

PLAN ÓPTIMO DE PRODUCCIÓN EN UNA PLANTA EMBOTELLADORA DE GASEOSAS

OPTIMAL PRODUCTION PLAN IN A SOFT DRINK BOTTLING PLANT

Viviana Karolina Ortiz Triana^{1*}, Álvaro Junior Caicedo Rolón²

RESUMEN

El propósito de esta investigación fue diseñar un plan óptimo de producción en una planta embotelladora de gaseosas ubicada en la ciudad de San José de Cúcuta (Colombia), donde se identificaron las restricciones del sistema productivo para el desarrollo de un modelo matemático, siguiendo la metodología de la investigación de operaciones, específicamente la técnica de programación lineal, en conjunto con la teoría de restricciones. Como resultado se obtuvieron las cantidades óptimas de fabricación al menor costo para el período seleccionado (junio del 2011). Además, el estudio permitió evidenciar una capacidad productiva no utilizada, a partir de lo cual se identificaron escenarios y oportunidades para el aprovechamiento de sus recursos. El modelo matemático, que representa el plan óptimo de producción, se puede implementar en plantas embotelladoras de gaseosas que presenten las mismas características del caso de estudio considerado en este artículo.

Palabras claves: Plan óptimo de producción, optimización, teoría de restricciones, programación lineal.

ABSTRACT

The purpose of this investigation was to design an optimal production plan for a soft drink bottling plant located in San Jose de Cucuta (Colombia), where the productive system's constraints were identified to develop a mathematical model following the operations research methodology, specifically the linear programming technique, together with the theory of constraints. As a result, the optimal quantities of manufacturing were obtained at the lowest cost for the selected period (June, 2011). Besides, the study also allowed us to identify an unused productive capacity, from which scenarios and opportunities were identified to use their resources. The mathematical model that represents the optimal production plan could be implemented in soft drink bottling plants that have the same characteristics of the case study considered in this article.

Keywords: Optimal production plan, optimization, theory of constraints, linear programming.

¹Facultad de ingeniería. Universidad Francisco de Paula Santander. Grupo de investigación en productividad y competitividad. San José de Cúcuta. Colombia.

²Departamento de Procesos Industriales. Facultad de ingeniería. Universidad Francisco de Paula Santander. Grupo de investigación en productividad y competitividad. San José de Cúcuta. Colombia.

Autor para correspondencia: *vivianakarolinaot@ufps.edu.co

Recibido: 21.04.2012 Aceptado: 29.08.2012

INTRODUCCIÓN

Existen hoy en día diversas técnicas de programación de la producción; entre ellas, se encuentran aquellas que buscan optimizar los recursos de la organización y que están relacionadas con la Investigación de Operaciones (Herrera, 2011). La investigación de operaciones es un método que permite encontrar las relaciones óptimas que mejor operen un sistema, dado un objetivo específico (Prawda, 2004). Un elemento principal de la investigación de operaciones es el modelo matemático (Taha, 2004), aunque existen diversas técnicas para la resolución de estos modelos, Taha (2004) y Kaufmann (1978) resaltan la importancia de la técnica de programación lineal. Dentro de los problemas estudiados por la investigación de operaciones se encuentra el problema de la asignación de recursos o programación de la producción (Moya, 2003). Este problema se presenta cuando se está tratando de distribuir algún recurso limitado o escaso entre actividades en competencia (Buffa & Sarin, 2000). El problema consiste en determinar cuánto fabricar de cada producto (Moya, 2003). Según Eppen *et al.* (2000) esto constituye la decisión óptima de un modelo de producción, en donde se determina la cantidad óptima que se debe producir de cada producto, para construir el plan óptimo de producción. El plan maestro de producción (MPS) es un plan de entrega para la organización manufacturera. Incluye las cantidades exactas y los tiempos de entrega para cada producto terminado. El MPS debe tomar en cuenta las restricciones de fabricación y el inventario de producto terminado (Sipper & Bulfin, 1998). La programación de la producción, o mejor denominada scheduling, es una respuesta operativa para optimizar la producción de un bien o servicio (Herrera, 2011). La programación determina el lanzamiento de las órdenes de fabricación y la secuencia de operaciones (González, 2010), mientras que en el programa maestro de producción se detalla cuántos elementos finales se producirán dentro de períodos específicos (Krajewski *et al.*, 2008). La teoría de restricciones (TOC) es un método sistemático que se centra en administrar activamente las restricciones que impiden el progreso de la empresa hacia su meta (Krajewski *et al.*, 2008). El método TOC implica aceptar la existencia de una fábrica desequilibrada, en la que algunos de los recursos tienen menor capacidad de producción que otros; al recurso más limitado se le llama la restricción (Fogarty *et al.*, 1999).

Se han realizado investigaciones con el objetivo de optimizar la programación de la producción, bien sea mediante la aplicación de la programación lineal y/o la teoría de restricciones en diversos sectores productivos. En la producción de alimentos, específicamente en el procesamiento de filetes de pescado, Salas *et al.* (2007) implementaron un modelo de programación lineal con el fin de determinar las cantidades de fabricación semanal que arrojan la mayor contribución a las utilidades netas de la empresa. Galindo (2006) propone un modelo matemático para la producción de alimentos balanceados, apoyado en la programación lineal para dar solución a la necesidad de desarrollar y crear productos que cumplan con los requisitos nutricionales, y que permitan el aprovechamiento de recursos cada vez más limitados, destacando el desarrollo de las técnicas de investigación de operaciones como mecanismo para que la comunidad científica, técnica y empresarial esté en capacidad de optimizar los procesos productivos. Berruto *et al.* (2006) propusieron un método para la optimización de la programación de la producción de una embotelladora de vinos, basado en un procedimiento de optimización de dos pasos, utilizando un algoritmo de programación lineal entera-mixta. En su estudio resaltan lo difícil de realizar la planeación de una planta embotelladora, debido a que requiere de mucho tiempo y es altamente influenciada por la estacionalidad y los numerosos tipos de envase requeridos. Romero, *et al.* (2004) diseñaron un modelo de programación de la producción para la industria del aserrín. El estudio determinó que existía un incremento en la rentabilidad de los pedidos al optimizar la asignación de materia prima para la elaboración de un pedido. Álvarez *et al.* (2004) propusieron una programación de operaciones en Pymes del sector muebles de madera mediante TOC; en su artículo señalan la importancia de producir con un aprovechamiento integral de la capacidad instalada.

Otras Industrias han recibido aportes con el fin de desarrollar un plan óptimo de producción. Gessa *et al.* (2008) aplicaron un modelo de programación lineal para determinar un programa óptimo de producción que proporcione el máximo beneficio empresarial, teniendo en cuenta las limitaciones de emisiones de dióxido de carbono establecidas por el protocolo de Kioto. A su vez, Ulin (1992) realizó un Plan Óptimo de Producción en Aserraderos en el Estado de México. Garza & González (2004) elaboraron un plan óptimo de producción a partir de un modelo de programación multiobjetivo, que permite el máximo aprovechamiento de la capacidad instalada de una empresa de productos de jabonería. Álvarez & Reinoso (2009) formularon un modelo de programación lineal con variables enteras para obtener un plan óptimo de producción en una fábrica de calzados. Albornoz & Ortiz-Araya (2010) formularon tres modelos con recurso de programación estocástica multietapa; el primero para abordar un plan agregado de la producción por familias de productos, y los otros dos para obtener un plan detallado de producción por producto con el objetivo de encontrar los valores óptimos sobre las decisiones inmersas en la planificación de la producción. Coronel de Renolfi & Brassiolo (2008) usaron las técnicas de programación lineal para determinar un plan óptimo de producción anual, evaluando económicamente dos modelos prediales de uso silvopastoril. En diversos sectores se ha utilizado la teoría de restricciones como herramienta para la mejora continua, por lo cual se han desarrollado trabajos de investigación al respecto, Abisambra & Mantilla (2008) aplicaron la teoría de restricciones a los procesos de producción de la planta de fundición de Imusa, mediante la cual propusieron la implementación de una programación basada en TOC, lo cual mejoró el throughput de la restricción identificada respecto a su estado inicial. Asimismo, se ha aplicado la teoría de restricciones junto con la investigación de operaciones, específicamente la técnica de programación lineal, para determinar las cantidades óptimas de fabricación en una empresa de calzado y confecciones (Parra, 2011; Ortiz & Osorio, 2010).

Según Romero *et al.* (2004), el proceso de planificación y programación no está acompañado de herramientas que permitan eficiencia y eficacia en el desarrollo de sus operaciones, por lo cual es un campo abierto a la aplicación de la investigación de operaciones en muchos sectores. En el sector calzado, Niño (2011) resaltó la necesidad de capacitación a gerentes de producción en cuanto a habilidades técnicas relacionadas con la planificación, programación y control de la producción, por medio de herramientas informáticas. En el sector cerámico se evidenció que los directores de producción no están muy familiarizados con herramientas informáticas para desarrollar las funciones de planeación, programación y control de la producción e inventarios (Caicedo, 2011). Los dos problemas claves en la programación de la producción son las "prioridades" y la "capacidad" (Wright, 1984). Una errónea programación tiene efectos importantes en el aspecto operacional, como son la pérdida de eficiencia, productividad y aprovechamiento de la materia prima, con su incidencia en los costos de producción (Romero *et al.*, 2004). Por lo que es necesario que las empresas empiecen el camino de la mejora continua implantando un correcto sistema de programación de la producción (Álvarez *et al.*, 2004). "Desafortunadamente, muchos productores tienen sistemas de programación de la producción inefectivos", (Herrmann, 2007).

En una embotelladora de bebidas gaseosas, antes de iniciar su proceso productivo, se realiza una programación previa de los formatos y de los sabores que se van a producir para establecer la jornada o el cronograma de producción a seguir, siguiendo los pasos correspondientes para llevarlo a cabo. Sin embargo, ocasionalmente se pueden presentar discrepancias entre las cantidades de bebidas producidas y las bebidas vendidas, dando lugar a la eventual aparición de faltantes o de sobrantes en inventarios de los productos, impactando en los costos y en las utilidades de la compañía. En la mayoría de los casos, en las embotelladoras de vinos la programación de la producción se realiza empíricamente, basándose en la experiencia de un grupo de trabajo (Berruto *et al.*, 2006). No obstante, en la mayoría de las industrias procesadoras de alimentos, y en muchos centros tecnológicos relacionados, existe una falta de

mano de obra técnica y de gestión que se encuentre familiarizada con métodos de simulación y optimización (Banga *et al.*, 2003). Además, la programación de la producción de la industria agroalimentaria posee más restricciones, debido a la estacionalidad, vida útil del producto y condiciones de almacenamiento (Gargouri *et al.*, 2002). Banga, *et al.* (2003) concluyen que los modelos matemáticos de optimización son una herramienta muy poderosa para la construcción de sistemas que apoyen la toma de decisiones. Asimismo, la programación apoyada en sistemas puede ayudar a fabricantes a mejorar las entregas, responder con rapidez ante las órdenes de los clientes, y crear programas realistas (LaForge & Craighead, 1998). Aun así, “la mayor dificultad no radica en la programación propiamente dicha, sino, más bien, en la implementación de ésta” (Álvarez *et al.*, 2004).

El objetivo de esta investigación es diseñar un plan óptimo de producción en una planta embotelladora, lo cual le brindará a la organización una herramienta que permita conocer las cantidades óptimas a fabricar. Finalmente, lo anterior facilita la respuesta de la compañía ante las necesidades de la demanda, considerando las restricciones del sistema productivo, logrando así minimizar los costos y/o maximizar las utilidades de la producción.

MATERIALES Y MÉTODOS

La unidad de estudio es una planta embotelladora de bebidas gaseosas ubicada en la ciudad de San José de Cúcuta, Colombia. Su producción alcanza las 2.107.743 cajas de gaseosas anuales, distribuidas entre los 25 productos que allí se elaboran. La demanda de sus productos tiene un comportamiento horizontal, con variaciones aleatorias no pronunciadas a lo largo del año, excepto en el mes de diciembre, donde las ventas presentan estacionalidad.

Para desarrollar un plan óptimo de producción se aplicó la metodología de la investigación de operaciones y la teoría de restricciones (TOC) a la línea de bebidas gaseosas para el mes de junio de 2011. Se escogió ese período debido a que en meses anteriores la planta embotelladora se había estado preparando para unos posibles cambios en su línea de producción; por tanto, el comportamiento de la producción en esos meses no es representativo. Se optó por tomar el mes de junio, ya que para ese entonces la embotelladora había regulado sus operaciones.

El uso de métodos cuantitativos para solucionar problemas, generalmente implica a mucha gente de toda la organización. El proceso de aplicar métodos cuantitativos requiere una sucesión sistemática de pasos, los cuales se observan en la figura 1, extraído de Mathur & Solow (1996).

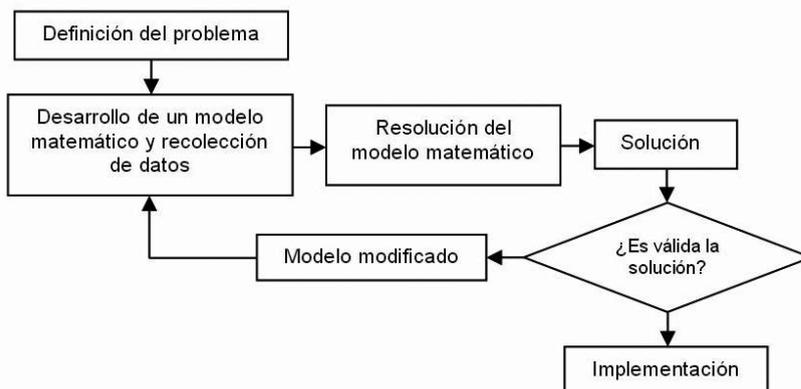


Figura 1. Metodología de la investigación de operaciones

El primer paso es identificar, comprender y describir, en términos precisos, el problema que la organización enfrenta. Luego se expresa el problema en una forma matemática, esto es, formulando un modelo matemático. Posteriormente se resuelve el modelo, es decir, se obtienen valores numéricos para la variable de decisión. Después se procede a validar la solución. Si durante este paso se encuentra que la solución no puede llevarse a cabo, se pueden identificar las limitaciones que fueron omitidas durante la formulación del problema original o revisar si algunas de las limitaciones eran incorrectas y necesitan modificarse.

El modelo de programación lineal, como en cualquier modelo de investigación de operaciones, tiene tres componentes básicos: las variables de decisión que se trata de determinar, el objetivo (la meta) que se trata de optimizar, y las restricciones que se deben satisfacer. Mediante la metodología de la investigación de operaciones se desarrolla el paso 1 de la teoría de restricciones.

La teoría de restricciones (TOC)

La base de la teoría de restricciones es su definición de restricción: cualquier cosa que limita un sistema para lograr un desempeño más alto en el cumplimiento de su meta. Las restricciones pueden ser de recursos internos, de mercado y de políticas. TOC se centra en el papel que juegan las restricciones en los sistemas, con el fin de mejorar el desempeño del mismo hacia la meta; la meta de cualquier negocio es hacer más dinero ahora y a futuro (Goldratt & Cox, 2008). La figura 2 resume los 5 pasos de la teoría de restricciones, adaptado de Sipper & Bulfin (1998).

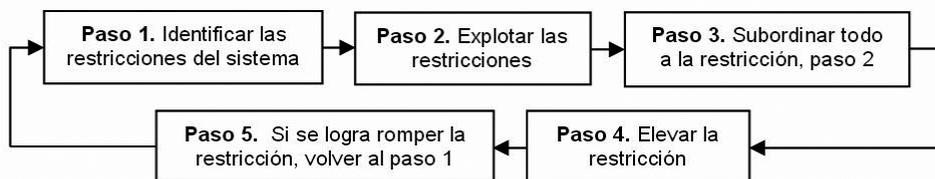


Figura 2. Pasos de la Teoría de restricciones

Desarrollo del programa paso a paso

Paso 1. Definición de variables de decisión del programa óptimo de producción

C_{ij} : Cantidad de cajas a fabricar por producto i , durante el periodo j (mes).

Definición de parámetros constantes del modelo

- CU_i : Costo de fabricación por caja de producto i
- D_{ij} : Demanda del producto i en cajas en el período j
- E_{ij} : Envase disponible del producto i en cajas en el período j
- TP_i : Tiempo de fabricación requerido por caja del producto i , expresado en horas/caja
- T_j : Tiempo total disponible (en horas) para el envasado de productos en el período j
- LJS/C_i : Litros de jarabe simple requeridos por caja de producto i

- LJSmín_j : Capacidad mínima de preparación de jarabe simple, en litros, durante el período j
- LJSmáx_j : Capacidad máxima de preparación de jarabe simple, en litros, en el período j
- LJT/C_i : Litros de jarabe terminado requeridos por caja de producto i
- LJT_j : Capacidad de preparación de jarabe terminado, en litros, en el período j

Los tiempos de fabricación por caja de producto consideran los tiempos de conversión de máquinas, tiempos de lavado de tuberías y tiempos de carga de envase, los cuales están incluidos dentro del estudio de tiempos realizado con el fin de determinar el tiempo estándar de fabricación. Estos tiempos constituyen un suplemento adicional dentro del estudio. Por tanto, los tiempos de alistamiento identificados anteriormente no se consideran un parámetro constante dentro del modelo.

Paso 2. Función objetivo

Para el programa óptimo de producción el objetivo propuesto es minimizar los costos de producción. La función objetivo denominada Z viene dada por la expresión:

$$\text{Min } Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n C_{ij} \cdot C_{ij} \quad (1)$$

Paso 3. Identificación de restricciones

El modelo matemático tiene en cuenta las limitaciones de capacidad de envasado, demanda, disponibilidad de envase, capacidad de preparación de jarabe simple y capacidad de preparación de jarabe terminado.

Restricción de capacidad de envasado

La capacidad de envasado se calculó mediante la ejecución de un estudio de tiempos.

$$\sum_{i=1}^n TP_i \cdot C_{ij} \leq T_j \quad \forall i=1\dots I; j=1\dots J \quad (2)$$

Restricción de demanda

Los valores de la demanda fueron dados por el departamento de producción de la compañía.

$$C_{ij} \geq D_{ij} \quad \forall i=1\dots I; j=1\dots J \quad (3)$$

Restricción de disponibilidad de envase

Los valores de disponibilidad de envase fueron dados por el departamento de producción de la compañía.

$$C_{ij} \leq E_{ij} \quad \forall i=1\dots I; j=1\dots J \quad (4)$$

Al analizar las restricciones de demanda y envase identificadas, se evidenció la redundancia existente entre las dos, por lo cual se unificó en una sola.

Restricción de capacidad de preparación de jarabe simple

En la preparación de jarabe simple existen dos tipos de restricciones, que corresponden a una capacidad mínima y a una capacidad máxima de preparación.

Capacidad mínima y máxima de preparación de jarabe simple

$$LJSmín_j \leq \sum_{i=1}^n (LJS/C_i) \cdot C_{ij} \leq LJSmáx_j \quad \forall i=1\dots I; j=1\dots J \quad (5)$$

Restricción de capacidad de preparación de jarabe terminado

$$\sum_{i=1}^n (LJT/C_i) \cdot C_{ij} \leq LJT_j \quad \forall i=1\dots I; j=1\dots J \quad (6)$$

Las capacidades de jarabe simple y jarabe terminado fueron determinadas mediante el cálculo del número de preparaciones disponibles en el período j (mes).

Restricción de no negatividad

Esta restricción hace referencia a que la variable de decisión del modelo no deber ser negativa.

$$C_{ij} \geq 0 \quad \forall i=1\dots I; j=1\dots J \quad (7)$$

El modelo matemático de programación lineal para la programación óptima de la producción, se muestra a continuación:

Función objetivo

$$\text{Ecuación (1): } \text{Min } Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n CU_i \cdot C_{ij}$$

Sujeto a:

$$\text{Ecuaciones (2), (3), (4), (5), (6), (7)}$$

RESULTADOS

Con el modelo matemático diseñado, se procede a identificar el cuello de botella del sistema productivo, paso 1 de la teoría de restricciones. Conociendo las capacidades de producción, se analizaron las restricciones de tipo internas que hacen referencia a los recursos productivos de la compañía, como son: el tiempo de envasado y la preparación de jarabes. Asimismo, Berruto *et al.* (2006) consideraron los tiempos de procesamiento en su modelo para optimizar la programación de la producción en una embotelladora de vinos. Sin embargo, consideran la disponibilidad de mano de obra en tiempo extra, aspecto que difiere del presente estudio. De la misma manera, el presente caso considera la preparación de la bebida, mientras que los

autores citados no lo consideran pertinente en su estudio. Mediante la realización de un estudio de tiempos y análisis de cargas de trabajo, se identificó a la operación de envasado como la más lenta dentro de la línea de producción. Como resultado de dicho análisis se evidenció una capacidad de envasado no usada equivalente al 21,14% (Tabla 1).

Tabla 1. Análisis del tanto por ciento (%) de utilización de los recursos

	Recurso	Tiempo requerido total (minutos)	Tiempo disponible en el mes (minutos/junio)	Utilización %	Capacidad no utilizada %
Preparación de jarabe simple	1	4424	9600	46,08	53,92
Preparación de jarabe terminado	2	5513	9600	57,43	42,57
Envasado de la bebida	3	7570	9600	78,86	21,14

Se observa que no hay un cuello de botella en el sistema productivo; por tanto, se procede a realizar el montaje y análisis del modelo matemático, en el software WinQSB versión 2.0, subprograma Linear and Integer Programming, desarrollado por el Dr. Yih-Long Chang. La solución del modelo identificó a la demanda como la verdadera limitante de la organización, aunque, como se dijo anteriormente, esta restricción es redundante con la restricción de disponibilidad de envase. Se conoce con certeza que no se puede envasar más de lo requerido por el mercado y, aún si para algunos productos la disponibilidad de envase es menor que su demanda, la embotelladora debe asegurar el inventario de envase para dar cumplimiento al mercado. Además, la prioridad debe ser aumentar la demanda para poder explotar al máximo la capacidad de envasado disponible y así llegar a la meta.

Berruto *et al.* (2006) coinciden con este estudio en la importancia de asegurar el inventario de envase; en su modelo consideran un mínimo de inventario de este recurso en un período determinado, al igual que las ventas perdidas, las cuales no pueden exceder un cierto porcentaje de la demanda, mientras en este estudio no se contempla la existencia de inventarios previos, asumiendo un valor inicial de cero. Las cantidades óptimas de fabricación para el mes de junio del 2011 se pueden observar en la tabla 2.

Tabla 2. Cantidades óptimas de fabricación para el mes de junio

Producto	A1	B1	C1	D1	E1	F1	G1	H1	I1	B2	C2	D2	E2
Cantidad de cajas a fabricar (junio)	3228	3931	14471	7806	4534	9886	3432	3197	2328	1289	4375	2742	1122
Producto	F2	G2	H2	I2	B3	C3	D3	E3	F3	G3	H3	I3	
Cantidad de cajas a fabricar (junio)	3038	1126	1001	731	4171	26048	15497	4239	23606	3025	2060	750	

El nombre de cada uno de los productos está conformado de la siguiente manera: cada letra, desde la A hasta la I representa el sabor de la bebida; en este caso, la empresa maneja un total de 9 sabores. Cada número, del 1 al 3, representa el tipo de formato o de presentación del producto.

Berruto *et al.* (2006) también obtuvieron un programa óptimo de programación mensual; sin embargo, el modelo asignaba las cantidades a fabricar por cada semana hasta completar el período (un mes), quedando la programación diaria de la producción a cargo del jefe de planta o de la persona encargada. En este caso, el programa mensual no proporciona la distribución de los productos semana a semana. Por tanto, al igual que el caso citado, el jefe de planta debe realizar la asignación correspondiente para el período seleccionado. No obstante, Berruto *et al.* (2006) señalan que este método desarrollado es más eficiente, ya que permite cierta libertad al jefe de planta en la programación diaria de la producción y, además, se mantiene la solución óptima.

Conociendo las cantidades óptimas de fabricación, se determina la secuencia en que los productos deben ser enviados a producción. En el caso de la planta embotelladora de estudio, se debe considerar que cada sabor posee ciertas características organolépticas, las cuales son susceptibles a una posible contaminación cruzada; para esto, la compañía estableció el orden en el cual deben ser enviados los productos a producción, salvaguardando las características de calidad de cada sabor y el consumo de gas carbónico. Esto último se debe a que, al hacer cambios en producción entre sabores, hay pérdidas de gas carbónico en los equipos. La prioridad en que los productos deben ser enviados a producción se muestra en la tabla 3

Tabla 3. Prioridad en producción establecido por la planta embotelladora

Sabores	A	B	C	D	G	E	H	I	F
Prioridad en producción	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Lo expuesto anteriormente contradice a Corbett (2002) el cual indica que se debe dar prioridad a los productos que tienen un mayor tróput (o throughput) y, al mismo tiempo, dar prioridad a los productos que usan el menor tiempo de la restricción. Para este caso en particular no puede aplicarse, debido a las condiciones expuestas previamente.

La planta embotelladora considerada en este artículo se toma como una sola máquina, o máquina agregada, con un total de 14 operarios en la línea de producción de bebidas gaseosas.

Paso 2 de la teoría de restricciones, explotar las restricciones

Al haber identificado la restricción principal, se procede a explotarla, con el objetivo de plantear una serie de escenarios que permitan observar el comportamiento de los recursos productivos al modificar la cantidad de demanda requerida. Los escenarios fueron planteados aumentando aleatoriamente la demanda hasta su punto máximo, es decir, punto en el cual no se requiere de ninguna capacidad ni recurso adicional para satisfacer esa restricción. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. Escenarios y resultados

Escenario	Consumo adicional de recursos		
	Envasado	Jarabe simple	Jarabe terminado
1. Aumento de demanda en un 20%	No	No	No
2. Aumento de demanda en un 26.8%	No	No	No
3. Aumento de la demanda en un 30%	Si	No	No

Mediante el análisis de escenarios se evidenció que con los recursos disponibles la embotelladora puede responder a un incremento de su producción igual al 20%, llegando hasta un máximo de 26.8%, sin necesidad de consumir recursos adicionales. Al elevar la restricción en un 30% se observa que se requiere de tiempo adicional para el envasado de bebidas, pero no se necesitan capacidades de jarabe simple y terminado adicionales para continuar la producción. Salas *et al.* (2007), coinciden en que se debe producir en función de la satisfacción máxima de la demanda, si se desean maximizar las utilidades, y se cuenta con la capacidad y los recursos suficientes para satisfacerla. En este caso de estudio se identificó una capacidad productiva no utilizada, la cual debe ser enfocada en satisfacer los requerimientos de la demanda.

Paso 3. Subordinar todo a la restricción

Al observar el comportamiento de los recursos productivos mediante el análisis de escenarios, se pudo evidenciar que al subordinar todo a la restricción, el sistema productivo realiza un adecuado aprovechamiento de sus recursos, ya que utiliza la capacidad de envasado disponible en su totalidad, (se hace referencia al escenario N°2, en el cual se aumenta la demanda en un 26.8%). En la tabla 5 se observa el análisis del porcentaje de utilización de los recursos correspondiente, donde sólo la operación de envasado debe trabajar a su máxima capacidad y las operaciones anteriores (no cuellos de botella) subordinan su utilización al ritmo de la operación crítica (cuello de botella).

Tabla 5. Análisis del tanto por ciento (%) de utilización de los recursos al aumentarse la demanda en un 26.8%

	Recurso	Tiempo requerido total (minutos)	Tiempo disponible en el mes (minutos/junio)	Utilización	Capacidad no utilizada
Preparación de jarabe simple	1	5559	9600	57,91%	42,09%
Preparación de jarabe terminado	2	6933	9600	72,22%	27,78%
Envasado de la bebida	3	9565	9600	99,64%	0,36%

Paso 4. Elevar la restricción

Para elevar la restricción se debe contar con la demanda y, por ende, la disponibilidad de envase apropiada para realizar un mayor aprovechamiento de los recursos productivos, bien sea para el envasado de nuevos productos o de los productos que actualmente se fabrican. El análisis de escenarios mostró el porcentaje adicional de producción al cual la embotelladora puede responder, en este caso el 26.8%.

Paso 5. Si se logra romper con la restricción volver al paso 1

Con el fin de determinar cuál sería la próxima limitante en la organización, en el caso de romperse con la actual restricción, se decidió plantear un escenario aumentando la demanda, las capacidades de envasado de la bebida y de preparación de jarabe simple y jarabe terminado; para esto se tomó la determinación de evaluar el comportamiento de los recursos productivos al establecer un segundo turno de producción. Este nuevo turno de producción tiene las mismas características del primero, cuyos resultados se pueden observar en la tabla 6.

Tabla 6. Análisis del tanto por ciento (%) de utilización de los recursos creando un turno adicional de producción

	Recurso	Capacidad disponible	Capacidad consumida	Utilización %	Capacidad no utilizada %
Preparación de jarabe simple	1	530300 L	488741,70 L	92,16	7,84
Preparación de jarabe terminado	2	1299968 L	609062 L	46,85	53,15
Envasado de la bebida	3	320 min/junio	252,34 min/junio	78,86	21,14

El análisis de escenarios muestra una capacidad utilizada de preparación de jarabe simple igual al 92.16%. La capacidad no utilizada de este recurso, equivalente al 7.84%, puede no ser suficiente al presentarse un incremento en la demanda de bebidas gaseosas. Por tanto, se iniciaría nuevamente el ciclo de la teoría de restricciones, pero esta vez siendo la preparación de jarabe simple el cuello de botella del sistema productivo. De la misma manera, Abisambra & Mantilla (2008) plantearon un escenario aumentando la capacidad de la operación cuello de botella al doble para identificar el cuello de botella interno, aspecto que coincide con el presente estudio. Finalmente, este modelo busca proporcionar una herramienta útil para la programación de la producción en una planta embotelladora de bebidas gaseosas.

CONCLUSIONES

Se diseñó un modelo matemático, que representa el plan óptimo de producción de una embotelladora de gaseosas, para un período específico. La solución del modelo en el software WinQSB identificó la limitante principal de la organización, siendo en este caso la demanda, la cual está directamente relacionada con la disponibilidad de envase, lo que permite concluir que la restricción es externa.

Se obtuvieron las cantidades óptimas de fabricación en un estudio de caso de una embotelladora de gaseosas y se evidenció la existencia de una capacidad no utilizada equivalente al 21.14% en su operación más lenta, que resultó ser el envasado de la bebida. Identificando el desaprovechamiento de los recursos productivos en el tiempo de estudio.

Mediante el análisis de escenarios se obtuvo, como resultado final, que los recursos productivos disponibles pueden envasar hasta un 26,8% más de lo que se fabrica actualmente, logrando una máxima utilización (99,64%) de la operación más lenta (envasado), un 72,22% de la preparación de jarabe terminado y un 57,91% de la preparación de jarabe simple para el mes de junio de 2011.

El plan óptimo de producción, diseñado en la planta embotelladora de gaseosas, obtuvo el modelo matemático que puede ser utilizado por cualquier embotelladora que cuente con características y operaciones similares a las de la planta estudiada.

El presente modelo matemático podría incluir las siguientes mejoras: el manejo de políticas de inventarios al inicio y al final del período seleccionado, y ampliar el modelo matemático diseñado ajustándolo a un modelo de programación lineal por metas.

AGRADECIMIENTOS

A todo el personal de la planta embotelladora, por toda su colaboración, apoyo y asesoría para el desarrollo de dicho estudio.

REFERENCIAS

Abisambra, A; Mantilla, L. Aplicación de la teoría de restricciones (TOC) a los procesos de producción de la planta de fundición de Imusa. *Revista Soluciones de Postgrado EIA*. 2008. No.2. [en línea] <<http://revistapostgrado.eia.edu.co/Revista%20Edici%F3n%20N%BA.2/Solucioness%20%20art%209.pdf>> [consultado: 15/02/12].

Albornoz, V.M; Ortiz-Araya, V. Planificación jerárquica de la producción bajo incertidumbre. 2010. [en línea] <http://www3.industrias.usm.cl/wwwind/images/users/71/ICPR20_VALBORNOZ.pdf> [consultado: 10/01/12].

Álvarez, J; Inche, J; Salvador, G. Programación de operaciones mediante la teoría de restricciones. *Industrial data*, 2004, vol 7, num 1, p.12-19.

Álvarez, U; Reinoso. A. Un modelo de planificación de la producción en una fábrica de calzados. Tesis de magister. Concepción, Chile: Universidad de concepción. 2009. [en línea] <<http://udec.alerta.cl/xmlui/bitstream/handle/123456789/105/tesis.pdf?sequence=2>> [consultado: 15/08/12].

Banga, J. R; Balsa-Canto, E; Moles, C. G; Alonso, A. A. Improving food processing using modern optimization methods. *Trends in Food Science and Tech*, 2003, vol 14, num 4, p. 131-144.

Berruto, R; Tortia, C; Gay, P. Wine bottling scheduling optimization. 2006. [en línea] <<http://www.deiafa.unito.it/pdf/P426.pdf>> [consultado: 12/02/12].

Buffa, E.S; Sarin, R.K. *Administración de la producción y de las operaciones*. México: Limusa. 2000. p. 939.

Caicedo, A. Necesidades de capacitación en habilidades gerenciales para los gerentes de producción del sector de la arcilla del área metropolitana de Cúcuta. *Revista Respuestas*, 2011, Año 16, num 1. Colombia, Universidad Francisco de Paula Santander, p.30-37.

Corbett, T. *La Contabilidad del Trúput. El sistema de Contabilidad gerencial de TOC*. Colombia: Piénsalo. 2002. p. 178.

Coronel de Renolfi, M; Brassiolo, M.M. Uso de sistemas silvopastoriles en la zona de amortiguamiento del Parque Nacional Copo, Santiago del Estero. Un análisis económico. *Revista de ciencias forestales*, 2008, num 16, p. 69-83. [en línea] <<http://redalyc.uaemex.mx/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=48112952007>> [consultado: 15/08/12].

Eppen, G.D; et al. *Investigación de operaciones en la Ciencia Administrativa. Construcción de Modelos para la Toma de Decisiones con Hojas de Cálculo Electrónicas*. México: Prentice Hall. 2000. p. 702.

Fogarty, D; Blackstone, J; Hoffmann, T. *Administración de la producción e inventarios*. México: CECSA. 1999, p. 994.

Galindo, M.R. Producción de alimentos apoyada con programación lineal. *Boletín electrónico Ingeniería primero, 2006, num .2*. [en línea] <http://www.tec.url.edu.gt/boletin/URL_02_IND01.pdf> [consultado: 08/02/12].

Garza, R.; González, C. Modelo matemático para la planificación de la producción en la cadena de suministro. *revista Ingeniería Industrial, 2004, vol 25, num 2*. [en línea] <<http://rii.cujae.edu.cu/index.php/revistaind/article/view/158>> [consultado: 14/08/12].

Gargouri, E; Hammadi, S, Borne, P. A study of scheduling problem in agro-food manufacturing systems. *Mathematics and Computers in Simulation, 2002, vol 60, num 3-5, p. 277-291*.

Gessa, A; Rabadán, I; Jurado, J. La planificación de la producción industrial y las emisiones de CO2. Aplicación de un modelo de programación lineal. *Estableciendo puentes en una economía global*. 2008. vol 1. [en línea] <<http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2710829>> [consultado: 14/08/12].

Goldratt, E; Cox, J. *La meta*. Buenos aires: Granica. 2008. pp. 527.

González, M. *Gestión de la producción. Cómo planificar y controlar la producción industrial*. España: Ideas propias.2010.p. 150.

Herrera, M. Programación de la producción. Una perspectiva de productividad y competitividad. *Revista Virtual Pro, 2011, num 111*. [en línea] <http://www.revistavirtualpro.com/files/ed_2_01104.pdf> [consultado: 10/02/12].

Herrmann, J.W. The legacy of Taylor, Gantt, and Johnson. How to Improve Production Scheduling. 2007. *ISR Technical Report*. [en línea] <http://drum.lib.umd.edu/bitstream/1903/7488/4/25813_cov.pdf> [consultado: 12/02/12].

Kaufmann, A. *Métodos y modelos de la investigación de operaciones. Las matemáticas de la empresa. Tomo 1*. México: CECSA. 1978.p. 565.

Krajewski, L.J; Ritzman, L.P; Malhotra. M. K. *Administración de operaciones*. México: Prentice Hall. 2008. p. 752.

LaForge, R. L; Craighead, C. W. *Manufacturing scheduling and supply chain integration. A survey of current practice*. Virginia: American Production and Inventory Control Society. 1998. p. 41.

Mathur, K; Solow, D. *Investigación de operaciones. El arte en la toma de decisiones*. México: Prentice Hall. 1996. p. 977.

Moya, M. *Investigación de operaciones. La programación lineal*. Costa rica: EUNED. 2003. p. 264.

Ortiz, Y.; Osorio, E. Propuesta de programación de la producción de la empresa confecciones y7 en la ciudad de Cúcuta por medio de la teoría de restricciones. Tesis de pregrado. San José de Cúcuta, Norte de Santander: Universidad Francisco de Paula Santander. 2010

Niño, J. Plan de capacitación en habilidades gerenciales para los gerentes de producción del sector industrial del calzado, cuero y sus manufacturas en el área metropolitana de Cúcuta. Tesis de pregrado. San José de Cúcuta, Norte de Santander: Universidad Francisco de Paula Santander. 2011

Parra, J. Programación de la producción por medio del modelo de teoría de restricciones para la empresa de calzado mountain power de la ciudad de Cúcuta. Tesis de pregrado. San José de Cúcuta, Norte de Santander: Universidad Francisco de Paula Santander. 2011

Prawda, J. *Métodos y modelos de investigación de operaciones. Vol. 1. Modelos determinísticos.* México: Limusa. 2004. p. 936.

Romero, R; Poblete, M; Baesler, F. Modelo de programación de la producción para la industria del aserrío. *Revista Ingeniería Industrial. 2004.* Año 3, num 1, p.19-23.

Salas, R; Capachero, Y; Amaya, M; Otero, I. Implementación de un modelo de programación lineal para la programación de la producción de filetes de pescado. Caso Colombiano. *Revista Virtual Pro. 2007.* [en línea] <http://www.revistavirtualpro.com/files/TI08_2007_09.pdf> [consultado: 12/03/12].

Sipper, D; Bulfin, R. *Planeación y control de la producción.* México: McGraw Hill. 1998. p. 658

Taha, H.A. *Investigación de operaciones.* México: Prentice Hall. 2004. p. 848.

Ulin, A. *Plan Óptimo de Producción en Aserraderos en el Estado de México. Caso Zinacantepec.* Tesis de Licenciatura. Chapingo, México. Universidad Autónoma Chapingo. 1992

Yih-Long Chang. WinQSB version 2.0. For Windows 95, 98, ME and 2000. Decision Support Software for MS/OM. 2008

Wight, O. W. *Production and Inventory Management in the Computer Age.* New York: Van Nostrand Reinhold Company, Inc. 1984. p. 284.