

PROGRAMACIÓN DE OPERACIONES PARA EL LLENADO DE TOLVAS DOSIFICADORAS EN UNA EMPRESA DE CONCENTRADOS*

Gloria Ramírez**
Marcela Torné***
Juan Orejuela-Cabrera****

Recibido: 03/10/2011

Aceptado: 30/05/2012

RESUMEN

En el presente artículo de investigación se desarrolla una propuesta de programación de operaciones que garantiza la toma eficiente de decisiones en el mediano y corto plazo de las industrias fabricantes de alimento concentrado. La metodología planteada parte de la generación de la explosión de materiales bajo el enfoque del MRP y posteriormente continúa con el desarrollo de un modelo de programación lineal entera mixta que coordina las operaciones de llenado de tolvas dosificadoras de manera que se cuente oportunamente con las materias primas requeridas en el proceso de dosificación y se minimicen los costos relevantes en el sistema. La propuesta se aplicó a un caso de estudio con datos reales y presentó mejores resultados que los obtenidos en la práctica por esta industria.

Palabras clave: programación de operaciones, programación lineal entera mixta, alimentos concentrados, planeación de requerimiento de materiales, planificación de la producción.

* Este trabajo es producto de una investigación de pregrado, realizado en cooperación entre el programa de Ingeniería Industrial de la Sede Cali y de la Sede Buga de la Universidad del Valle.

** Msc. en Ingeniería Industrial. Docente Tiempo Completo. Programa Ingeniería Industrial. Universidad del Valle, sede Buga. E-mail: gloria.ramirez@correounivalle.edu.co.

*** Ingeniera Industrial. Especialista en Logística (C). Universidad del Valle, sede Buga. E-mail: mtorne@riopaila-castilla.com.

**** Msc. en Ingeniería Industrial. Docente tiempo completo. Escuela de Ingeniería Industrial y Estadística. Universidad del Valle. E-mail: juan.orejuela@correounivalle.edu.co.

SCHEDULING HOPPERS FILLING OPERATIONS IN THE ANIMAL CONCENTRATED FEEDING INDUSTRY

ABSTRACT

This research paper develops a scheduling operations propose to ensure efficient decision making in the short and medium term of concentrated feeding industry. The proposed methodology part of generating the explosion of materials under the MRP approach and then continues whit the development of a mixed integer linear programming that coordinates the hopper filling operations so that the raw materials are opportunely in the dosing process and minimize the relevant costs in the system. The proposal was applied to a case study whit real data and showed better results than those obtained in practice by this industry.

Key words: Scheduling, Mixed integer lineal programming, concentrated feeding industry, Materials requirements planning, production planning.

INTRODUCCIÓN

La planeación y control de la producción juegan un papel importante dentro de las empresas de manufactura ya que permiten satisfacer las necesidades de los clientes, los objetivos empresariales y las restricciones propias del sistema mediante la utilización y coordinación efectiva de los recursos disponibles.

Por lo general, el proceso de toma de decisiones de la planeación y control de la producción tiene una estructura jerárquica que está conformada por tres niveles principales: las decisiones estratégicas o de largo plazo, las decisiones agregadas o de mediano plazo y las decisiones operativas o de corto plazo [1-2].

Las decisiones a largo plazo se enfocan en las necesidades globales y los objetivos estratégicos de la empresa, tales como la ubicación de las instalaciones, las previsiones de la demanda y el diseño de los productos. Las decisiones de mediano plazo a menudo implican el establecimiento del programa maestro de producción, *Master Production Schedule MPS* y la planeación de los requerimientos de materiales, *Material Requirement Planning MRP*. Finalmente, las decisiones a corto plazo implican el día a día de la programación de operaciones, la asignación de los recursos, la secuencia del trabajo, y el control de los talleres [3].

En este documento, la atención se centra principalmente en las decisiones de corto y mediano plazo involucradas en las empresas de alimentos balanceados para animales. En este tipo de industrias el proceso de fabricación parte de la combinación o mezclas de materias primas mediante tolvas dosificadoras. De esta manera, las decisiones de mediano plazo se ocupan de determinar, dado el plan de producción, los requerimientos de materiales que deben estar disponibles en tolvas durante los diferentes periodos de tiempo. Por su parte, las decisiones de corto plazo apuntan a programar correctamente las operaciones de llenado de tolvas de manera que los requerimientos de materiales

establecidos en las decisiones de mediano plazo se cumplan.

Actualmente, un inconveniente que se presenta en la práctica de las industrias de alimentos balanceados para animales es que las decisiones de mediano y corto plazo se toman de manera informal y poco tecnificadas, lo cual genera frecuentes paros en la producción a raíz de la ausencia de materias primas en el proceso de dosificación y esto, a su vez, ocasiona consecuencias como subutilización de los recursos, incumplimiento en las fechas de entrega, disminución de la productividad, aumento de los costos y altos inventarios innecesarios [4].

Teniendo en cuenta lo anterior, en el presente trabajo se desarrolla una propuesta de programación de operaciones que garantiza la toma eficiente de decisiones en el mediano y corto plazo de las industrias fabricantes de alimento concentrado. La propuesta inicia con la generación de la explosión de materiales bajo el enfoque del MRP y posteriormente se ejecuta un modelo de programación lineal entera mixta que coordina las operaciones de llenado de tolvas dosificadoras y tiene como medida de desempeño la minimización de los costos de alistamiento y mantenimiento de inventario.

El presente artículo se estructura de la siguiente manera: en la sección 1 se presenta una revisión bibliográfica con las investigaciones que se tomaron como referencia para el desarrollo de la propuesta, la cual será descrita detalladamente en la sección 2. Posteriormente, en la sección 3 se presentan los resultados obtenidos al validar la propuesta en un caso de estudio. En la sección 4 se realiza un análisis de sensibilidad y finalmente, en la sección 5 se presentarán las conclusiones obtenidas.

1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Dentro de la literatura existen diversos estudios que contribuyen al desarrollo de la propuesta realizada en el presente artículo. Autores como J. Domínguez et al. [2], realizan la explosión de

materiales a partir de tres informaciones básicas: el programa maestro de producción, las listas de materiales, *Bill Of Material BOM* y los registros de inventario. Igualmente, otros autores han utilizado este punto de vista para desarrollar la explosión de materiales bajo el enfoque del MRP en diferentes industrias, tales como las fabricantes de aviones [5] y las empresas manufactureras de países como Grecia [6] y Malasia [7].

A pesar del aporte significativo que ha tenido el MRP en las industrias manufactureras muchos autores han expuesto la necesidad de mejorar sus características iniciales. Dentro de estos se puede encontrar a D. Nakagiri y S. Kuriyama [8], quienes proponen una nueva regla de prioridad que incluye en la toma de decisiones los pedidos pendientes por entregar a los clientes y los pedidos pendientes por recibir de los proveedores, dando mayor importancia a aquellos materiales que presentan la diferencia más alta entre estos dos parámetros.

Otros autores que proponen un cambio en el MRP son J.C Ho y Y.L. Chang [9], estos reflejan la necesidad de que la explosión de materiales vaya más allá del establecimiento de lo que se va a comprar o procesar y el momento en que esto se debe hacer; por tal motivo proponen un modelo de optimización que integra el Plan de Requerimientos de Materiales MRP y la programación de operaciones mediante la filosofía del *Just in Time JIT*. El modelo establece las operaciones que se deben llevar a cabo en los diferentes períodos de tiempo de manera que se cumpla el MRP y se minimicen los costos totales de producción del sistema.

Dada la importancia y los buenos resultados que se obtienen al integrar el MRP con un modelo de programación de operaciones, se tomaron como referencia diversos trabajos de programación que puedan ser integrados a la explosión de materiales y que involucran factores como la asignación de recursos, el tamaño del lote y los tiempos de alistamiento dependientes de la secuencia. Específicamente, en las industrias de alimentos los tiempos de alistamiento dependientes de la secuencia son

de vital importancia en la programación, porque algunas materias primas o productos contaminan a otros si se presentan lotes sucesivos, lo cual hace necesario hacer operaciones de limpieza para eliminar la contaminación y poder fabricar el siguiente lote de producción [10].

Por ejemplo, en las industrias fabricantes de yogur se deben realizar operaciones de limpieza en las líneas de producción cuando algunas grasas utilizadas para la fabricación de un tipo de producto no son compatibles con los demás tipos de grasas que se utilizan para fabricar otros lácteos, como lo mencionan P. Doganis y H. Sarimveiss [11]. En este sentido, la programación de operaciones debe apuntar a establecer la secuencia óptima de las operaciones que minimice los tiempos de alistamiento y que cumpla con los requerimientos de producción.

Dentro de los estudios de programación de operaciones que consideran los tiempos de alistamiento dependientes de la secuencia se encuentra la propuesta desarrollada por E. Gargouri et al. [12] quienes presentan un modelo de programación lineal para las industrias agroalimentarias, el cual minimiza los costos de los productos vencidos y toma en cuenta factores como las limpiezas, los tiempos de alistamiento dependientes de la secuencia y las fechas de vencimiento de los productos y las mezclas.

R. Tadei et al. [13], también tratan el problema de programación de operaciones dentro de la industria de alimentos, incluyendo la planificación agregada de la producción. En este caso, los tiempos de alistamiento no solo son generados por los productos sino también por las materias primas.

Por último, E. Del Rosario et al., [14] abordan el problema de programación de transportadores para el llenado de silos en una empresa de alimentos, mediante una heurística que minimiza los tiempos de alistamiento y garantiza que las materias primas se encuentren en estos silos cuando se necesiten. Como resultado, se obtiene la programación de

cada transportador y el inventario final disponible de cada materia prima.

De acuerdo con las investigaciones mencionadas, la propuesta planteada en este artículo presenta la explosión de materiales a partir del programa maestro de producción, las listas de materiales y los registros de inventarios. Adicionalmente, se desarrolla un modelo de programación de operaciones que toma en cuenta los tiempos de alistamiento y que se integra al MRP para coordinar las operaciones de llenado de tolvas. A continuación se describirá con más detalle la propuesta desarrollada

2 METODOLOGÍA

La metodología planteada parte del cálculo de los requerimientos de materiales, que se elabora de manera similar al enfoque del MRP, en donde a partir del Programa Maestro de Producción MPS, se desagregan las necesidades de materia prima y los tiempos en que estas serán requeridas, mediante la utilización de listas de materiales que en este caso son las dietas nutricionales de cada alimento.

Una vez desarrollado el plan de materiales, se procede con la programación de las operaciones necesarias para el cumplimiento de dicho plan. Esta programación considera tres aspectos fundamentales del sistema. El primero es la asignación de los recursos que se utilizarán para enviar los materiales desde su punto de almacenamiento, es decir, desde bodegas o silos, hasta las tolvas dosificadoras; el segundo es la cantidad de materias primas a enviar por dichos recursos; y el tercero es la secuencia en que se enviarán los materiales teniendo en cuenta que el cambio de materias primas genera tiempos de alistamientos totales dependientes de la secuencia. La figura 1 ilustra la metodología mencionada.

Adicionalmente, la programación de operaciones se hace a partir de un modelo matemático que se aplica en dos fases metodológicas, de acuerdo con la forma como se realiza el proceso, el cual inicia con un prellenado de tolvas y luego continúa el llenado y uso simultáneo de los materiales que se encuentran en dichas tolvas. La primera fase

tiene como función objetivo determinar los valores mínimos del inventario inicial que se deben tener en tolvas de cada materia prima antes de comenzar la producción. Esto se hace con el fin de que el sistema opere sin paros y pueda cumplir los requerimientos de materiales, dada la capacidad del sistema y los picos de la demanda. La segunda fase toma los valores obtenidos del inventario inicial como datos de entrada y apunta a la minimización de los costos de alistamiento y mantenimiento de inventario, cumpliendo al mismo tiempo con la demanda de los materiales en los distintos períodos de tiempo. Tanto en la fase 1 como en la fase 2 se utiliza el modelo de programación entera mixta propuesto, variando las funciones objetivo y algunas características de las restricciones.

2.1 Modelo propuesto

• Supuestos

Se asumen conocidos: el programa maestro de producción, las listas de materiales, las velocidades de llenado de los equipos, la capacidad de las tolvas y los tiempos de alistamiento.

Los tiempos de alistamiento dependen de la secuencia de las operaciones y solo son considerados

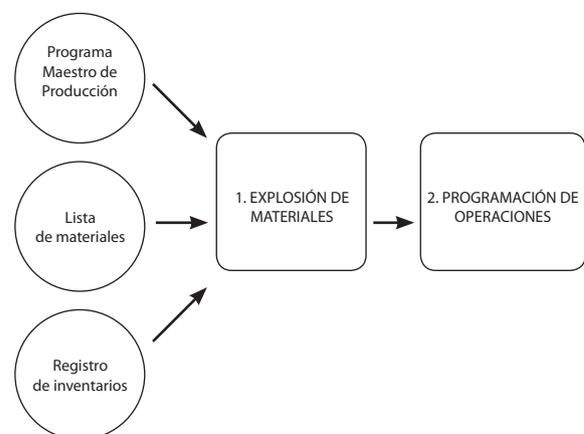


Figura 1. Metodología de la propuesta de programación de operaciones

Fuente: elaboración propia.

cuando estas son manuales, en las operaciones automáticas estos tiempos se consideran despreciables.

Las materias primas requeridas en el proceso

de dosificación se encuentran siempre disponibles en las bodegas o los silos.

Se debe satisfacer plenamente la demanda.

- **Notación**

Conjuntos

MP: Conjunto de materias primas $MP = \{1, \dots, M\}$ contiene los índices i, k .

EL: Conjunto de elevadores $EL = \{1, \dots, J\}$ contiene los índices j .

TR: Conjunto de transportadores $TR = \{1, \dots, TR\}$ contiene los índices tr .

TI: Conjunto de períodos de tiempo $TI = \{1, \dots, T\}$ contiene los índices t .

Conjuntos Inducidos

MPEL[j]: Conjunto de materias primas que pueden ser transportadas por el elevador j .

MPTR [tr]: Conjunto de materias primas que pueden ser manejadas por el transportador tr .

Parámetros

$VLL_{j,i}$ = Velocidad llenado de la materia prima i en el elevador j (Kg / min)

$\forall (j \in EL), \forall (i \in MPEL[j])$

$REQ_{i,t}$ = Requerimiento de la materia prima i en el tiempo t (Kg)

CAP_i = Capacidad de llenado de la materia prima i (Kg) $\forall (i \in MP)$

HVT = Duración de la ventana de tiempo (min)

$TSU_{j,i,k}$ = Tiempo de alistamiento al pasar de la materia prima i a la k en el elevador j (min)

$\forall (j \in EL) \forall ((i, k) \in MPEL[j])$

CTS = Costos fijos de alistamiento (\$ / min)

CTI_i = Costos de mantener la materias prima i en tolvas (\$ / kg) $\forall (i \in MP)$

Variables

$I_{i,t}$ = Inventario de la materia prima i en el tiempo t (Kg) $\forall (i \in MP), \forall (t \in TI)$

N_i = Inventario inicial de la materia prima i (Kg) $\forall (i \in MP)$

$X_{j,i,t} = \begin{cases} 1. \text{ Si la materia prima } i \text{ es transportada por el elevador } j \text{ en el tiempo } t \\ 0. \text{ De lo contrario } \forall (j \in EL), \forall (i \in MPEL[j]), \forall (t \in TI) \end{cases}$

$Z_{j,i,k,t} = \begin{cases} 1. \text{ Si en el período } t \text{ es transportada la materia prima } i \text{ y en el período } t-1 \text{ la materia} \\ \text{ prima } k \text{ en el elevador } j \\ 0. \text{ De lo contrario } \forall (j \in EL), \forall (i, k \in MPEL[j]), \forall (t \in TI) \end{cases}$

• **Formulación matemática**

Funciones objetivo

Fase 1. Minimización del inventario inicial

$$\text{Min } y = \sum_{i \in \text{MP}} N_i \text{ (Kg)} \tag{1}$$

Fase 2. Minimización de los costos de alistamiento y mantenimiento de inventario

$$\text{Min } y = \sum_{j \in \text{EL}} \sum_{i \in \text{MPEL}[j]} \sum_{k \in \text{MPEL}[j]} \sum_{t \in \text{TI}} \text{TSU}_{j,i,k} * Z_{j,i,k,t} * \text{CTS} + \sum_{i \in \text{MP}} \sum_{t \in \text{TI}} I_{i,t} * \text{CTI}_i + \sum_{i \in \text{MP}} N_i * \text{CTI}_i \quad (\$) \tag{2}$$

Restricciones

De demanda

$$I_{i,t-1} + (\text{HVT} * X_{j,i,t} - \sum_{k \in \text{MPEL}[j]} \text{TSU}_{j,i,k} * Z_{j,i,k,t}) \text{VLL}_{j,i} = \text{REQ}_{i,t} + I_{i,t} \tag{3}$$

$\forall (j \in \text{EL}), \forall (i \in \text{MPEL}[j]), \forall (t \in \text{TI})(t \neq 1)$

$$N_i + \left(\text{HVT} * X_{j,i,t} - \sum_{k \in \text{MPEL}[j]} \text{TSU}_{j,i,k} * Z_{j,i,k,t} \right) \text{VLL}_{j,i} = \text{REQ}_{i,t} + I_{i,t}$$

$\forall (j \in \text{EL}), \forall (i \in \text{MPEL}[j]), \forall (t \in \text{TI})(t = 1)$ (4)

$$I_{i,t} \geq \text{REQ}_{i,t+1} \quad \forall (i \in \text{MP}), \forall (t \in \text{TI})(t \leq T) \tag{5}$$

$$N_i \geq \text{REQ}_{i,t} \quad \forall (i \in \text{MP}), \forall (t \in \text{TI})(t = 1) \tag{6}$$

De capacidad

$$I_{i,t} \leq \text{CAP}_i \quad \forall (i \in \text{MP}), \forall (t \in \text{TI}) \tag{7}$$

$$N_i \leq \text{CAP}_i \quad \forall (i \in \text{MP}) \tag{8}$$

De asignación

$$\sum_{i \in \text{MPEL}[j]} X_{j,i,t} \leq 1 \quad \forall (j \in \text{EL}), \forall (t \in \text{TI}) \tag{9}$$

$$\sum_{j \in \text{EL}} \sum_{i \in \text{MPEL}[j] \cap \text{MPTR}[tr]} X_{j,i,t} \leq 1 \quad \forall (t \in \text{TI}), \forall (tr \in \text{TR}) \tag{10}$$

Funcionales para la relación entre las variables binarias

$$\sum_{k \in \text{MPEL}[j]} Z_{j,i,k,t} \leq 1 \quad \forall (j \in \text{EL}), \forall (i \in \text{MPEL}[j]), \forall (t \in \text{TI}) \tag{11}$$

$$X_{j,k,t} + X_{j,i,t-1} \leq 1 + Z_{j,i,k,t} \quad \forall (j \in \text{EL}), \forall ((i,k) \in \text{MPEL}[j]), \forall (t \in \text{TI})(t > 1) \tag{12}$$

Obvias

$$X_{j,i,t} \in \{0,1\} \quad \forall (j \in \text{EL}), \forall (i \in \text{MPEL}[j]), \forall (t \in \text{TI}) \tag{13}$$

$$Z_{j,i,k,t} \in \{0,1\} \quad \forall (j \in \text{EL}), \forall ((i,k) \in \text{MPEL}[j]), \forall (t \in \text{TI}) \tag{14}$$

$$I_{i,t} \geq 0 \quad \forall (i \in \text{MP}), \forall (t \in \text{TI}) \tag{15}$$

$$N_i \geq 0 \quad \forall (i \in \text{MP}) \tag{16}$$

- **Formulación verbal del modelo**

En la primera fase la función objetivo Ec. (1), busca minimizar el inventario inicial de las materias primas al inicio de la producción. Por su parte, la función objetivo de la fase 2 Ec. (2) busca minimizar los costos de alistamiento y mantenimiento de inventario, ya que estos son los más significativos en el sistema de fabricación objeto de estudio.

En la fase 1 se utilizan todas las restricciones expuestas anteriormente. En donde, las Ecs. (3) y (4) buscan satisfacer los requerimientos de demanda, estableciendo que el inventario inicial más la cantidad de materia prima llenada en el período debe ser igual a los requerimientos de demanda más el inventario final. Con las ecuaciones (5) y (6) se asegura que el inventario que se mantiene en tolvas de una materia prima en un determinado momento sea mayor o igual a los requerimientos de la misma en el período siguiente; esto debido a que si se llevan a cabo las operaciones de llenado de material en el mismo momento en que este es requerido, la velocidad del proceso de dosificación disminuye. Las ecuaciones (7) y (8) aseguran que el inventario en tolvas cumpla con las capacidades disponibles de almacenamiento de cada materia prima. Con las ecuaciones (9) y (10) se garantiza que los elevadores y transportadores solo pueden manejar un material a la vez. Las ecuaciones (11) y (12) permiten la activación de los tiempos de alistamiento. Por último, las ecuaciones (13), (14), (15) y (16) son las restricciones obvias.

En la segunda fase se utilizan las mismas restricciones, exceptuando las representadas por las ecuaciones (6) y (8) pues el inventario mínimo establecido ya cumple con estas restricciones.

3 RESULTADOS Y DISCUSIONES

La propuesta desarrollada fue validada mediante un caso de estudio tomado de una empresa productora de alimentos concentrados de la región del Valle del Cauca. En esta, el número de equipos utilizados para el transporte de la materia prima son dos elevadores: el elevador 1 maneja las ma-

terias primas que se encuentran almacenadas en bodegas; en este las operaciones de llenado se realizan manuales y, por ende, se generan tiempos de alistamiento debido a las operaciones de limpieza y al traslado de herramienta y personal dentro de las bodegas. Por su parte, el elevador 2 maneja las materias primas que están almacenadas en silos; en este las operaciones de llenado son automáticas y los tiempos de alistamiento se consideran despreciables. Para la naturaleza del problema se realizó la planeación de un turno de producción considerando períodos de 12 minutos.

El modelo fue implementado mediante el lenguaje de programación AMPL y se utilizó como herramienta computacional para la solución Cplex 12.1®. A continuación se presentan los resultados obtenidos.

- **Explosión de materiales**

Dado el MPS del horizonte de planeación y las listas de materiales de cada producto, se obtuvieron los requerimientos de las materias primas necesarias en el proceso de dosificación durante los diferentes períodos de tiempo. La tabla 1 presenta los resultados obtenidos.

Como se puede observar, en algunos períodos de tiempo los requerimientos totales de las materias primas son altos y por lo general no son constantes, lo cual evidencia la importancia de la fase 1, pues se hace necesario contar con un inventario inicial en tolvas para satisfacer los picos en la demanda de materiales, dadas las condiciones de capacidad del sistema.

- **Resultados fase I**

El inventario inicial obtenido busca satisfacer la totalidad de los requerimientos de aquellas materias primas que se demandan en menor proporción durante el horizonte de planeación. Esto con el fin de minimizar los tiempos de alistamiento y de enfocar las operaciones de llenado en los materiales que se requieren con mayor proporción. Garantizar

Tabla 1. Requerimientos de Materiales

Requerimientos (kilogramos)																					
MP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Total
1	563	1126	1126	1126	1126	563	0	563	1126	1126	1689	1126	0	0	0	0	0	0	0	0	11.259
2	71	143	143	143	143	71	0	71	143	143	214	143	0	0	0	0	0	0	0	0	1.427
3	288	576	576	576	576	979	691	288	576	576	864	576	0	0	0	0	0	0	691	345	8.178
4	606	0	0	0	0	0	303	303	0	0	0	0	0	134	267	267	267	606	0	0	2.753
5	140	0	0	0	0	0	70	70	0	0	0	0	0	75	150	150	150	140	0	0	944
6	102	0	0	0	0	0	51	51	0	0	0	0	0	51	102	102	102	102	0	0	661
7	1881	0	0	0	0	0	941	941	0	0	0	0	298	1421	2246	2246	2246	1881	0	0	14.100
8	164	329	329	329	329	404	240	164	329	329	493	329	0	0	0	0	0	0	240	120	4.126
9	94	189	189	189	189	848	754	94	189	189	283	189	0	0	0	0	0	0	754	377	4.526
10	192	383	383	383	383	1023	831	192	383	383	575	383	1600	1600	0	0	0	0	831	416	9.940
11	648	0	0	0	0	0	324	324	0	0	0	0	600	929	658	658	658	648	0	0	5.447
12	492	0	0	0	0	0	246	246	0	0	0	0	0	344	688	688	688	492	0	0	3.883
Total	5.241	2.745	2.745	2.745	2.745	3.889	4.451	3.307	2.745	2.745	4.117	2.745	2.498	4.553	4.110	4.110	4.110	3.869	2.517	1.258	

Fuente: elaboración propia.

el inventario inicial mínimo es importante porque permite que con las operaciones de llenado se cumplan los requerimientos de materiales y no se presenten paros en las operaciones. Además, tener información del inventario inicial mínimo permite determinar desde cuánto tiempo antes del inicio de la producción se deben comenzar a realizar las operaciones de llenado de tolvas.

Esta situación se presenta siempre y cuando las dosificadoras se encuentren vacías, pues una vez inicien las operaciones de llenado se debe garantizar que desde el período anterior se cumplan los requerimientos del período siguiente. Con los datos del caso de estudio, las operaciones de llenado deben comenzar aproximadamente 43 minutos antes de la producción para garantizar que las materias primas se encuentren oportunamente en el proceso de dosificación.

• **Resultados fase 2**

En esta fase se toman como valores de entrada los datos del inventario inicial y el cálculo de los requerimientos de materiales obtenidos anteriormente, y se derivan los resultados referentes a la programación de llenado de tolvas para cada elevador. En la figura 2 se presenta la programación del elevador 1.

Como se observa, al inicio del horizonte de planeación los tamaños de los lotes son más grandes que al final. Esto se debe a que inicialmente las tolvas se encuentran vacías y el programa busca satisfacer gran parte de los requerimientos de aquellos materiales que se necesitan en mayor proporción como lo son el número 2, 9 y 10, para posteriormente dedicarse a los materiales que se requieren en menor proporción como lo son el 5 y el 12. Además, esta situación también se ocasio-

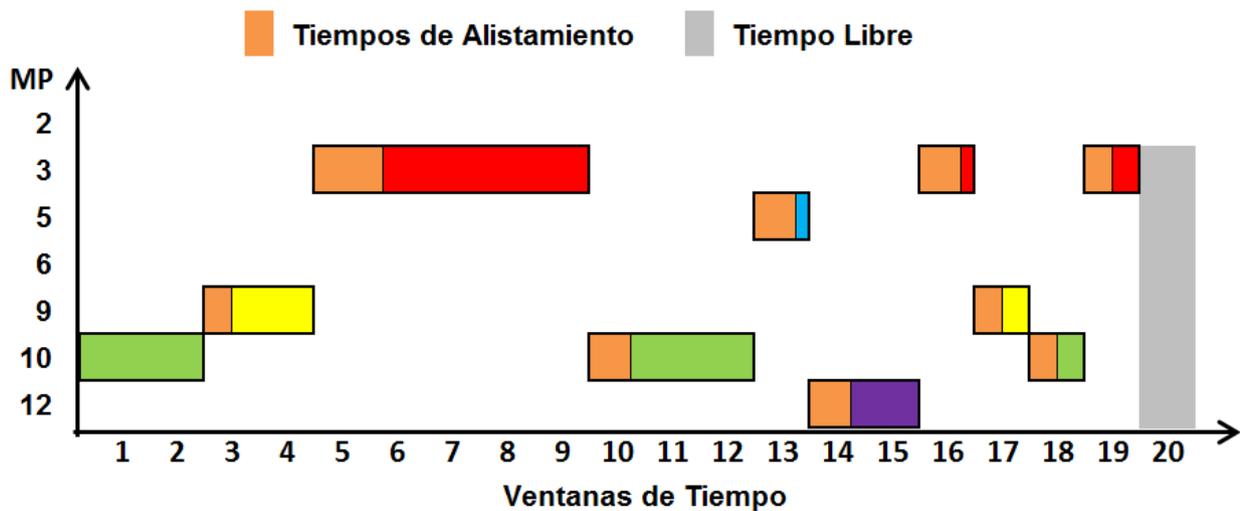


Figura 2. Programación de operaciones para el elevador 1

Fuente: elaboración propia.

na porque el inventario inicial busca satisfacer la totalidad de los requerimientos menores, y de esta manera el programa al comienzo de la producción se enfoca en las necesidades mayores.

Algo importante que se analizó en la programación del elevador 1 es que el programa propone tamaños de lotes menores a los manejados actualmente en las industrias de alimentos concentrados, lo cual permite que haya mayor flexibilidad en las operaciones de llenado y evita los altos niveles de inventarios innecesarios; situación que es contraria a la práctica, en donde se busca minimizar los tiempos de alistamiento a partir de tamaños de lotes grandes, lo cual genera altos inventarios innecesarios de algunas materias primas e insuficiencia de otras dentro del proceso de dosificación.

Los altos inventarios de materia prima en el proceso de dosificación son críticos dentro de las industrias de alimentos concentrados, porque las características perecederas y de humedad de los materiales no permiten que estos sean almacenados en tolvas por largos períodos de tiempo. Además, las fórmulas nutricionales son, por lo general variables; de esta manera un exceso de inventario puede generar actividades para desocupar tolvas con materias primas que no serán requeridas en

los períodos de tiempo posteriores, lo cual implica un sobre costo, ya que además del tiempo y la mano de obra invertida en enviar los materiales a las tolvas será necesario un tiempo adicional para desocuparlas. De esta manera, es preferible tener las materias primas almacenadas en bodegas o en silos que en las tolvas de dosificación.

Además de lo anterior, con los resultados obtenidos se observó que el cuello de botella del sistema es el elevador 1, ya que el elevador 2 no tiene ningún inconveniente para cumplir los requerimientos de materiales, pues las operaciones de llenado de este recurso son más rápidas por ser automáticas y presentan tiempos de alistamiento despreciables. Adicionalmente, el elevador 2 maneja cantidades menores de materias primas que el elevador 1. En este sentido, el presente análisis se enfoca en los resultados obtenidos del recurso restringido.

Por otro lado, la función objetivo de la fase 2 indica que los costos totales se distribuyen de la forma como se presenta en la figura 3, donde el 96% de los costos totales hacen referencia a los costos de mantenimiento de inventario, mientras que el 4% restante corresponde a los costos de alistamiento.

La gran participación de los costos de mantenimiento de inventario en los costos totales se debe a

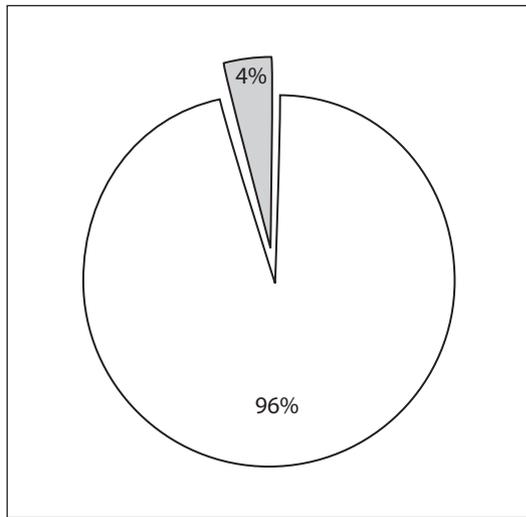


Figura 3. Distribución de los costos totales en la Fase 2

Fuente: elaboración propia.

que estos son bastante altos frente a los costos de alistamiento, además el gran volumen de materiales que manejan este tipo de industrias, y el hecho de que se garantice desde un período anterior los requerimientos del período siguiente contribuye a que se genere esta situación.

Inicialmente se presentaba un registro de pérdida correspondiente al 19% de las horas del tiempo productivo, es decir, 1,52 horas por turno, a causa de paros asociados a la carencia de materia prima disponible en las tolvas; al implementar el modelo propuesto, que incluye en sus restricciones el cumplimiento de los requerimientos, se elimina la ocurrencia de paros por esta causa y se disminuyen los tiempos de alistamiento, condiciones que contribuyen a un ahorro aproximado de 35 millones de pesos mensuales para la empresa donde se realizó el caso de estudio.

4 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Se realizó un análisis de sensibilidad variando parámetros tales como los requerimientos de los materiales, los costos del sistema, los tiempos de alistamiento y las velocidades de llenado de los elevadores. Como resultado, se observó que el modelo se comporta bien frente a los diferentes

cambios en el sistema, además entre los aspectos importantes encontrados en el análisis se obtuvo que el inventario inicial tiene una gran sensibilidad frente a variaciones en los parámetros mencionados. De esta manera es de vital importancia que este sea considerado antes de iniciar la producción, tal como lo hace la propuesta desarrollada en el presente artículo.

Debido a que en los resultados presentados en la sección anterior se evidenció que el elevador 1 es el que presenta mayores restricciones dentro del sistema, en el presente estudio solo se presentarán en detalle los resultados obtenidos al modificar la velocidad de llenado de este elevador, con el fin de determinar el impacto que tiene desarrollar actividades en pro de aumentar su capacidad. Las variaciones consisten en multiplicar los valores establecidos en el caso de estudio por un 50%, 100%, 150%, 175% y 200%.

- **Resultado del análisis de sensibilidad**

Como se observa en la figura 4, el incremento de las velocidades de llenado genera un impacto importante dentro del inventario inicial mínimo que debe haber en tolvas de las materias primas manejadas por el elevador 1, el cual disminuye considerablemente, pues a medida que este elevador tiene más capacidad es posible cumplir los requerimientos de materiales sin tener altas cantidades de inventario inicial.

Por otro lado, el incremento en la velocidad de llenado del elevador 1 permite enviar mayor cantidad de materias primas a las tolvas en menos tiempo, lo cual hace posible que los requerimientos de materiales se cumplan más rápido y se presenten mayores cambios en las materias primas manejadas, y esto aumenta los tiempos de alistamiento del sistema. La figura 5 ilustra esta situación.

Con los resultados obtenidos, se puede analizar que particularmente para el caso de estudio evaluado, realizar actividades en pro de aumentar la velocidad de llenado del elevador 1 genera grandes beneficios en el sistema. Estas actividades pueden

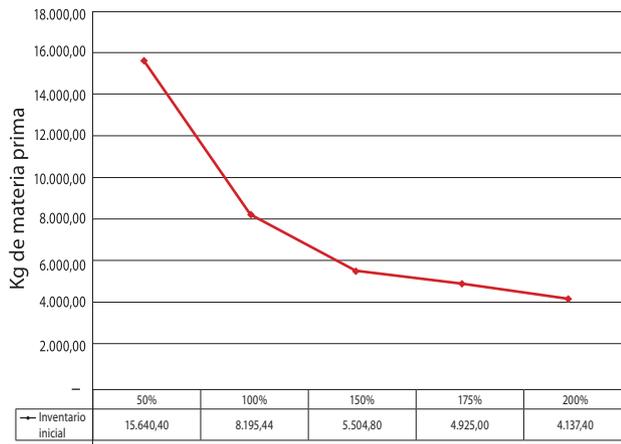


Figura 4. Comportamiento del Inventario inicial al aumentar las velocidades de llenado

Fuente: elaboración propia.

estar orientadas a optimizar la ubicación de las materias primas en las bodegas de manera que se minimicen el traslado de personal y herramientas. Por ejemplo, es posible proponer acercar los materiales al elevador o ubicar las materias primas de una misma familia de productos dentro de una bodega para reducir el desplazamiento de la mano de obra, pues por lo general el plan de producción se hace por familias de productos.

Por otra parte, se pueden desarrollar mejoras en las técnicas de llenado manual utilizadas en la actualidad por las industrias de alimentos concentrados para animales, bien sea implementando un mejor método o utilizando equipos que agilicen este tipo de operaciones.

5 CONCLUSIONES

La propuesta desarrollada en el presente artículo permite abordar el problema de programación de operaciones para el llenado de tolvas dosificadoras dentro de las empresas fabricantes de alimentos concentrados, lo cual contribuye al mejor aprovechamiento de los recursos, al aumento de la productividad y al ahorro de dinero en este tipo de industrias.

Entre los aportes importantes que presenta la propuesta se encuentra la integración del MRP y

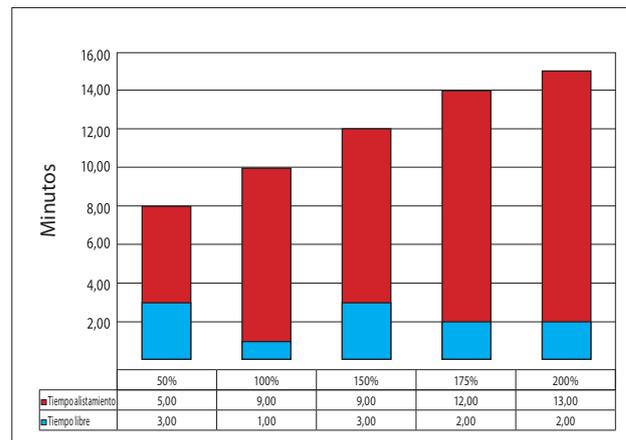


Figura 5. Comportamiento de los tiempos improductivos en el Elevador 1

Fuente: elaboración propia.

la programación de operaciones, lo cual permite la toma de decisiones efectivas en el mediano y corto plazo de las industrias de alimentos concentrados. Además, dado que estas no son las únicas industrias que mezclan materiales con tolvas dosificadoras, la presente propuesta también es aplicable a industrias que presentan este tipo de configuración, como lo son las harineras o los molinos.

En cuanto a las operaciones de llenado, el programa propone manejar tamaños de lotes menores a los manejados en la práctica por las industrias de concentrados, pues a pesar de que se incurra en tiempos de alistamiento mayores se minimizan las cantidades de inventario almacenado en tolvas y es posible cumplir con los requerimientos de materiales establecidos.

Adicionalmente, se analizó que el inventario inicial mínimo que se establece en la fase 1 tiene una gran sensibilidad frente a cambios en parámetros como las velocidades de llenado de los elevadores y los requerimientos de los materiales. De esta manera, es importante prestar bastante atención a la disponibilidad de este inventario antes de comenzar las actividades de dosificación.

Por otro lado, el hecho de que el elevador 2 permanezca la mayor parte del tiempo libre, genera propuestas como que este tiempo sea utilizado en

otras actividades que no se pueden realizar mientras el elevador se encuentra ocupado, tales como las tareas de mantenimiento.

Por último, como investigaciones futuras, la propuesta permite desarrollar heurísticas para disminuir el tiempo de solución del problema. También, otras investigaciones pueden estar orientadas a estudiar el impacto que tiene en el mantenimiento de inventario, reducir la duración de los períodos de tiempo. Además, es posible desarrollar propuestas que incluyan el programa maestro de la producción y la planeación agregada.

REFERENCIAS

- [1] R. B. Chase, et al., *Administración de la Producción y Operaciones para una Ventaja Competitiva*, 10a. Ed., México: Mc Graw Hill, 2005, 848 p.
- [2] J. A. Domínguez Machuca, et al., *Dirección de Operaciones, aspectos tácticos y operativos en la producción y servicios*. Madrid: Mc Graw Hill, 1995, 503 p.
- [3] B. Karimi, et al., "The capacitated lot sizing problem: a review of models and algorithms," *Omega*, Vol. 31, n.º 5, pp. 365-378, 2003.
- [4] M. Torné, "Programación de Operaciones para el llenado de tolvas en una industrias de alimentos concentrados," Tesis de grado presentada para optar por el título de Ingeniera Industrial, Facultad de Ingenierías, Universidad del Valle, Colombia. 2009.
- [5] E. Esposito, y R. Passaro, "Material requirement planning and the supply chain at Alenia Aircraft," *European Journal of Purchasing & Supply Management*, Vol. 3, n.º 1, pp 43-57, 1997.
- [6] V. Manthou, et al., "The implementation and use of material requirements planning system in Northern Greece: A case study," *International Journal Production Economics*, Vol. 45, n.º 1-3, pp. 187-193, 1996.
- [7] A.A. Hamid, et al., "Computerised materials requirement planning in manufacturing companies in Malaysia," *International Journal of Production Economics*, Vol. 25, n.º 1-3, pp. 73 - 79, 1991.
- [8] D. Nakagiri, y S. Kuriyama, "A study of production management system with MRP," *International Journal Production Economics*, Vol. 44, n.º 1-2, pp. 27-33, 1996.
- [9] J. C Ho y Y. L. Chang, "An integrated MRP and JIT framework". *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 41, n.º 2, pp. 173-185, 2001.
- [10] E. Toso, et al., "Lot sizing and sequencing optimisation at an animal-feed plant," *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 57, n.º 3, pp. 813-821, 2007.
- [11] P. Doganis y H. Sarimveiss, "Optimal scheduling in a yogurt production line based on mixed integer linear programming," *Journal of Food Engineering*, Vol. 80, n.º 2, pp. 445-453, 2007.
- [12] E. Gargouri, et al., "Study of scheduling problem in agro-food manufacturing systems," *Mathematics and Computers in Simulation*, Vol. 60, n.º 3-5, pp. 277-291, 2002.
- [13] R. Tadei, et al., "Aggregate planning and scheduling in the food industry: A case study", *European Journal of Operational Research*, Vol. 87, n.º 3, pp. 564-573, 1995.
- [14] E.A. Del Rosario, et al., "Conveyor scheduling system for a feeds manufacturing plant: a case study", *International Journal of Production Economics*, Vol. 25, n.º 1-3, pp. 89-94, 1991.