

Programación de operaciones en una planta de producción de glucosa

Raúl Sabadí-Díaz^{1*}, Erduin Luis-Delgado²

1. Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar (ICIDCA)
Vía Blanca, No. 804 y Carretera Central, San Miguel del Padrón. La Habana, Cuba
2. Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar (ICIDCA-Camagüey)
Ave. Finlay, km. 4.5, Reparto San Francisco. Camagüey, Cuba

* raul.sabadi@icidca.azcuba.cu

RESUMEN

Introducción. Las plantas de producción de glucosa, a partir de sacarosa, son una secuencia de procesos discontinuos. Estas plantas han presentado muchas dificultades, principalmente asociadas a la rotura de equipos de su línea de producción, en particular cristalizadores y filtros, lo que ha motivado la disminución de la productividad.

Objetivo. Estudiar la programación de las operaciones en la planta de producción de glucosa de la Empresa Agroindustrial Azucarera Argentina, en Camagüey, para buscar un mejor aprovechamiento del equipamiento instalado, reducir su tiempo de inactividad e incrementar la productividad.

Materiales y Métodos. Se caracteriza la planta y se utiliza la aplicación Excel para simular la programación de operaciones de un sector de los procesos.

Resultados y Discusión. No se han representado todos los equipos ni todo el ciclo de producción, sino solo hasta la etapa de filtración de las masas de primera cristalización. Eso es suficiente para demostrar el impacto que tiene la falta del segundo filtro en la productividad de la planta. Todas las cristalizaciones podrían arrancar tres días después de haber concluido la operación precedente.

Conclusiones. Se demuestra la necesidad de reparar e incorporar el segundo filtro, para poder mejorar la productividad de la planta.

Palabras clave: glucosa, programación de operaciones, operaciones discontinuas.

ABSTRACT

Introduction. Glucose production plants from sucrose are a sequence of discontinuous processes. These plants have faced many difficulties, mainly associated with the breakdown of equipment on their production line, particularly crystallizers and filters, which has led to a decrease in productivity.

Objective. To study the operations scheduling in the glucose production plant of the Agro industrial Sugar Company Argentina in Camagüey to seek the best use of the installed equipment, reducing its downtime and increasing productivity.

Materials and Methods. The plant is characterized and the Excel application is used to simulate the programming of operations in a process sector.

Results and Discussion. Neither totality of equipment nor production cycles were shown only phase concerning mass from first crystallization first was represented. Hence, impact concerning second filter deficiency in plant productivity is evidenced, since crystallizations initiated three days after the previous operation ending.

Conclusions. The need to repair and incorporate the second filter in order to improve the productivity of the plant is demonstrated.

Keywords: glucose, operations scheduling, batch operations.

INTRODUCCIÓN

En la industria química actual se producen centenares de productos básicos, en grandes volúmenes, en plantas de proceso continuo. También la industria genera una gran cantidad de otros productos, normalmente con una menor producción; pero con un mayor valor añadido, en plantas de proceso discontinuo. Los procesos químicos discontinuos están caracterizados por la obtención de cantidades discretas de productos finales, a los que se les denomina lotes o cargas (*batches*), después de que las proporciones adecuadas de materias primas hayan seguido una secuencia bien definida de transformaciones. Dichas tareas requieren de un tiempo y se han de llevar a cabo en condiciones de operación (temperatura, presión y otras.), bien definidas. Estos procesos han adquirido una relevante importancia mundial, por su flexibilidad inherente, que les permite adaptarse a un mercado incierto.

Las plantas de producción de glucosa, a partir de sacarosa, son una secuencia de procesos discontinuos. Estas plantas han afrontado muchas dificultades, principalmente asociadas con la rotura de equipos de su línea de producción; en particular, cristalizadores y filtros, lo que ha causado la disminución de su productividad. Estudiar, entonces, la programación de las operaciones en estos procesos es un elemento importante para intentar aprovechar más el equipamiento instalado y, así, reducir sus tiempos de inactividad. En este estudio se aborda el caso de la planta de producción de glucosa de la Empresa Agroindustrial Azucarera (EAA) Argentina, en Camagüey.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para realizar este trabajo, primero se caracterizó la planta de producción, se identificaron los equipos disponibles, sus capacidades y estados técnicos actuales. Se estudió también el proceso tecnológico (1, 2, 3) y se definió la duración media de las operaciones relevantes para el estudio.

La planta de producción de glucosa

La planta de producción de glucosa está instalada en el Central Azucarero de la Empresa Agroindustrial Azucarera (EAA) Argentina, con una capacidad actual de 600 t/año (usa cristalizadores del central paralizado). Los principales problemas técnicos que se han presentado en los últimos años han sido: insuficiente cantidad de azúcar y mala calidad de esta, y el deterioro de los filtros. Estos problemas han provocado una disminución paulatina de la producción de la planta (3). Aquí se describen las características de las etapas del proceso de producción que determinan, principalmente, la duración de los ciclos de producción en esta planta.

a) Disolución de la sacarosa

La disolución de la sacarosa se realiza en dos tanques interconectados, enchaquetados y con agitación que, posteriormente, se utilizan para la inversión (hidrólisis). No poseen instalación de aire y el calentamiento se produce por vapor saturado, a través de un serpentín. Se añade el volumen de agua hasta la propela, que indica el nivel necesario para la disolución de 4.5 t de azúcar, para lograr de 77 a 78 ° Bx, se ponen en marcha los agitadores de hélice, se comienza el calentamiento y se mantiene la agitación. Si la solución no queda adecuadamente ajustada a la concentración requerida, entonces, se añade agua y se chequea nuevamente el Brix.

b) Inversión (hidrólisis) de la sacarosa

La inversión se efectúa por debajo de 90 °C, para evitar la formación de productos de caramelización con el consiguiente aumento de color, que repercutirá en la calidad del sirope de fructosa. Inmediatamente después de disolverse el azúcar se añade ácido fosfórico al 85 %, a razón de 600 ml/t de azúcar disuelta y se mantienen la misma temperatura y agitación. Se chequea la inversión a partir de

una hora después que se le adicionó el ácido de manera sistemática. Cuando la inversión concluye se bombea, rápidamente, el licor invertido hacia el cristalizador de enfriamiento en primera cristalización, el denominado Diana, con capacidad de 45 m³ de operación.

Se considera la inversión concluida si se ha invertido el 95 % de la sacarosa presente, esto se determina cuando la lectura en el sacarímetro esté cercana a -7.0 y se logra en unas cuatro horas. Actualmente se realizan dos hidrólisis en el día y depositan en el cristalizador-enfriador cuatro inversiones; o sea, se llena en dos días y en la mañana del tercer día, después de lograr enfriarla por debajo de los 35 °C, se bombea a un cristalizador de los 11 existentes en primera cristalización.

c) Primera cristalización

La solución invertida se bombea hacia el cristalizador donde se efectúa el enfriamiento y cae a través de un derramador situado en un extremo y a todo el ancho de este. Este cristalizador posee, por diseño, un movimiento mecánico intenso que logra 0.85 rpm y se enfría la solución en 48 horas. Cuando la solución invertida está por debajo de 35 °C es bombeada hacia uno de los cristalizadores en operación, hasta que alcance el volumen de trabajo, con el cristalizador en movimiento. La instalación posee seis cristalizadores de 45 m³ de volumen útil de operación, uno de 32 m³ y cinco de 35 m³ que poseen movimiento a 0.33 rpm; excepto el 5 y el 6, que poseen 0.85 rpm. En total, poseen 11 cristalizadores en esta operación, ya que el Diana solo se usa para enfriamiento.

El semillamiento se realiza a partir de un pie de semilla existente, que se deja de la anterior operación en dicho cristalizador; es decir, de la masa antes filtrada se deja, para este fin, entre un 7 y un 11 % de esta. Cuando comienzan de cero, se aplican unos 24 sacos de glucosa (3 %). En caso de que este pie de semilla no tenga el rendimiento adecuado, se le adiciona al cristalizador glucosa en polvo. Se determina el rendimiento de cristales 10 días después del semillamiento y, posteriormente, se chequea hasta que alcance entre 18 y 20 %, que se logra alrededor de los 22 o 23 días. Cuando no se logra en este tiempo el rendimiento en cristales, se tiene que sembrar nuevamente con glucosa en polvo a un 3 %.

Un cristalizador de primera cristalización de 45 m³ de volumen útil se llena en dos días con cuatro inversiones, dos inversiones por día y produce masa para dos cristalizadores de segunda cristalización. Un cristalizador de 32 m³ se llena con tres inversiones y rinde 4.5 t de glucosa.

d) Filtración

Esta operación es de gran importancia para obtener una alta pureza en la glucosa. Esto último es un problema en esta planta, poseen dos filtros prensas semiautomáticos, diseño EDIMEC; pero solo trabaja uno. Con el filtro armado, se descarga la masa para ser filtrada en un tanque 1.6 m³ de capacidad. La operación de carga dura aproximadamente 75 min. e igual tiempo de secado con aire. Se bombea el sirope rico en fructosa hacia el tanque de almacenamiento, cada vez que el tanque receptor del filtro esté lleno. Se detiene la bomba de masa y se inicia la descarga de tortas de glucosa hacia la tolva y se arrastra hacia esta la mayor cantidad de material que pueda quedar adherido a los marcos o telas. La fructosa que sale por defectos de tela, en el inicio de la filtración, se envía a un tanque de 1.2 m³; y la del final de la filtración, que posee mejor color, se envía al tanque de primera cristalización, lo cual se hace por no contar con un filtro eficiente.

Esta operación posee doble turno de trabajo; o sea, se realiza durante las 24 horas y demora 3 días filtrar un cristalizador.

e) Disolución de la torta

El tanque disolutor posee una capacidad de 5.47 m³ con una instalación para aplicar, a través de un serpentín, vapor saturado, aire y agua hasta lograr ajustar la solución entre 74 y 74.5 °Bx, a partir de que la torta posee un Brix de 80-82 %. Para ello, debe mantenerse la temperatura entre 60 y 70 °C y la glucosa disuelta tiene una pureza entre 77 y 80 %. Para disolver la glucosa filtrada se espera a

que esté lleno el tanque (este se llena con cuatro filtraciones). Una vez que se disuelve la torta de glucosa, esta es bombeada hacia los cristalizadores de segunda cristalización.

f) Segunda cristalización

La segunda cristalización se realiza en cristalizadores de menor tamaño, estos son seis de 10 m³ cada uno. Poseen movimiento mecánico a 0.54 rpm, ninguno tiene termómetro y las pérdidas por salideros se envían al tanque que se mencionó anteriormente de 1.2 m³, en el que cae fructosa por deficiencias de la filtración. El semillamiento se realiza con un pie de semilla que se deja en el cristalizador, de la última masa que se purgó. No poseen cristizador-enfriador en esta etapa. En caso de que el pie de semilla no tenga el rendimiento adecuado, se le agrega glucosa en polvo, entre 2 o 3 sacos. A los 6 días de semillado se evalúa el rendimiento en cristales, el cual debe estar entre 24 y 28 %. Cuando se alcancen estos valores se comienza la purga en la centrífuga, este proceso dura entre 7 y 10 días. Un cristalizador de 35 m³ se llena también en dos días, con cuatro inversiones y estos rinden unas 5.6 t de glucosa.

g) Centrifugación

Esta operación se lleva a cabo en una centrífuga discontinua, con capacidad de purga de hasta 4 t/día, que recibe la masa a través de un mezclador, por carga se adicionan entre 210 y 250 kg y cada ciclo toma unos 20 min (por ciclo de purga obtienen entre 4 y 5 sacos de 42 kg de glucosa, con una humedad de 8 % y una pureza de 94 %). No se aplica agua de lavado, aspecto que se está tratando de mejorar, con lo que se logran en el día unos 120 sacos.

El Brix del sirope rico en glucosa está entre 55 y 65 %, el cual va a un tanque de 1.2 m³ y este posee dos destinos diferentes: para primera cristalización (actualmente no lo hacen), o para el tanque final de sirope de fructosa, con capacidad de 379 m³.

Se demoran dos días para purgar un cristalizador de segunda cristalización.

h) Envase y almacenamiento

No existe tolva para la glucosa purgada, esta cae a un sinfín y se llena el saco bicapa directamente, se cose y se guarda en un almacén.

Planificar la producción y programar operaciones

El estado de los procesos químicos de producción discontinua cambia durante el tiempo, por lo que se pueden definir como procesos no estacionarios. Esto es válido tanto para las variables de proceso durante una transformación determinada como para los diferentes tipos de transformaciones que se pueden llevar a cabo de forma sucesiva en una misma unidad de producción.

En el primer caso, cada una de las transformaciones que se llevan a cabo en un equipo constituye un sistema que evoluciona a lo largo del tiempo, según leyes físicas y químicas, de acuerdo con las condiciones impuestas externamente (calentamiento, agitación, enfriamiento, entre otros). La correcta operación de cada una de las tareas, el seguimiento de su evolución y el ajuste de las condiciones impuestas para cumplir los requisitos de la tecnología, constituyen un vasto campo de estudio e investigación: el control de procesos discontinuos. En este caso, en las plantas de glucosa, la falta de enfriamiento adecuado en los cristalizadores es un elemento que condena la productividad de la planta, pues se extienden en demasía los tiempos requeridos.

El segundo caso implica un nivel de coordinación superior. La secuencia de transformaciones (para diferentes productos) que se lleva a cabo en cada una de las diferentes unidades de producción cambia, bajo ciertas restricciones técnicas, según decisiones de las personas responsables del proceso. En los procesos discontinuos, cada operación tiene un inicio, una duración y un final determinados y, seguidamente, se requiere decidir sobre qué hacer a continuación. La determinación de las mejores decisiones a tomar para conseguir los objetivos de producción es uno de los problemas de

los procesos discontinuos, en ella se enmarca el objetivo de este trabajo. En este caso decidir en qué equipo, en qué cristalizador realizar cada operación, en cada momento, son elementos importantes.

Se trata de un problema de optimización que recibe el nombre de planificación de la producción (*production planning*), cuando se hace referencia al establecimiento de las disposiciones de carácter general que caracterizarán el funcionamiento de la planta, a mediano o largo plazos; y programación de operaciones (*operations scheduling*), cuando se refiere a la determinación precisa de los tiempos, en los cuales se iniciarán cada una de las operaciones y de los equipos en los que se realizarán (4). En este trabajo se aborda el segundo enfoque.

El conjunto de decisiones a tomar, en una planta discontinua, debe estar de acuerdo con las restricciones técnicas que impone la limitación de los recursos de los que se dispone. Se trata de buscar el mejor aprovechamiento posible, a lo largo del tiempo, de los recursos disponibles para la fabricación de cantidades requeridas de productos finales y, eventualmente, de productos intermedios.

El recurso material más obvio es el conjunto de equipos, que contiene productos intermedios o semielaborados, mientras se ejecuta una tarea en ellos y acontecen otras en otros y pueden trabajar de forma discontinua o no. También pueden existir unidades de transferencia que permitan el transporte de productos semielaborados desde una unidad de producción a otra, donde se llevará a cabo la siguiente tarea de la secuencia, que llevará al producto final. De la misma manera, es posible que haya unidades que produzcan y transfieran simultáneamente y, otras que sólo sirvan de almacén intermedio.

Las materias primas son también otro recurso esencial; su disponibilidad en un momento determinado permite o no el inicio de una tarea. Los servicios disponibles en planta también son un recurso limitante. Se entiende como tales a todas las formas posibles de suministro de energía (electricidad, vapor, etc.), que posibilitan el mantenimiento de las condiciones de operación (agitación, temperatura, presión y otras.) y la secuencia de tareas a realizar (carga, cristalización, descarga, etc.). La disponibilidad de cada uno de estos servicios, en cada momento, está limitada por la generación eléctrica posible, la capacidad del generador de vapor, entre otros.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para estudiar la programación de las operaciones se ha representado en una hoja Excel lo que se realiza en cada equipo del proceso, a lo largo de los días de operación de la planta, en la condición actual, en la que solo dispone de un filtro (figura 1). Las columnas son los días de operación de la planta y las filas se corresponden con los equipos existentes en ella y, para cada uno, se representa la operación que está ocurriendo cada día. Las masas procesadas se han identificado con un número, en este caso, para el primer ciclo, del 1 al 11, que se corresponde con la cantidad que se puede procesar al mismo tiempo, debido a la existencia de ese número de cristalizadores de primera.

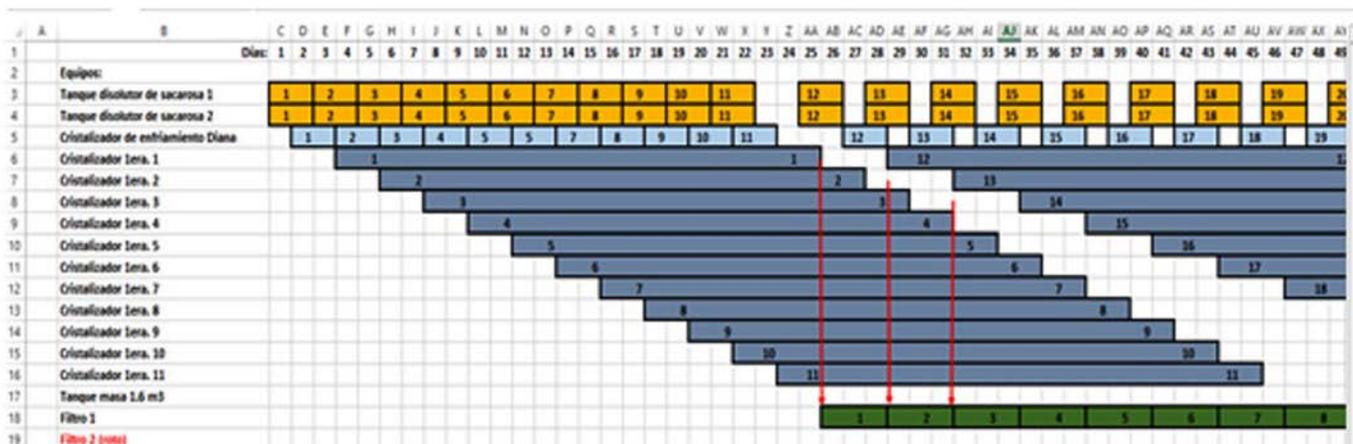


Figura 1. Diagrama de operaciones del proceso (con un filtro).

No se han representado todos los equipos ni todo el ciclo de producción, sino sólo hasta la etapa de filtración de las masas de primera cristalización. Eso es suficiente para demostrar el impacto que tiene la falta del segundo filtro en la productividad de la planta.

Se observa que, en un primer ciclo, los cristalizadores inician sus operaciones a medida que las operaciones de disolución e inversión de la sacarosa y el proceso de enfriamiento inicial en el cristalizador Diana concluyen. Cada dos días se inicia la operación en un nuevo cristalizador de primera y se ha considerado, para ella, una duración de 22 días. Al finalizar cada una se procede a la filtración, que dura tres días. La flecha roja vertical, hacia abajo, indica la descarga del cristalizador al filtro.

Aunque cada cristalizador se puede arrancar cada dos días en este primer ciclo, el hecho de que la operación de filtrado dure tres días provoca que, en el siguiente ciclo, exista un desplazamiento de sus operaciones, pues se debe esperar a que el filtro esté disponible.

Nótese que la cristalización número 12, la primera del segundo ciclo de primera cristalización se puede iniciar sólo tres días después de haberse filtrado la masa uno, no dos. Y a partir de ahí, ese desplazamiento se va incrementando en un día, para cada nueva cristalización. La cristalización 13 se inicia cuatro días después de filtrada la masa 2; la 14, cinco días después de filtrada la 3 y, así sucesivamente. Esto provoca que el segundo ciclo no sea igual en duración y, por tanto, en productividad, que el primero.

¿Qué ocurriría si los dos filtros estuviesen activos? En la figura 2 se representan las operaciones cuando los dos filtros están activos.

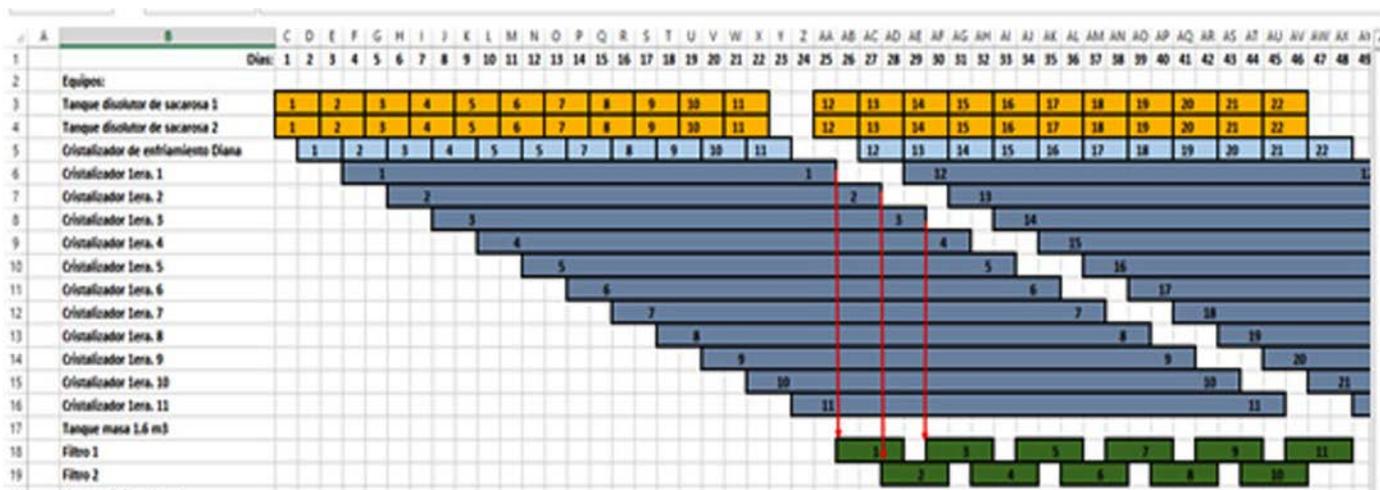


Figura 2. Diagrama de operaciones del proceso (con los dos filtros).

Se puede observar que, en esta condición, el segundo ciclo de primera cristalización es idéntico al primer ciclo, de igual duración, ya que se van alternando los filtros que procesan las cristalizaciones que van concluyendo. De esta forma, todas las cristalizaciones podrían arrancar tres días después de haber concluido la operación precedente, correspondiente a ese equipo; es decir, se demuestra que es necesaria la reactivación de ese segundo filtro, para lograr una mejor productividad en la planta.

Este análisis puede realizarse e incluir en él todos los equipos de la planta y definir, de una manera menos manual, la mejor programación de las operaciones. Para ello, existen herramientas matemáticas que permiten optimizar esa programación, en función de las restricciones del proceso. Sin llegar a ese nivel de detalle, que a nivel de fábrica podría ser engorroso y limitaría su aplicación, podría considerarse el proceso como un proyecto y utilizar para su estudio herramientas como *Microsoft Project* (4, 5), lo que se recomienda hacer para valorar su posible utilidad real.

CONCLUSIONES

1. Se ha caracterizado la planta de producción de glucosa de la Empresa Agroindustrial Azucarera Argentina, en Camagüey, en sus condiciones técnicas actuales.
2. Se realiza un análisis parcial de programación de las operaciones, que permite demostrar la necesidad de reactivar el segundo filtro para poder incrementar la productividad.
3. Se recomiendan, además, para el plan de inversiones de la planta, incluir otras acciones que permitan reducir la duración de las operaciones, entre ellas, mejorar el enfriamiento en la cristalización.
4. Se propone estudiar la programación de operaciones de esta planta completa y considerar el proceso como un proyecto; además, usar la aplicación *Microsoft Project*.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Díaz, L., Zumalacárregui L, Pérez O, González G. (2020). Evaluación del proceso de producción de glucosa a partir de sacarosa en la UEB Argentina. *Tecnología Química*. 2020,40(3), pp. 611-626. ISSN 2224-6185.
2. Fernández-Pulido, L., Zumalacárregui-de Cárdenas, L., Pérez-Ones, O., & Díaz-Chávez, L. R. (2022). Improvements in the glucose production process supported by simulation with Super-Pro Designer v10.0. *Chemical Technology*, 42(2), 231-246. Consultado en mayo 2023.
3. <https://tecnologiaquimica.uo.edu.cu/index.php/tq/article/view/5249> .
4. Luís Delgado, Erduin; Sabadí Díaz, Raúl. Proyecto 679. Resultado 6. Propuestas para aumentar rendimiento industrial y mejoras en la operatividad de la planta. Informe de etapa 3. Estudio de la planificación de operaciones en las plantas. ICIDCA, La Habana, Cuba.
5. Sabadí Díaz, Raúl. (2009). Síntesis de esquemas de cocción en fábricas de azúcar usando Microsoft Project. Parte I: programación de operaciones. ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar, vol. XLIII, núm. 2, mayo-agosto, 2009, pp. 51-59. ICIDCA, La Habana, Cuba.
6. Sabadí Díaz, Raúl; Díaz Molina, Arnaldo. (2011). El enfoque de gestión de proyectos en la programación de operaciones discontinuas de la fábrica de azúcar. Congreso Diversificación 2011, La Habana, Cuba.