999	2 - 5	López *

De la misma se puede concluir que la mayoría de los autores recomiendan velocidades de agitación inferiores a 1 rpm, aunque en trabajos prácticos reciente [López (1997, 1999, 2000); Rabassa (1999)] se reportan mejores resultados con velocidades superiores a la recomendada en el manual de operaciones del MINAZ.(MINAZ, 1995) Es necesario señalar que éste autor considera que el incremento de la velocidad de agitación sólo será beneficioso para el proceso si se manipulan volúmenes menores de masa, dado que sino se incrementa considerablemente el consumo energético del proceso haciéndose antieconómico el mismo, además que debe ser determinado el valor más adecuado de dicho factor bajo las condiciones actuales de operación.

Uniformidad de los cristales. Otro factor que se debe tener presente en la velocidad de la cristalización es la uniformidad de los cristales. El agotamiento de las plantas donde existan cristales pequeños, conglomerados y gemelos, se dificulta por la afectación tanto a la movilidad de la masa en los cristalizadores que causan los mismos, como también a la eficiencia de la posterior centrifugación, con el consecuente decremento de la calidad del azúcar por el efecto de la retención de miel en la capa de azúcar. Además los conglomerados y los gemelos presentan varias de las caras que no son efectivas en cuanto a la cristalización [Carrazana (1982); Nyvlt et al. (1995) y Myerson (1998)]. Hay que agregar además que una gran cantidad de los cristales salen con la miel durante la purga.

Relación azúcares reductores/cenizas. Un gran número de autores expone que mientras mayor es esta razón, menor es la solubilidad de la sacarosa y mejor la posibilidad de agotamiento de las mieles. (Wright, 2000)

Pureza de la masa cocida. La teoría y la práctica coinciden en aceptar que las plantas con purzas de 58 a 60 producen mieles finales más agotadas según Hugot (1974).

1.3. Métodos que permiten la intensificación de la cristalización por enfriamiento.

La minuciosa revisión de la literatura azucarera de las últimas 5 décadas, permitió establecer que para intensificar el proceso de cristalización por enfriamiento, se han utilizado las siguientes tecnologías:

1. Regulación del contenido de cristales mediante lubricación con mieles
2. Utilización de agentes tensoactivos y químicos para disminuir viscosidad
3. Purificación de mieles intermedias para eliminar no azúcares
4. Intensificación de la agitación en los cristalizadores por enfriamiento.
5. Maximización de la transferencia de masa mediante el establecimiento de una política óptima de enfriamiento y la determinación de los parámetros de operación óptimos.

Un análisis detallado de cada una se presenta a continuación:

1.3.1. Regulación del contenido de cristales mediante lubricación

El método de lubricación de las masas cocidas (Burianek, 1989) consiste en llevar la sobresaturación de la miel madre a los valores deseados, para ello se emplea una solución de miel final, a una concentración y temperatura que garanticen que se

encuentre saturada o muy próxima a este nivel, lo cual implicará que no exista disolución de los cristales ya formados, aunque L.S. Birkett; D.M. Glick y B.B. Herdenson, citados por Honing (1987); exponen que en la práctica es extremadamente difícil diluir una masa en el cristalizador sin disolver cierta cantidad de azúcar, lo cual fue confirmado en trabajos realizados en el área de recobrado de la empresa José A. Echeverría (Domínguez y Koziavkin, 1989), donde se observó variación de la composición granulométrica.

Si analizamos la aplicación de la ecuación de Arrhenius a la fluidez de una solución azucarada y que la viscosidad es el inverso de la fluidez, es evidente que la energía de activación necesaria para hacer que un mol de sacarosa fluya no tendrá el mismo valor cuando varía la viscosidad y como ésta es función de la concentración, tampoco tendrá igual valor cuando existan altas o bajas concentraciones, dado que es menor en la medida en que ésta lo sea, aunque fue demostrado por Kaganov y Schierjake (Carrazana, 1982) que una variación de la viscosidad es más violenta que la variación de la difusión; es decir, que un incremento en la viscosidad no conlleva a una disminución proporcional de la difusión, o viceversa, como pudiera pensarse a simple vista.

En la práctica a las masas cocidas finales cuando se enfrían en los cristalizadores, se le adiciona miel final para disminuir viscosidad y facilitar la manipulación de ésta en dichos equipos [Márquez et al.(1989); Márquez y Domínguez (1992)]. Lo anterior se realiza sin control, solo buscando garantizar la manipulación de la masa cocida, reportándose por Burianek (1989) un método de cálculo para estimar la cantidad de miel a adicionar para lograr maximizar la transferencia de masa, el cual fue introducido en el MINAZ a partir de 1987 (MINAZ, 1987). Este método fue aplicado por el propio autor en Cuba durante la zafra de 1987, pero en las réplicas que se han realizado del mismo (Márquez, 1988) en la provincia de Matanzas no se han encontrado los valores de incremento en la eficiencia que plantea el autor y en algunas ocasiones se han observado resultados desfavorables para el proceso.

Márquez y et al. (1989) realizan un trabajo en la provincia de Matanzas donde se observa la falta de aplicación consecuente del mismo en la mayoría de las industrias. También Domínguez y Márquez (1990) reportan un estudio de dicho proceso donde se analiza el fundamento teórico del método y elementos prácticos de la aplicación del mismo, se llegan a conclusiones favorables en cuanto a la posibilidad de su aplicación industrial.

1.3.2. Utilización de agentes tensoactivos y químicos.

Entre la literatura especializada, según Márquez y Domínguez (1992) aparecen un gran número de trabajos referentes al uso de agentes tensoactivos y agentes químicos en el procesos azucarero, con el objetivo de disminuir la viscosidad en el proceso y con ello incrementar la transferencia de masa, se define la efectividad de los mismos, así como las dosis a adicionar en cada caso; no están claramente definidos aún los mecanismos de acción de estos, sin embargo, resulta de interés señalar que existe una tendencia mundial al no uso de éstos o su sustitución por productos naturales que permitan la producción de un azúcar ecológica.[Gutierrez et al.(1998); Menéndez et al.(1998)].

1.3.3. Purificación de mieles intermedias para eliminar no azúcares

Domínguez y Luis (2000) exponen que desde antes de los años 40 se reportaron en la literatura científica trabajos sobre clarificación de mieles intermedias, se señala que en algunos ingenios de Java se usaban como clarificadores de mieles las centrífugas de alta velocidad, principalmente con el objetivo de separar las gomas y sustancias insolubles de las mismas, aunque estima que el ensayo químico físico más formal, realizado con el objetivo de eliminar impurezas en la mieles en las plantas A y B es la clarificación centrífuga KOPKE realizada en Hawai y Cuba. En la práctica se obtiene un resultado muy satisfactorio desde el punto de vista de la operación del área. También se destacan investigaciones realizadas en los centrales Puerto y Camilo Cienfuegos, por la dirección de investigaciones tecnológicas del MINAZ, donde se usan centrífugas separadoras para la purificación de miel B; y que muestran los resultados siguientes:

- Disminución de las cenizas y viscosidad de la miel B.
- Incremento en aproximadamente un entero en la pureza de la miel B.
- Incremento de la pureza de la semilla.
- Disminución la pureza y el galonaje de la miel final.
- Disminución el tiempo de cocción en todas las plantas.
- Elevación de la calidad del azúcar envasada.
- Incremento del recobrado fabril.

En la propia década del 60 se celebra en Mauricio el XI Congreso del ISSCT (Domínguez y González, 1996) en el cual se aborda la temática. En el mismo no se llegan a conclusiones en todos los aspectos; sin embargo, por unanimidad se acordó que dicho proceso no resultaba económico cuando la cantidad de sólidos precipitados se

encontraba por encima de cierto límite y que las ventajas de clarificar mieles B aparecen principalmente, en forma de un aumento en el rendimiento de sacarosa y costos menores de procesamiento; pero existe discrepancia en si mejora o no la calidad del azúcar comercial producida, por lo que el XII Congreso celebrado en Puerto Rico debate nuevamente el tema, y se llegan a conclusiones similares a las obtenidas en Cuba. Más recientemente Bernhardt (1998) valora la repercusión que tendría la centrifugación de las mieles en la calidad del azúcar comercial producida, pero no hace referencia alguna al aspecto económico.

Trabajos realizados (Domínguez, Rodríguez y Coromina, 1990) han permitido corroborar que este método de purificación garantiza un incremento en la calidad del material procesado y que sólo será económico el proceso, si el sedimento representa valores muy pequeños del flujo procesado.

Según Márquez y Domínguez (1992), en el CAI Amistad con los Pueblos se aplica a escala industrial el proceso de purificación de miel B por flotación; con resultados favorables, aunque no hacen referencia a la repercusión económica y, en el central Mario Muñoz (MINAZ, 1991) se clarifican las dos mieles intermedias, con resultados muy favorables desde el punto de vista tecnológico, aunque la falta de estabilidad en el suministro de los agentes químicos y la repercusión que tiene sobre el proceso la extracción del lodo, han conllevado a la no-utilización de este sistema en la actualidad, por lo que éste autor considera que debe realizarse una evaluación integral de este proceso que incluya la posible producción de algunos de los derivados para producción animal.

1.3.4. Intensificación de la agitación en los cristalizadores por enfriamiento.

En la literatura consultada se encuentra muy poca información sobre el efecto de la intensificación de la agitación en estos equipos (Yakubo, 1999); sin embargo, desde la década del 80 se comercializan en el mundo cristalizadores que difieren en cuanto a diseño de los cristalizadores tradicionales. Los mismos presentan un sistema de agitación que intensifica la mezcla. También en años recientes se han realizado varios trabajos en Cuba que buscan mejorar la eficiencia de éste proceso; dentro de éstos destacan aquellos que proponen modificaciones en la operación o nuevos diseños para alcanzar un régimen de mezclado superior, y muchos plantean una agitación superior a una revolución cada tres minutos, tradicionalmente utilizado en la industria azucarera.

González (1997) realiza el diseño y evaluación de un cristalizador vertical, el cual trabaja a una velocidad de agitación superior a la normada hasta ese momento en el MINAZ. Este autor reporta mejoras significativas en el agotamiento de la mieles; sin embargo su generalización se ha visto frenada por el alto costo de construcción de dicho equipos y los problemas mecánicos presentados en su operación.

Santana (1998) reporta el diseño y la evaluación de un cristalizador de alto grado de mezclado, el cual permite disminuir el costo de operación considerablemente, pero que necesita una inversión inicial elevada, lo que hace que no se haya introducido totalmente en la industria azucarera cubana.

La cristalización de alto vacío desarrollada por especialistas del ICINAZ, es otra de las variantes investigadas en esta década, y la misma tiene sus antecedentes en un trabajo realizado en Isla Reunión en 1986. Esta tecnología se ha investigado en Cuba desde 1989, con vista a definir la tecnología más adecuada para nuestras condiciones [Llanes et al. (1989, 1990, 1991) y Pérez et al.(1998)]. Las principales características de la misma son las siguientes:

- Velocidad de enfriamiento de 3 a 3,5 °C/h en la primeras 4 horas.
- Incrementos en la caída de pureza de alrededor de 1.5 unidades con respecto al sistema tradicional.
- Velocidad de agitación superior a la usada en el sistema tradicional.
- Alto índice de mezclado entre la masa y la miel de lubricación.
- Reducción del tiempo de residencia en un 25 % aproximadamente.
- La operación puede ser fácilmente automatizable y controlada centralmente.
- Tiene un mayor costo de inversión, operación y mantenimiento que el sistema tradicional.

López (1997, 1998, 2000) proponen la instalación de un cristalizador de los diseñados por la EDIMEC o realizar modificaciones en el régimen de operación de los cristalizadores Blanchard actualmente instalados, que incluye disminución del tiempo de retención, disminución de los volúmenes a procesar e incremento en la velocidad de agitación. Este sistema muestra resultados muy favorables en cuanto al agotamiento de las mieles y la segunda variante tiene un costo de instalación relativamente pequeño, lo que coincide con el estudio simulado realizado por Domínguez (1999).

Debe señalarse que los trabajos de López han sido recomendados por el MINAZ para su generalización en el país, dado que permiten disminuir los costos de operación, reducen las existencias de sólidos en el área de caldera, incrementan la cantidad de azúcar recuperada, y su inversión inicial es mínima, sin embargo, éste autor ha observado que esta generalización se realiza trabajando a diferentes velocidades de agitación, políticas de enfriamiento y tiempo de residencia con resultados similares, por lo que éste debe ser un aspecto a investigar para garantizar una adecuada introducción de la tecnología.

Un análisis comparativo de estas tecnologías en cuanto a inversión, costos de operación, mantenimiento y agotamiento de las mieles, se muestra en la tabla 8.

Tabla 8. Comparación de las Tecnologías propuestas para mejorar el Proceso de Cristalización por Enfriamiento.

Concepto	Tecnología de Crist. Alto vacío (ICINAZ)	Tecnología de Crist. Cristalizadores Verticales	Tecnología de Crist. Compactación del proceso con Blanchard
Caída de Pureza con respecto al sistema tradicional	≈ 1.6	≈ 2	Más de 2
Reducción del tiempo de residencia	≈ 25 %	Muy poco	Más de un 50 %
Consumo de energía	Alto	Alto	Más bajo
Inversión	Alta	Muy Alta	Baja
Mantenimiento	Alto	Muy Alto	Bajo
Velocidad de agitación	Mayor que la tradicional	Mayor que la tradicional	Mayor que la tradicional
Operatividad	Buena	Regula (prob. Mecánicos)	Buena
Automatización y control	Fácilmente aplicable	factible	factible

De la misma se deduce que la variante que menor costo conllevaría es la de realizar la modificación de los equipos actuales y los resultados que se obtienen son similares o mejores que los que se pueden obtener con las otras tecnologías.

1.3.5. Maximizar la transferencia de masa mediante la determinación de los parámetros de operación óptimos.

Varios autores según Márquez y Domínguez (1992), muestran los valores del contenido y tamaño de los cristales, pureza y concentración de la masa cocida, velocidad rotacional y sobresaturación que se recomiendan en la literatura para garantizar una eficiente cristalización por enfriamiento, obtenidos a partir de estudios experimentales o de su experiencia práctica. Se observa en la literatura revisada varios trabajos que se encuentran enfocados a la optimización de éste sistema, donde se destacan los trabajos de Burianek y colaboradores.[Burianek, J. (1989); Sarka et al. (1997)].

Sobre la política de enfriamiento a seguir en cristalizadores por enfriamiento, existe un gran número de recomendaciones basadas en criterios empíricos, según indican Márquez y Domínguez (1992); además se han reportado en la última década varios trabajos, en los que se valoran diferentes métodos matemáticos para la descripción de la cinética de crecimiento de cristales en cristalizadores por enfriamiento, así como su simulación, control y optimización. [Lang et al.(1994); Lang et al.(1995); Sheik and Jones, (1997); Kühberger, and Mersmann (1997); Lang, Cervantes and Biegler (1999); Rohani S. et al. (1999a,1999b)].

Para el caso específico de la industria azucarera, Maudarbocus (1978) y Rouillard (1980) reportan modelos fenomenológicos del proceso de cristalización de azúcar por enfriamiento, que utilizan para valorar la influencia de un grupo de factores entre los que se encuentra la política de enfriamiento usada y la lubricación de mieles sobre el sistema. Este autor realiza un breve análisis comparativo entre los factores investigados en cuanto al agotamiento obtenido en el proceso, mientras que Bubnik and Kadlec (1995) publican un estudio simulado de dicho proceso, donde valoran diferentes variantes de operación; y Maudarbocus and White (1983) reportan la determinación de la política óptima de enfriamiento en cristalizadores discontinuos. Para ello usan un modelo fenomenológico previamente desarrollado y recomiendan un enfriamiento brusco en la primeras horas y después un enfriamiento más lento.

En Estados Unidos, Saska (1990) reporta un estudio simulado y la determinación de la política de enfriamiento. Este autor desarrolla un modelo cinético basado en estudios

experimentales y utiliza como criterio de optimización que la sobresaturación debe mantener constante en el tiempo, en un valor previamente fijado. Dicho criterio es criticable pues en la etapa final del proceso, es recomendable trabajar a una sobresaturación más baja, dada la alta viscosidad de la masa en ese instante.

Guerra Debén, (Guerra, 1984) determina la política óptima de enfriamiento, reporta el uso de un modelo desarrollado sobre la base de los datos de velocidad de cristalización reportados por Kucharenko, los cuales no se ajustan a las condiciones de Cuba. Este autor recomienda una política de enfriamiento bastante similar a la usada en el MINAZ en la época en que se realiza el trabajo. En la actualidad Santana et al. (1999) han perfeccionado dicho modelo mediante la introducción de cálculos cinéticos ajustados a mieles cubanas (Fragoso, Díaz y Santana; 1999), pero no se logran aún los resultados esperados.

En estudios desarrollados en la Universidad de Matanzas se busca obtener la política de enfriamiento óptima (Da Cumba y Silva, 1998) y la velocidad de agitación que maximiza la transferencia de masa en los cristalizadores Blanchard (Yakubo, 1999).

De los estudios experimentales [Carrasco y Santana (1987); González (1987); Peña y Padilla (1988); Domínguez y Koziavkin (1989); Chirino y Zegeye (1992); Blanco et al.(1992); Milián (1994); Sánchez (1995); López (1997)] y del estudio referativo desarrollado por Márquez y Domínguez (1992), se puede concluir que la política de enfriamiento usada en Cuba, difiere de un lugar a otro, dependiendo de las capacidades instaladas y de la intuición de los directivos de fabricación de la empresa en cuestión; sin embargo, es necesario determinar con mayor rigor qué política o políticas de enfriamiento maximizan la transferencia de masa y con ello la recuperación de sacarosa.

CONCLUSIONES

Una vez valorada la lectura de las diferentes fuentes bibliográficas en relación con el objeto y los objetivos del trabajo, se puede concluir:

1. La pérdida de eficiencia en el proceso de cristalización ha tenido una tendencia a incrementarse en las últimas décadas, observándose caídas de pureza de masa miel muy por debajo de las normadas, mientras que los parámetros de operación del proceso se mantienen alrededor de los valores usados desde la década del 40, lo que hace necesario una investigación que aborde métodos no tradicionalmente empleados

en la industria azucarera y que a su vez determine las condiciones de operación que hacen máxima la transferencia de masa en dicho proceso.

2. Existe coincidencia en que la viscosidad y el contenido de impurezas en las mieles tienen un papel protagónico en los malos agotamientos que se obtienen hoy en día en éste proceso.
3. Sobre los métodos que permiten intensificar la cristalización por enfriamiento, se puede concluir:
 - La regulación del contenido de cristales mediante lubricación, no se realiza en ningún central de la provincia de Matanzas mediante métodos técnicamente fundamentados, y se obtienen resultados muy disímiles (incluso en una misma empresa), lo que indica que es necesario establecer la forma o método óptimo de realizar dicha operación.
 - La utilización de agentes químicos en el proceso de cristalización ha sido muy estudiada, determinándose con gran precisión el efecto favorable de estos productos sobre el agotamiento de las mieles intermedias y finales, por lo que sólo deben realizarse acciones para investigar la sustitución de éstos por productos ecológicos.
 - La purificación de mieles intermedias favorece considerablemente el incremento de eficiencia en el proceso de cristalización (tanto en tacho, como en cristalizadores y centrifugas), y al parecer siguen siendo los criterios económicos la limitante fundamental para su introducción en la tecnología cubana.
 - La política de enfriamiento usada en Cuba varía de un lugar a otro, en dependencia de las capacidades instaladas y de la intuición de los directivos de fabricación. Trabajos actuales proponen cambios significativos en la misma (a partir de experiencias prácticas realizadas); sin embargo no existe ningún estudio que establezca la política óptima de enfriamiento, para las condiciones actuales de agotamiento.
4. La tecnología de compactación del proceso de cristalización por enfriamiento, basada en realizar modificaciones en el régimen de operación de los propios cristalizadores Blanchard instalados hoy en nuestros centrales es la que mejor factibilidad técnico-económica ofrece bajo las condiciones actuales de nuestro país, pero debe trabajarse en determinar los parámetros de operación que maximizan su eficiencia.
5. El agotamiento obtenido es inferior al valor adecuado en todas las empresas investigadas y varía de una empresa a otra considerablemente.
6. La velocidad de cristalización lineal en la gran mayoría de las empresas investigadas se incrementa durante el proceso de calentamiento final de la masa cocida y/o se correlaciona directamente con la temperatura mínima de enfriamiento o inversamente

con el tiempo dedicado al enfriamiento, lo cual es indicativo de que la política de enfriamiento que se utiliza debe ser investigada.

7. La lubricación de la templa usando mieles no se encuentra estandarizada, ni se realiza sobre una base técnicamente fundamentada, por lo que también es un factor que debe ser estudiado para establecer la forma y dosis en que debe realizarse la misma para maximizar el agotamiento en cristalizadores.
8. Se observa en las empresas que tenían implantada la política de enfriamiento normada en el MINAZ que a partir de las 5 o 6 h no hay un agotamiento significativo de la miel madre y en las horas finales se vuelve a incrementar éste.
9. El empleo de los métodos de análisis dimensional para el estudio del proceso de cristalización por enfriamiento y la utilización de la máquina computadora electrónica en el tratamiento estadístico de la información experimental posibilitan la obtención de modelos matemáticos del proceso donde se incluyen un número grande de variables que influye sobre el mismo.
10. Del análisis del rendimiento de cristales inicial en los estudios experimentales y de los número adimensional N_1 y RCI, se deduce la necesidad de una política de lubricación de mieles que garantice la disminución de la concentración en la masa cocida y con ello del rendimiento en cristales y la viscosidad de la masa cocida, por lo que se debe establecer la cantidad de miel a adicionar y cómo adicionar la misma para garantizar una máxima transferencia de masa hacia los cristales.
11. Del análisis de los números adimensionales N_2 , N_3 y N_4 , así como de las evaluaciones realizadas en las diferentes empresas, se deduce que el régimen de enfriamiento actualmente usado no es el adecuado para las condiciones de la masa cocida, debiéndose estudiar con mayor profundidad, esta variable con el fin de establecer la política de enfriamiento que haga máxima la recuperación de sacarosa.

BIBLIOGRAFÍA

- AMARO, D. et al (2000). GAS antisolvent crystallization from aqueous solutions. Journal of Supercritical Fluid, 17(3), p249-258.
- BERNHARDT, H.W.(1998). Centrifugal clarification of cane molasses. 72nd Annula SASTA Congress International. Convention Center, Duban, 1-3 June, 13p.
- BIEGLER, L.T. et al. (1999). Systematic Methods of Chemical Process Design. Prentice Hall PRT. (USA). 2th Edition.
- BLANCO, D. (1992). Análisis del agotamiento de mieles del CAI Mario Muñoz. Trabajo de Diploma. Universidad de Matanzas. Cuba.
- BOTSARIS, G and K. TOYOKURA (1997). Separation and purification by crystallization. American Chemical Society, ACS Symposium Serie Vol.667 N° 6, 312 p. ISBN 0841235139.
- BUBNIK, Z and P., KADLEC (1995). Program for Simulation of Cooling Crystallization of Sucrose. 20th General Assembly C:I:T:S, Munich. Germany.
- BURIANEK, J. (1989) Optimización de los esquemas tecnológicos en la industria azucarera. Editorial Científico Técnica. Ciudad de La Habana. Cuba.
- CALDERBANK, P.H. AND M. B. MOO-YOUNG (1960). The Continuos Phases Heat and Mass Transferr Properties of Dispersión.Chemical Engineering Sciences, Vol 16, p 39-44.
- CARRAZANA, L. (1982). Principios físicos químicos de la cristalización de azúcar. Universidad Central de Las Villas, Santa Clara. Cuba.
- CARRAZCO, O y SANTAN, E. (1987) Estudio de la cristalización en movimiento a escala industrial. Trabajo de Diplomas. Universidad de Matanzas. Cuba.
- CARTÓN, A. (1999). Proceso de cristalización por adición de agentes precipitantes. Trabajo presentado para concursar por la plaza de catedrático de la Universidad de Valladolid en el área de Ingeniería Química. (España), 75p.
- CASANOVA, E y J. LODOS (2000). Guía para el diagnóstico de las mieles finales. Revista CubaAzúcar, enero/marzo, p.46-50.
- CASANOVA, E. (1998). Factores agroindustriales que hay que analizar. Revista CubaAzúcar, abril/junio, p.19-21.
- CHEN, J.C.P. and C.C. CHOU.(1999).Cane sugar hanbook. A manual for manufacturers and their chemists. 12th Edition. Editorial Coontinental S.A., 1153p.

- CHIRINO, T y R. ZAGUEYE (1992). Estudio Cinético del proceso de cristalización por enfriamiento a escala de laboratorio. Trabajo de Diploma. Universidad de Matanzas (Cuba).
- DA CUMBA, A.A. y Da SILVA, L. (1998). Política óptima de enfriamiento en cristalizadores Blanchard. Trabajo de Diploma. Universidad de Matanzas (Cuba).
- DÍAZ, S. (1999). Comportamiento de los azúcares reductores en el proceso de obtención de azúcar crudo y su influencia en el agotamiento de la miel final. Tesis de Maestría en Tecnología Azucarera. Universidad de Matanzas. (Cuba).
- DOMÍNGUEZ, F.J. (1993). Situación actual del agotamiento de mieles en la provincia de Matanzas. Trabajo presentado a la XII Conferencia de la ATAC, Matanzas, 7p.
- DOMÍNGUEZ, F.J. (1997). Modelación y simulación del proceso de cristalización por enfriamiento. Tesis de Maestría en Análisis de Procesos, Universidad de Matanzas.
- DOMÍNGUEZ, F.J. (1999). Estudio Simulado del proceso de cristalización por enfriamiento. Informe de Investigación Universidad de Matanzas (Cuba), 43 p.
- DOMÍNGUEZ, F.J et al. (1993). Análisis del agotamiento de mieles en las últimas dos décadas en la provincia de Pinar del Río. Informe de Investigación Universidad de Matanzas (Cuba), 43 p.
- DOMÍNGUEZ, F. J., G. RODRÍGUEZ y R. COROMINA (1990). Análisis de la efectividad técnico económica de la purificación de mieles por centrifugación. III Jornada Científica del CNCA La Habana (Cuba), diciembre, 12 p.
- DOMÍNGUEZ, F.J. y A. MÁRQUEZ (1992). Modelación Matemática del proceso de cristalización por enfriamiento. Un análisis bibliográfico. Informe de Investigación. Universidad de Matanzas (Cuba), 54 p.
- DOMÍNGUEZ, F.J. y A. MÁRQUEZ (1990). Lubricación de mieles: Teoría y Práctica. III Jornada Científica del CNCA La Habana (Cuba), diciembre, 11 p.
- DOMÍNGUEZ, F.J. y A. KOZIAVKIN (1989). Evaluación de la etapa de cristalización por enfriamiento del área de recobrado de la refinería José A. Echeverría. IX Conferencia Provincial de la ATAC. Matanzas (Cuba). 13 p.
- DOMÍNGUEZ, F.J. y J. LUIS (2000). Purificación de mieles intermedias. Parte I. Análisis bibliográfico. Revista Electrónica "Avanzada Científica", Vol 3, Nº 3, septiembre-diciembre. SIN 1029-3450.
- DOMÍNGUEZ, F.J. y M. R. GONZÁLEZ (1996). Análisis de la efectividad técnico económica del proceso de purificación de mieles. Revista Tecnología Química, Vol 16, Nº 3, p 1-7.

- FRAGOSO, F., C. DÍAZ y R. SANTANA (1999). Aplicación de la modelación matemática en el estudio de la velocidad de cristalización de azúcar. II Taller Internacional de Análisis de Procesos. ISPJEA. La Habana (Cuba), 27-30 de abril.
- GARCÍA LÓPEZ, F. y J.A. CLARK. (1970). El proceso de fabricación de azúcar crudo en los tachos". Editorial Pueblo y Educación. La Habana. Cuba.
- GARSIDE, J. (1991). *Advances in Industrial Crystallization*. Woburn: Butterworth-Heinemann, 226p. ISBN 0750611731.
- GEPLACEA (1995). Desarrollo perspectivo de la agroindustria azucarera. México. 3-12 Junio.
- GONZÁLEZ, J. L. (1997). Cristalizador vertical 300. X Encuentro Nacional de Jefes de Fabricación, La Habana (Cuba), 25p.
- GONZÁLEZ, R. (1987). Estudio de la estación de cristalizadores del CAI Jaime López. Trabajo de Diploma. Universidad de Matanzas. Cuba.
- GUERRA DEBEN, J. (1984). La Cinética de Cristalización de azúcar por enfriamiento. International Sugar Journal, Vol 86, Nº 1024, p 99-104.
- GUERRA, N. (1999). Modelación matemática fenomenológica de la operación de un tacho de masas cocidas comerciales en la industria azucarera. Tesis de Maestría en Tecnología Azucarera. Universidad de Matanzas (Cuba).
- GUILLET, E.C. (1965). Cristalización de azúcar de agotamiento. Edición Revolucionaria. La Habana, Cuba.
- GUTIERREZ, P et al. (1998). Producción de agente tensoactivo ecológico. Revista CubaAzúcar, abril-junio, p 10-12.
- HACES, J. A. (1984). Cristalización y agotamiento. Curso para tecnólogos de alto nivel. Centro Nacional de Capacitación Azucarera. MINAZ. La Habana (Cuba). 75 p.
- HIMMENBLAU, DM. (1997). Principios básicos y cálculos en Ingeniería Química. Sexta Edición. Prentice-Hall Hispanoamericana, S.A., Cap. 6, p 560 – 578. ISBN 968-880-802-4.
- HONING, P. (1952). The tecnology of crystallizer. Sugar Journal. 15(4), p 16-22.
- HONING, P. (1987). Principios de la tecnología azucarera. Tomo II. Edición Revolucionaria. 5ta. Reedición. La Habana. Cuba.
- HUGOT, E. (1974). Manual para ingenieros azucareros. Editorial continental. S.A. 2da Edición.(México). p. 495 - 506.
- ICINAZ (1995). Agotamiento de mieles. Propuesta de proyecto de investigación. MINAZ. La Habana (Cuba).

- KÜHBERGER, M and A. MERSMANN (1997). Improved product quality at a cooling crystallization process by measurement and control of supersaturation. TranlChemE, 75, Part A. p 213.
- LANG, Y.D. et al. (1994). Simulation, Optimization and Automatic Implementation of a Batch Crystallization Process, Jiangsu Chemical Research Institute: Jiangsu (China), 68 p.
- LANG, Y.D. et al. (1995). Simulation and Optimization of Industrial Crystallizer Operations, Jiangsu Huagong, 23 (6), p 45-53.
- LANG, Y.D., A. M. CERVANTES and L. T. BIEGLER.(1999). Dynamic modeling and optimization of batch crystallization processes. [on line]. [citado 31 de Enero de 1999] Disponible en http://dynopt.cheme.cmu.edu/general/Cr_ml_6.pdf
- LANG, Y.D., P. TANARTKI and L.T. BIEGLER (1997). DynoPC. User's Guide. Computer aide process design labotatory. Carnegie Mellon University.Pittsburgh, PA.
- LODOS, J., M. RODRÍGUEZ y O. ROSTGARD (1998a). Causas industriales de las altas purzas de las mieles.I Parte. Revista Cuba Azúcar, N° 2, p 8- 9.
- LODOS, J., M. RODRÍGUEZ y O. ROSTGARD (1998b). Causas industriales de las altas purzas de las mieles.II Parte. Revista Cuba Azúcar, N° 3, p 16- 18.
- LÓPEZ, E. (1997). Cristalizadores de alta velocidad. Resultados. X Encuentro Nacional de Jefes de Fabricación. La Habana (Cuba), 10 p.
- LÓPEZ, E. (1999). Posibilidades de compactación del proceso con el empleo de enfriamiento rápido en los cristalizadores de tercera. Informe Técnico. MINAZ. La Habana (Cuba).
- LÓPEZ, E. (2000). Tecnología para la compactación del proceso. Forum Especial Tecnológico, MINAZ. Revista Cuba Azúcar (Cuba), Enero-Marzo. p 12-16.
- LORA, M et al. (2000). Simulation of the semicontinuos supercritical antisolvent recrystallization process. Industrial & Chemical Eng. Research, 39(5), p 1487-1496.
- LLANES, M. I. et al. (1989). .Resultados de la evaluación de la tecnología de cristalización en tachos de masas cocidas comerciales y su agotamiento Revista ATAC, 48(2), Marzo-Abril, p 13-22.
- LLANES, M. I. et al. (1990). Cristalización a alto vacio: Dos enfoques de su realización práctica. Revista ATAC, 49(7), Enero-Febrero, p 2-12.
- LLANES, M. I. et al. (1991): Cristalización a alto vacio en masas de agotamiento en el ingenio de crudo Pablo Noriega. Memorias del II Congreso del ATALAC (Ciudad México), Noviembre, 12 p.

- MARAÑÓN, E. J. (1996). Efecto de los no azúcares inorgánicos sobre la solubilidad de la sacarosa. Tesis doctoral ISPJAE. La Habana (Cuba).
- MÁRQUEZ, A. (1988). Evaluación del proceso de lubricación de mieles. Informe de Investigación. Universidad de Matanzas (Cuba).
- MÁRQUEZ, A et al. (1989). Evaluación del proceso de lubricación de mieles en dos CAI de la provincia de Matanzas. Informe de Investigación. Universidad de Matanzas. Cuba.
- MÁRQUEZ, A. y F.J. DOMÍNGUEZ. (1992). Agotamiento en tacho y cristalizadores. Estudio referativo. Informe de Investigación. Universidad de Matanzas. Cuba, 37 p.
- MARTÍN, K. (1998). Influencia del pH del jugo clarificado sobre el agotamiento de la miel final. Tesis de Maestría en Tecnología Azucarera. Universidad de Matanzas.
- MAUDARBOCUS, S. M. (1978). Modelling the Performance of Batch Cooled Sugar Crystallizers, Master Eng. Science Thesis. University Queensland.
- MAUDARBOCUS, S. M. and E. T. WHITE (1983). Cooling Policies for Batch Crystallizers. Proceeding XVIII Congress ISSCT, La Habana, February, p 1283 – 1293.
- MEADE, T.P. and CHEN, J.C.P. (1977) Cane Sugar Handbook". New York.
- MEADHRA, R.O. (1995).Modelling of the kinetics of suspension crystallizers: A new Model for secondary nucleation. Delft-University-Press.199 p. ISBN 9040711909.
- MENENDEZ, G et al. (1998). Agente tensoactivo purificado. Revista CubaAzúcar, abril-junio.p 13-15.
- MERSMANN, A. et al. (2000). Approaches to the predictive estimation of crystallization Kinetics. . Chemie Ingenieur Technik, 72(1- 2), p 17- 30.
- MERSMANN, A. and M. LOFFELMAN (2000). Crystallization and precipitation: The optimal supersaturation. Chemie Ingenieur Technik, 72 (11), p 1240-1244.
- MILIAN, J.I. (1994). Evaluación de la Cristalización por Enfriamiento en el CAI Australia. Trabajo de Diploma, Facultad de Ingeniería Química, Universidad de Matanzas.
- MINAZ (1987). Metodología para la implantación del sistema de control de la sobresaturación en las masas de agotamiento en cristalizadores. Informe Interno. Dirección de crudo. La Habana. Cuba.
- MINAZ (1991). Clarificación de mieles A y B en el CAI Mario Muñoz. Informe Interno. Dirección de crudo. La Habana. Cuba.
- MINAZ (1995). Manual de operaciones para la producción de azúcar crudo de caña. Dirección tecnológica del Ministerio de Azúcar. La Habana (Cuba).

- MONTALVO, R. (1985). Evaluación de la batería de cristalizadores del CAI 6 de Agosto. Trabajo de Diplomas. ISAICC, Matanzas.
- MULLIN, J.W. (1999). Crystallization. 4th Edition. Butterworth-Heinemann, 536 p. ISBN 0750611294.
- MYERSON, AS. (1998). Handbook of Industrial Crystallization. 2nd ed. Butterworth-Heinemann, 448p. ISBN 0750670126.
- NYVLT, J et al. (1995). The Kinetic of the Industrial Crystallization Elsevier. Checoslovaquia.
- NYVLT, J.(1996). Fundamentals of Industrial Crystallization: An overview. 3er Simposium of AvH Association: Sugar Crystallization. [on line]. March 14. [citado 01-12-1999], 7p. En Internet: <http://wwwuniv-reims.fr/Extremes/Avh/c0302.htm> .
- OHTAKI, H. (1997). Crystallization Processes. John Wiley and Sons Inc., 220p. Wiley Series in Solution Chemistry: Vol. 3. ISBN 0471973963.
- PEDROSAS PUERTAS, R. (1975). "Fabricación de azúcar crudo de caña". 2da Edición. La Habana. Editorial Científico Técnica, p. 258 - 274.
- PEÑA, R y PADILLA, L. (1988). Análisis histórico, técnico y económico del agotamiento de mieles. Trabajo de Diploma. Universidad de Matanzas. (Cuba).
- PÉREZ, P et al.(1998). Cristalización al vacío. Revista CubaAzúcar, abril/junio, p22-25.
- PERRY, R.H and D.W. GREEN (1999). Perry Chemical Engineers' Handbook. [CD-ROM], MCGraw-Hill Companies, Inc.(USA).
- RABASSA, G (1999). Estudio de las pérdidas de azúcar en el subsistema de agotamiento. Tendencias actuales para su reducción. Tesis de Maestría en Tecnología de la Industria Azucarera. Instituto Superior Politécnico " José A. Echeverría", La Habana (Cuba).
- RODRÍGUEZ, R. et al. (1989). Pérdidas en el agotamiento de mieles intermedias y finales en la provincia de Camagüey. Revista Centro Azúcar, 16 (3). julio/septiembre, p 54- 60.
- RODRÍGUEZ, R., P. ANZARDO y R. SANTANA. (1989). "Origen de las causas de la disminución del agotamiento en las mieles finales en la provincia de Camagüey". Revista Centro Azúcar, 16 (4). oct./dic, p 16-23.
- ROHANI, S. et al. (1999a). Modeling and control of continuous crystallization process. Part 1. Lineal and non-lineal modeling. Computers and Chemical Engineering, 23(6), p 263.

- ROHANI, S. et al. (1999b). Modeling and control of continuous crystallization process. Part 2. Model predictive control. Computers and Chemical Engineering, 23(6), p 279-286.
- ROUILLARD, E.E.A. (1980). Mathematical modeling of A, B, and C crystallizer. Proceeding XVII Congress. I.S.S.C.T. Vol. 3. february, p 2299 - 2327.
- SANCHEZ, V. (1995). Estudio de la Etapa de Cristalización por Enfriamiento". Trabajo de Diploma. Universidad de Matanzas (Cuba).
- SANCHEZ, S y A. DECORO, (1995). Evaluación de la etapa de cristalización por enfriamiento del área de recobrado de la refinería. Trabajo de Diploma. Universidad de Matanzas (Cuba).
- SANTANA, R et al. (1999): Perfeccionamiento del Modelo Matemático de la Tecnología de Cristalización de Azúcar por Enfriamiento del Dr. Guerra Deben, mediante la Introducción de Cálculos de Cinéticas Ajustados a las Mieles Cubanas. II Taller Internacional de Análisis de Procesos. Instituto Superior Politécnico“ José A. Echeverría”, La Habana (Cuba) 27- 30 de abril.
- SANTANA; R. (1998). Cristalizador de Masa de Tercera de alto nivel de mezclado y bajo consumo de potencia. Memorias del Evento Internacional Tecnoazúcar, Camaguey (Cuba).
- SANTIUSTI, L. (1985). Evaluación de la batería de cristalizadores del CAI Sergio González. Trabajo de Diplomas. ISAICC, Matanzas.
- SARKA, E et al. (1997). Possibilities of the improvement of the C sugar crystallization. LISTY CUKROVARNICKE A REPARSKE. Vol 113, No 4: p 113- 116.
- SASKA, M. (1990). Optimización de la eficiencia del proceso de cristalización de bajo grado. International Sugar Journal, 92 (1094), febrero, p 23 - 28.
- SEIDER, W.D. et al. (1998). Process Design Principles. Synthesis, Analysis and Evaluation. John Wiley & Sons, Inc. (USA).1th Edition.
- SHEIK, A.Y.; JONES, A.G. (1997). Crystallization Process Optimization via a Revised Machine Learning Methodology" AIChE Journal, 43 (6), p 1448- 1459.
- TAVARE, NS. (1995). Industrial Crystallization: Process Simulation Analysis and Design. Plenum Publishing Co., 556p. Plenum Engineering Serie. ISBN 0306448610.
- TILLER, WA(1991a). The Science of Crystallization: Microscopic Interfacial Phenomena Cambridge University Press, 424p. ISBN 0521381383.
- TILLER, WA(1991b). The Science of Crystallization: Microscopic Interfacial Phenomena. Cambridge University Press, 421p. ISBN 0521388279.

- TILLER, WA. (1992a). The Science of Crystallization: Macroscopic Phenomena and Defect Generation. Cambridge University Press, 516p. ISBN 0521381398.
- TILLER, WA.(1992b). The Science of Crystallization: Macroscopic Phenomena and Defect Generation. Cambridge University Press, 510p. ISBN 0521388287.
- VOIT, D. (2000): Re: Sugar Solubility. Sugar Technology List. Edwards Engineering [online], <http://www.edwardsengrg.com/>, recibido el Jueves 14 de diciembre de 2000; 11:26.[citado el 20 de diciembre del 2000].
- WRIGHT, P G. (2000): Re: Sugar Solubility. Sugar Technology List. Edwards Engineering [online], <http://www.edwardsengrg.com/>, recibido el viernes 15 de diciembre de 2000; 18:04.[citado el 20 de diciembre del 2000].
- YAKUBO, O. (1999). Determinación de la política óptima de trabajo en los cristalizadores de azúcar. Trabajo de Diploma. Universidad de Matanzas (Cuba).
- ZAMORA, A.M. (1999). Cristal 600: Evaluación a escala industrial y de laboratorio. Tesis de Maestría en Tecnología Azucarera. Universidad de Matanzas (Cuba).
- ZUMALACÁRREGUI, L. (1997). Estudio Reológico de Fluidos Azucarados. Tesis de Doctorado en Ciencias Técnicas. Instituto Superior Politécnico " José A. Echeverría". Cuba.