

CORPORACIÓN MEXICANA DE INVESTIGACIÓN EN
MATERIALES

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



PROGRAMACIÓN DINÁMICA DE MATERIALES CON DEMANDA
ESTOCÁSTICA Y RESTRICCIONES DE ESPACIO

POR

ING. PILAR ANABELL CAMARENA AGUERO

TESIS

MAESTRÍA EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA CON ESPECIALIDAD EN
INGENIERA INDUSTRIAL Y DE MANUFACTURA

SALTILLO, COAHUILA.

Marzo del 2014

Corporación Mexicana de Investigación en Materiales
Gerencia de Desarrollo Humano
División de Estudios de Posgrado

Los abajo firmantes, miembros del Comité Tutorial recomendamos que la Tesis “**PROGRAMACIÓN DINÁMICA DE MATERIALES CON DEMANDA ESTOCÁSTICA Y RESTRICCIONES DE ESPACIO**”, realizada por la alumna **PILAR ANABELL CAMARENA AGUERO** matrícula **1206IM1086** sea aceptada para su defensa como Maestra en Ciencia y Tecnología con Especialidad en **Ingeniería Industrial y de Manufactura**.

El Comité Tutorial

Dr. David Salvador González González

Director de Tesis

Ing. Arturo Vidales Hernández

Tutor en Planta

Dr. Mario Cantú Sifuentes

Asesor

Vo. Bo

Dr. Felipe Arturo Reyes Valdés

Coordinación General de Estudios de Posgrado

COMIMSA

Corporación Mexicana de Investigación en Materiales
Gerencia de Desarrollo Humano
División de Estudios de Posgrado

Los abajo firmantes, miembros del Jurado del Examen de Grado de la alumna Pilar Anabell Camarena Agüero, una vez leída y revisada la tesis titulada “**PROGRAMACIÓN DINÁMICA DE MATERIALES CON DEMANDA ESTOCÁSTICA Y RESTRICCIONES DE ESPACIO**”, aceptamos que la referida tesis revisada y corregida sea presentada por la alumna para aspirar al grado de Maestra en Ciencia y Tecnología con Especialidad en Ingeniería Industrial y de Manufactura durante el Examen de Grado correspondiente.

Y para que así conste firmamos la presente a los 21 días del mes de marzo del año 2014.

Dr. Luis Martín Torres Treviño
Presidente

Dr. Ernesto Liñán García
Secretario

Dr. David Salvador González
González
Vocal

Dedicado con amor a mi familia quienes con su paciencia y aliento me han exhortado a enfrentar nuevos retos.

“Una familia feliz no es sino un paraíso anticipado”

John Bowring

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por el don de la vida.

Agradezco a mis padres, Servando Camarena y Pilar Agüero, por su entrega incansable y amor infinito. Son el regalo más extraordinario en mi vida.

Agradezco a mis hermanos, María Luisa y Juan Servando, por esperar siempre lo mejor de mí y colmar mis días de alegría.

Agradezco a mi mejor amigo, Manuel López, por su paciencia y apoyo en este camino que emprendimos juntos.

Agradezco a mis compañeros de trabajo por facilitarme la información necesaria para aplicar este trabajo.

Agradezco a mis tutores por transmitirme sus conocimientos y experiencias.

Agradezco a todos aquellos que hicieron que mi formación académica fuera más agradable y provechosa.

AUTOBIOGRAFÍA

Pilar Anabell Camarena Agüero nació el 4 de marzo de 1987 en la ciudad de Saltillo, Coahuila, México. Sus padres son María del Pilar Agüero Tobías y Servando Camarena Rosales.

Culminó la Ingeniería Industrial en el Instituto Tecnológico de Saltillo en Febrero del 2009 obteniendo el 1° lugar académico de la generación.

Su experiencia laboral incluye a la empresa General Electric en el verano del 2008 donde obtuvo el 1° lugar en el Concurso de Manufactura Esbelta, así como las empresas Maquinados y Herramientas de Saltillo (2009) y Maquinados y Rectificaciones Industriales López (2011) donde apoyó en el diseño de la distribución de las empresas. Actualmente tiene 5 años laborando como Ingeniera de Materiales en la empresa Kimberly Clark de México, donde ha colaborado en proyectos de ahorro por desarrollo de materiales, reducción de mermas y tiempos perdidos.

En Octubre del 2009 participó como panelista en el XVIII Congreso Internacional de Ingeniería Industrial organizado por el Instituto Tecnológico de Saltillo con el tema “Manufactura Esbelta en las empresas”.

Su investigación descrita en el presente trabajo se publicó en las memorias del XVI Seminario Nacional de Investigación de Posgrado Interinstitucional en Ciencia y Tecnología en junio del 2013 y participó como ponente en la Segunda Conferencia Internacional “Industrial and Systems Engineering” en Noviembre del 2013 con el artículo “Dynamic Raw Materials Scheduling with Stochastic Demand and Space Restrictions”.

En el 2010 obtuvo el Premio al Mérito Académico otorgado por el Gobierno del Estado de Coahuila. Se encuentra certificada como auditora interna del HACCP e ISO 9001:2000 por Bureau Veritas Mexicana, SA de CV.

RESUMEN

Dentro de la cadena de suministro se presentan numerosas fuentes de incertidumbre que influyen en los pronósticos de demanda. Sin embargo, diversas estrategias de predicción utilizadas en la industria consideran demanda determinística, la cual afecta a todos los eslabones de la cadena de suministro incluyendo a la programación de materias primas y capacidades de almacenamiento. Esto a su vez repercute en desperdicios como sobre inventarios, riesgos de obsolescencia y paros por falta de materiales. Atendiendo a este problema presentado en un caso de estudio, se analizaron cuatro estrategias de pronóstico con el objetivo de definir la que se adapte mejor al comportamiento de demanda real.

Así mismo, en este trabajo se compendia algunos aspectos importantes relacionados con el control de inventarios que pretenden describir la forma en que pueden mejorarse las operaciones dentro de un almacén y de la cadena logística, con el fin de perfeccionar su administración; en este sentido se implementaron tales prácticas a un caso particular.

Por otro lado, se presenta la revisión de la literatura sobre los modelos de tamaño de lote cuyo objetivo es minimizar el costo total esperado que incluye costos de manufactura, costos de mantener en inventario y preparación de máquinas. Para el problema planteado en este trabajo, se propone y se valida un modelo de tamaño de lote con restricciones de capacidad de almacenamiento, de servicio al cliente y mínimos de compra del proveedor cuya entrada principal es la demanda pronosticada, con el objetivo de minimizar el costo total esperado.

CONTENIDO

| | |
|---|----|
| 1. INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA | |
| 2.1 Descripción del problema..... | 4 |
| 2.2 Preguntas de investigación..... | 10 |
| 2.3 Objetivos general y específicos..... | 10 |
| 2.4 Hipótesis..... | 10 |
| 2.5 Justificación del proyecto..... | 11 |
| 3. MARCO TEÓRICO | |
| 3.1 Definición de inventario..... | 13 |
| 3.2 Suposiciones en los modelos de inventarios..... | 14 |
| 3.3 Procesos estocásticos..... | 18 |
| 3.4 Importancia de un inventario preciso..... | 20 |
| 3.5 Efecto látigo..... | 20 |
| 3.6 Sistema de Administración de Almacenes..... | 21 |
| 3.7 Administración de inventarios..... | 21 |
| 3.8 Técnicas de planificación de recursos de fabricación..... | 22 |
| 3.9 Modelo de tamaño de lote..... | 23 |
| 3.10 Sistema de tipo “jalar” | 26 |

| | |
|--|----|
| 3.11 Estrategias de pronóstico..... | 26 |
| 3.11.1 Modelo de Bass..... | 27 |
| 3.11.2 Suavización exponencial..... | 27 |
| 3.11.3 Método Holt Winters..... | 29 |
| 3.11.4 Modelo de Promedios Móviles..... | 29 |
| 3.12 Evaluación del Modelo de Pronóstico..... | 30 |
| 4. ESTADO DEL ARTE..... | 31 |
| 5. METODOLOGÍA PROPUESTA..... | 51 |
| 6. IMPLEMENTACIÓN Y RESULTADOS | |
| 6.1 Implementación de mejores prácticas para reducir el impacto de las incertidumbres..... | 53 |
| 6.2 Análisis de demanda de pañales y pronóstico de ventas de acuerdo a los datos históricos..... | 53 |
| 6.3 Modelado de la función objetivo y restricciones. | 60 |
| 6.4 Optimizar el costo total esperado del tamaño de lote de corrugados, evaluación de resultados y validación del modelo propuesto.. | 62 |
| 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... | 65 |
| 8. BIBLIOGRAFÍA..... | 67 |
| ANEXO 1..... | 69 |
| ANEXO 2..... | 71 |
| ANEXO 3..... | 73 |
| ANEXO 4..... | 75 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Etapas por máquina..... | 2 |
| Tabla 2. Envases y unidad de medida por material..... | 2 |
| Tabla 3. Incremento en costos por inventarios..... | 14 |
| Tabla 4. Prácticas que contribuyen a minimizar el impacto de las incertidumbres..... | 33 |
| Tabla 5. Resultados de la simulación..... | 47 |
| Tabla 6. Coordinación de iniciativas en la cadena de suministro..... | 50 |
| Tabla 7. Evaluación de los modelos de pronóstico..... | 54 |
| Tabla 8. Pronóstico de ventas del mes de agosto..... | 55 |
| Tabla 9. Pronóstico de ventas del mes de septiembre..... | 56 |
| Tabla 10. Pronóstico de ventas del mes de octubre..... | 57 |
| Tabla 11. Pronóstico de ventas del mes de noviembre..... | 58 |
| Tabla 12. Resumen de datos de entrada al modelo y el tamaño de lote resultante. | 63 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Ejemplos de materias primas para la fabricación de pañales..... | 3 |
| Figura 2. Proceso de programación de materiales..... | 9 |
| Figura 3. Diagrama de flujo de la metodología propuesta | 51 |
| Figura 4. Entradas y salidas del sistema para la programación de materiales..... | 52 |
| Figura 5. Descomposición de demanda..... | 54 |
| Figura 6. Gráfica del pronóstico de ventas del producto E4O A..... | 59 |
| Figura 7. Gráfica del pronóstico de ventas del producto E4A A..... | 59 |

1. INTRODUCCIÓN

Kimberly-Clark de México (KCM) es la compañía líder en productos de consumo para el cuidado e higiene personal y familiar, dentro y fuera del hogar. Las marcas que se fabrican son Huggies®, KleenBebé®, Pull-Ups®, Kleenex®, Kotex®, Depend®, Kleenex® Cottonelle®, Pétalo®, Suavel®, Vogue®, Sanitas®, Marli® y Kimlark®, entre muchas otras de productos higiénicos, productos infantiles, protección femenina, protección de adulto y productos del cuidado de la salud. Cabe mencionar que el ramo pañalero ocupa el 30% del negocio total de la compañía y actualmente Kimberly Clark de México ocupa el 65% del mercado total nacional (KCM, 2013).

Kimberly-Clark de México es una empresa mexicana que opera de manera ininterrumpida desde hace más de 50 años. Con ocho plantas productivas y 4 bodegas de distribución, se emplean a más de 7 mil colaboradores directos y más de 10 mil indirectos. Además cuenta con su propia flotilla de transportes para producto terminado y materias primas desde 1980, año en que Servicios de Operación y Distribución S.A de C.V. se incorpora a Kimberly Clark de México.

En la Planta de Ramos Arizpe, en la operación de Productos Infantiles, se fabrican los pañales Huggies UltraConfort en todas sus presentaciones, Huggies Supreme Petits en todas sus presentaciones y Suavelastic Max RN, para mercado nacional. Los pañales se fabrican en 7 etapas diferentes que van de la 0 a la 6 (de la 0 a la 2 se les conocen con pañales Petits) y se empaacan en diferentes conteos. Esta planta cuenta con 4 máquinas donde se fabrican etapas específicas en todos sus conteos, la Tabla 1 muestra el desglose de etapas por máquina.

Tabla 1. Etapas por máquina.

| <i>Máquina</i> | <i>Etapas</i> |
|----------------|---------------|
| RA-1 | 3 y 5 |
| RA-2 | 4 y 5 |
| RA-3 | 0, 1 y 2 |
| RA-4 | 5 y 6 |

En lo que concierne a sus materias primas, se cuenta con aproximadamente 200 claves diferentes que corresponden a materiales no perecederos pero con tiempos preferibles de consumo menores a un año. Los envases con sus respectivas unidades de medida son los mostrados en la Tabla 1 y algunos ejemplos se ilustran en la Figura 1.

Tabla 1. Envases y unidad de medida por material.

| <i>Material</i> | <i>Envase</i> | <i>Unidad de medida</i> |
|--|---------------|---------------------------|
| LINER, BSTL, CORE WRAP, NBL, HOOK BASE, HOOK, VFL, TABBI, SMMS, PUB. | Rollo | Miles de metros cuadrados |
| CELULOSA, FILM | Rollo | Kilogramos |
| SAM | Saco | Kilogramos |
| BOLSA | Rack | Piezas |
| CORRUGADO | Atado | Piezas |
| PERFUME, AVENA | Porrón | Litros |
| ADHESIVO | Cuñete | Kilogramos |



Figura 1. Ejemplos de materias primas para la fabricación de pañales.

Hoy en día, la Planta Ramos Arizpe en la Operación de Productos Infantiles no cuenta con un sistema de administración de almacenes que permita tener información veraz en tiempo real generando múltiples problemas. Por esta razón, la empresa esta considerando la instalación de un sistema de administración de almacenes con el objetivo de tener información precisa sobre los niveles reales de inventario. Sin embargo, el sistema de información no asegura que la programación de los materiales sea adecuada.

Hasta ahora, la programación de los materiales se efectúa considerando una demanda determinística mensual y la Planta Ramos Arizpe no cuenta con la flexibilidad para enfrentar los cambios abruptos y repentinos en las secuencias de producción que obedecen a una demanda estocástica. Esto genera sobreinventarios que rebasan la capacidad del almacén de materia prima con todo lo que esto conlleva: incremento en riesgos de daños a materiales y obsolescencia.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1 Descripción del problema

Del 100% del costo de un pañal, en KCM Planta Ramos Arizpe, el 85% lo representan sus materias primas. Con el sistema de administración de inventarios que la empresa KCM planea implementar, la información sobre los niveles de inventario de materias primas se conocerá en tiempo real. Sin embargo, dicha implementación no asegura que la programación de materias primas sea adecuada.

Actualmente, la programación de materias primas es realizada de acuerdo a un pronóstico de ventas mensual, el cual es realizado empíricamente. Normalmente este pronóstico de ventas es cambiante y su valor está en un 60% de las ventas reales. Aunado a esto, el producto cambia su diseño periódicamente, por lo que el producto es modificado frecuentemente, al menos una vez por año, incrementando el riesgo de materiales obsoletos. Tal dinámica e inexactitud del pronóstico, no son considerados en la programación de las materias primas, generando con ello:

- Sobreinventarios.
- Incremento en costos por obsolescencia.
- Incremento en costos por material faltante.
- Incremento en costos de almacenaje.
- Efecto látigo con los proveedores, ya que el número de urgencias es alto.

Todos los puntos mencionados generan costos para la empresa, los cuales no le agregan valor al producto terminado, por lo que reducirlos representa un área de oportunidad importante, lo cual impacta directamente en el costo de fabricación del producto.

Por mencionar algunos ejemplos, los costos por materiales obsoletos durante el 2012 se incrementaron a \$223,811.4, donde la obsolescencia de corrugados representaron el 20% del total. Este material tiene un área asignada en almacén que representa el 30% del total del espacio con 15 días de inventario de corrugado. Sin embargo, este espacio es por lo general sobrepasado ocupando otras áreas, albergando hasta un mes de inventario. Adicionalmente, por ser material de acabado, es uno de los materiales que enfrenta mayor riesgo de obsolescencia por los cambios continuos al producto.

Considerando lo anterior, es necesario utilizar un modelo para la programación dinámica de los materiales que considere las características de la demanda, cambios constantes en el diseño del producto terminado, las restricciones del espacio disponible en el almacén y las características de la materia prima mencionadas.

Enseguida se detalla el proceso de programación de materiales que se sigue actualmente.

Mercadotecnia y ventas

- Cada trimestre y semestre se hace una proyección de ventas de los siguientes 24 meses contemplando los objetivos de crecimiento. Se revisan diariamente las ventas contra avance¹.
- Los primeros cuatro días de cada mes, se realiza un pronóstico mensual basado en un promedio de ventas anual, semestral y tetramestral de los siguientes puntos tomando como referencia de partida hacia atrás el mes en curso:
 - Volumen total por marcas.
 - Por canal (autoservicio, gobierno, mayoreo, farmacias y clubes).
 - Para cada clave de producto terminado considerando el promedio obtenido y el crecimiento y la utilidad de operación previstos.

¹ Nota: los pronósticos se evalúan en la unidad estándar de venta que es caja estándar equivalente a 150 pañales.

Planeación corporativa

- Recibe el estimado de ventas mensual elaborado por mercadotecnia por cada clave de producto terminado y compara con los inventarios en bodega. La diferencia conforma el programa mensual de producción que es enviado a Gerencia de Operaciones, Superintendentes y Planeación de materiales en Planta Ramos Arizpe.

Gerencia de operaciones

- Realiza la secuencia de producción mensual en base al programa enviado por Planeación Corporativa. Da a conocer esta secuencia mensual a Planeación Corporativa, Superintendentes y Planeación de Materiales en Planta.

Planeación corporativa

- Enseguida explosiona la secuencia mensual a los requerimientos de corrugado, considerando los factores de consumo, el inventario en planta y un inventario de seguridad máximo de dos días para evitar en lo posible cambios de máquina en tercer turno o fines de semana.
- Comunica los requerimientos de corrugado con su secuencia mensual a Compras Corporativa y a Planta Ramos Arizpe asegurando que arriben los corrugados 2 días antes del día programado de corrida. Compras a su vez pacta con el proveedor la secuencia quincenal de entregas a los dos proveedores de corrugado: International Paper y Smurfit. Máximo se reciben 9,000 piezas de corrugado por clave en un día, equivalente en promedio a medio día de producción, y máximo se reciben 27,000 piezas de corrugado totales en un día (1.5 días de inventario).
- Cada semana planeación revisa el programa y lo compara contra las ventas e inventarios, a su vez lo comunica a Planta Ramos Arizpe y Compras Corporativas para realizar las modificaciones necesarias para satisfacer las ventas comprometidas. Regularmente se hacen una o dos modificaciones máximas al programa en un mes.

Gerencia de operaciones

- En base a las ventas y modificaciones del programa se realizan los cambios pertinentes en la secuencia de producción, de manera que se cumpla el programa mensual modificado con el mínimo de cambios de máquina.
- Comunica a Planeación en Planta para que a su vez lo comunique a Planeación Corporativa.

Planeación corporativa

- Solicita a proveedor incrementos o cancelaciones en programa. Se considera que el proveedor tiene un tiempo de respuesta a urgencias de 4 a 7 días. Uno de los dos proveedores de corrugado históricamente cumple con el 95% de los requerimientos en el día y hora acordados, máximo presenta un atraso de 1 día en el 5% restante. Por su parte, el proveedor alterno de corrugado incumple por 1 ó 2 días las fechas compromiso de entrega en un 25% promedio del total de entregas.
- Comunica a Planta Ramos Arizpe la mejor fecha de entrega del proveedor para programar los cambios en máquina. Gerencia de Operaciones tiene la facultad de mover la secuencia de producción según convenga a la operación.

Planeación de Planta Ramos Arizpe

- Brinda seguimiento a las entregas y comunica a Planeación Corporativa en caso de presentarse algún atraso de proveedor. Cuando esto ocurre, Planta Ramos Arizpe realiza cambios de presentación no planeados. Cuando aún hay programa vigente se afecta a producción, sin embargo, hay casos de atrasos que coinciden con recortes de programa de producción por lo que ya no repercute.

Almacén de materia prima

- Al arribar el material, se ingresa al sistema para que cuentas por pagar comience con el trámite de pago.

Calidad de materiales

- En caso de presentarse defecto en el corrugado, realiza el trámite de devolución y comunica a Planeación en Planta para que a su vez comunique a Planeación Corporativa de materiales de acabado la solicitud de reposición a proveedor cuando éste sea necesario.

En la Figura 2 se presenta una conceptualización en un mapeo de actividades por departamento y sus interrelaciones del proceso de programación de materiales que se tiene actualmente en KCM.

El proceso actual de programación de materiales de la empresa Kimberly Clark que se resume en la Figura 2, se efectúa mediante un estimado de ventas teórico sin base estadística y sin considerar las limitantes de espacio en almacén. Es por esta razón, que se requiere una metodología para definir la programación de materiales que tome en cuenta la característica de demanda estocástica y las restricciones de espacio disponible en el almacén, con el objetivo de que dicha programación permita satisfacer los requerimientos del cliente de forma eficiente.

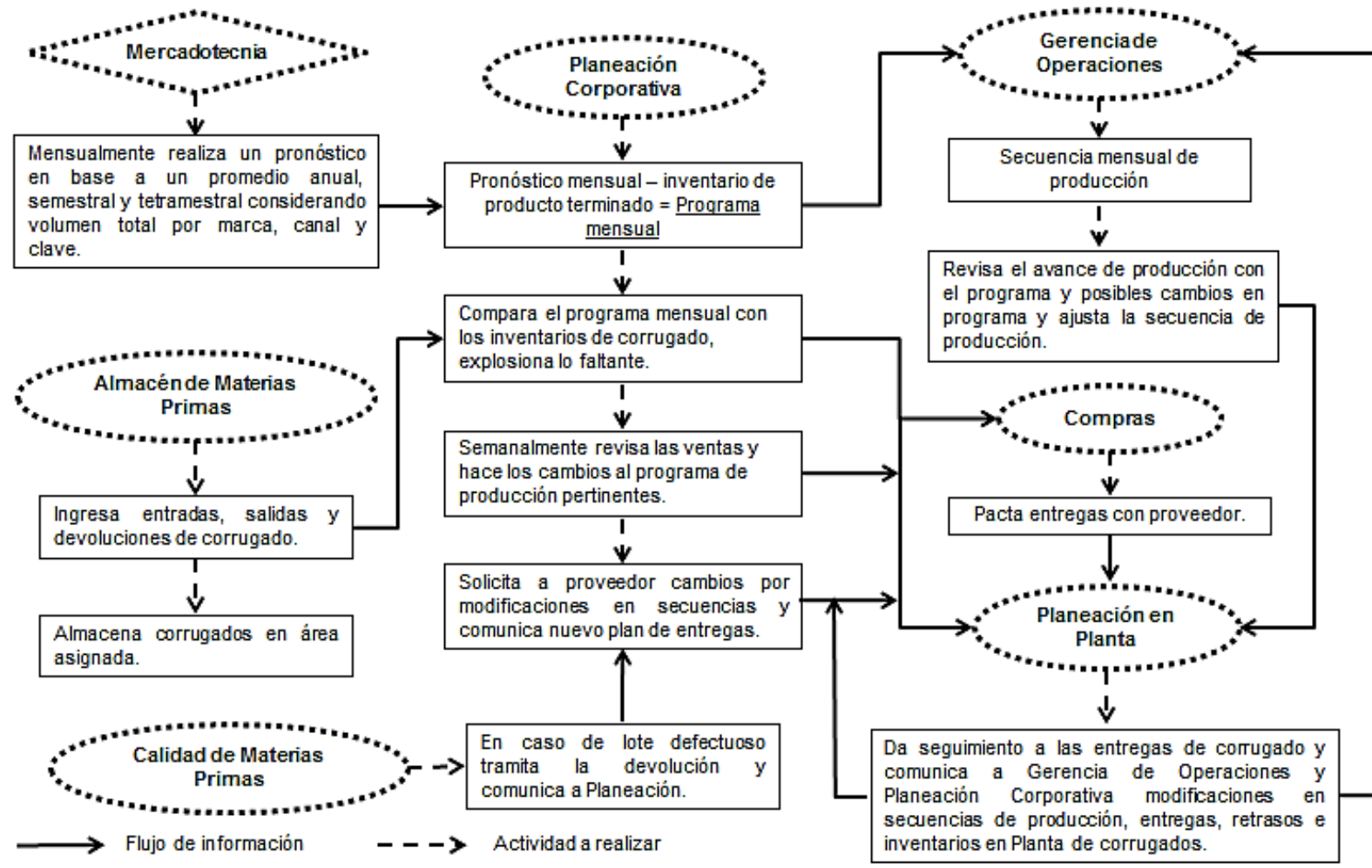


Figura 2. Proceso de programación de materiales.

2.2 Preguntas de investigación

1. ¿Existen modelos dinámicos para la programación de materiales con demanda estocástica?
2. En caso de existir, ¿cuáles son sus características?
3. ¿Cómo impacta la programación de materiales en la cadena de suministro?
4. ¿Qué técnicas de administración de inventarios es posible aplicar para reducir sobreinventarios?
5. ¿Puede desarrollarse un modelo que minimice el inventario de materias primas, así como los costos por material faltante considerando una demanda estocástica y restricciones de espacio?

2.3 Objetivos general y específicos

Objetivo general:

Desarrollar un modelo para la programación dinámica de materiales con demanda estocástica, restricciones de espacio y mínimos de compra, que minimice el inventario de corrugados y sus costos por faltantes.

Objetivos específicos:

- Reducir costos por obsolescencia, material faltante, daños en materiales, y costos de almacenaje.
- Adoptar técnicas de administración de inventarios.
- Reducir tiempos perdidos por cambios de presentación no planeados.
- Analizar el impacto del modelo sobre la cadena de suministro.

2.4 Hipótesis

Es posible determinar el nivel adecuado (u óptimo) de inventario de corrugados a través de un modelo de programación dinámica de materiales con demanda estocástica y restricciones de espacio.

Hipótesis específicas:

La implementación del modelo de programación dinámica, aunado a la práctica de técnicas de administración de inventarios, reducirá los costos por obsolescencia en al menos un 50%, por daños en materiales en al menos un 50% y por almacenaje en al menos un 20%. Así mismo, permitirá reducir los faltantes de corrugado en al menos un 50% que a su vez logrará disminuir los tiempos perdidos por cambios de presentación no planeados y el número de urgencias a proveedores.

2.5 Justificación del proyecto

La planta Kimblery Clark Ramos Arizpe, en la operación de productos Infantiles, asume altos costos que se originan por una planeación de los requerimientos de materiales no alineada con la demanda estocástica que enfrenta. Actualmente, la planeación se lleva a cabo mediante un estimado teórico calculado en base a un programa mensual, sin considerar las limitantes de espacio en almacén. De forma adicional, no se practican técnicas de administración de inventarios que contribuyan a tener un nivel adecuado de inventario en almacén y en proceso. Entre los costos que se originan con una planeación no estratégica y con un deficiente sistema para la administración de inventarios, se enuncian los siguientes:

- Sobreinventarios que incrementan el riesgo de daño a materiales cuyo costo asciende a los \$40,000 mensuales y representan riesgos de seguridad por ocupar áreas no designadas, pasillos peatonales y de montacargas.
- Obsolescencia. Existen al menos dos modificaciones anuales en el producto para mejorarlo y hacerlo más atractivo al consumidor, lo cual exige tener niveles mínimos de stock. Como un ejemplo, en el 2012 se eliminaron del almacén aproximadamente \$223,811.4 en corrugados obsoletos por cambios de presentación de producto. Representado la cantidad antes mencionada un 20% del total de materiales obsoletos.

Son precisamente estos corrugados los que ocupan aproximadamente el 30% del espacio total del almacén de materias primas representando 15 días de inventario.

Por otro lado, los proveedores también se ven afectados debido al efecto látigo, ya que en promedio se tienen dos modificaciones al programa mensuales que generan urgencias de materiales.

3. MARCO TEÓRICO

3.1 Definición de inventario

Según Buker (2004), inventario son los materiales o suministros que son conservados para su futuro uso o venta. Anteriormente, los inventarios eran vistos como algo positivo en la hoja de balance, y en la actualidad, si bien son necesarios para la fabricación de bienes, se considera como capital retenido.

Los tipos de materiales o productos que pueden encontrarse o considerarse como inventarios son:

- Materias primas y/o materiales.
- Bienes parcialmente terminados o inventario en proceso.
- Inventario de bienes terminados.
- Partes de reemplazo, herramientas y consumibles.
- Bienes en tránsito a empresas o clientes.
- Bienes de la empresa.

Estos materiales o productos se consideran capital retenido, ya que generan desperdicios y costos por:

- Espacio.
- Transporte.
- Obsolescencia.
- Daños.
- Dificultad para responder a los clientes.
- Costo de coordinar la producción.
- Costos de reducción en la capacidad.
- Costos de productos defectuosos en lotes grandes.

Un inventario conlleva una serie de gastos generales, los cuales normalmente incrementan el costo del producto hasta un 50% (del costo de

compra); esta cifra representa el costo total del material. En la Tabla 3 se muestra el listado del incremento en costo generado con los inventarios.

Tabla 3. Incremento en costos por inventarios (Buker, 2004).

| <i>Gasto</i> | <i>Incremento en costo</i> |
|----------------|----------------------------|
| Inspección | 5% |
| Almacenamiento | 5% |
| Manejo | 5% |
| Interés | 10% |
| Obsolescencia | 10% |
| Depreciación | 5% |
| Seguro | 5% |

3.2 Supuestos en los modelos de inventarios

Para Graves et al (2005) en general los supuestos que se hacen acerca de la demanda, costo y aspectos físicos del sistema determinan la estructura esencial del modelo.

- 1) *Demanda*. Los supuestos que se hacen acerca de la demanda son los más importantes para determinar la complejidad del modelo.
 - *Determinística y estacionaria*. La suposición más simple es que la demanda es constante y conocida. Hay dos diferentes suposiciones: una que la demanda no es anticipada y cambia, y la otra que la demanda puede predecirse por anticipado. El modelo de tamaño de lote económico (EOQ, por sus siglas en inglés) es basado en una demanda constante y conocida.
 - *Determinística y variable en el tiempo*. Los cambios en la demanda pueden ser sistemáticos o no sistemáticos. Los cambios sistemáticos son aquellos que se pueden pronosticar por anticipado.
 - *Incierta o estocástica*. Se denomina como proceso estocástico o incierto a cualquier variable que evoluciona a lo largo del tiempo.

Un proceso estocástico se define por una ley de probabilidad que gobierna la evolución de una variable x a lo largo de un horizonte temporal t , así para diferentes momentos del tiempo $t_1 < t_2 < t_3$ podemos obtener la probabilidad de que los valores $x_1, x_2, x_3 \dots$ correspondientes, se sitúen dentro de un rango específico. Este tipo de inventario se divide a su vez en estacionaria, donde la función de densidad de probabilidad de la demanda se mantiene sin cambios con el tiempo, y no estacionaria, donde la función de densidad de probabilidad varía con el tiempo. Note que estas características son las que nos llevan a seleccionar los modelos para la demanda los cuales pueden ser: a) modelos probabilísticos, cuando no hay cambio y b) series de tiempo, cuando hay cambio.

- *Desconocida*. El enfoque tradicional, en este caso, ha sido asumir alguna forma de la distribución de la demanda y actualizar la estimación de los parámetros utilizando la regla de Bayes cada vez que una nueva observación está disponible.

2) *Costos*. Dado que el objetivo es minimizar costos, los supuestos que se hacen acerca de la estructura de los costos son también importantes para determinar la complejidad del modelo (Graves et al, 2005).

- *Promedio contra descuento*. Cuando el valor del dinero en el tiempo es considerado, los costos deben ser descontados en lugar de promediados. El factor de descuento, α , está dado por

$$\alpha = (1 - r)^{-1} \tag{1}$$

donde r es la tasa de interés. Si C_1, C_2, \dots representa un flujo de costos incurridos sobre los periodos $1, 2, \dots$, entonces el presente valor del flujo de costos está dada por:

$$\sum_{i=1}^{\infty} \alpha_i C_i \quad (2)$$

Por otro lado, si los costos son promediados, entonces el costo promedio está dado por:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_i \quad (3)$$

- *Estructura del orden de los costos.* Las suposiciones, que se hacen acerca de la función del orden de los costos, pueden hacer una diferencia substancial en la complejidad del modelo resultante. La suposición más simple es que el costo obtenido de producir, así como el de los productos es c^* y para alguna constante c . Esto es conocido como un orden de costo proporcional y frecuentemente se asume cuando la demanda es incierta. Sin embargo, es más realista asumir que el orden de los costos tiene componentes fijos y variables. Esto es, de la forma

$$cy + K\delta(y) \quad (4)$$

Donde $\delta(y)$ es la función Dirac delta que satisface

$$\delta(y) = \begin{cases} 1, & y > 0 \\ 0, & y = 0 \end{cases} \quad (5)$$

La mayoría de los modelos determinísticos asumen un orden de costos de este tipo. El análisis de modelos estocásticos es considerablemente más complejo cuando un orden de costos mixto es incluido.

- *Costos variables en el tiempo.* Estos costos pueden regularmente incluirse sin incrementar la complejidad en el análisis.

- *Penalización de costos.* La mayoría de los modelos estocásticos y algunos determinísticos, incluyen un costo de penalización p , por no satisfacer la demanda en el momento requerido. En muchas circunstancias p es difícil de estimar. Por esta razón, en la mayoría de los sistemas se sustituye un nivel de servicio por p . El nivel de servicio es la proporción aceptable de demanda satisfecha del stock, o la proporción aceptable del orden de los ciclos en el cual la demanda es satisfecha.

3) *Otros aspectos físicos distintivos.* Los modelos de inventario son además distinguidos por suposiciones hechas acerca de varios aspectos del ritmo y logística del modelo (Graves et al, 2005).

- *Suposiciones de tiempo de entrega.* El tiempo de entrega se define como el tiempo que pasa desde la emisión de la orden de compra hasta que arriba al cliente; la suposición más simple es que tome el valor de cero. Ésta se utiliza cuando el tiempo requerido de reposición es corto comparado con el tiempo de las decisiones de re-orden. La suposición más común es que el tiempo de entrega es una constante compuesta. El análisis es más complicado cuando se asume que el tiempo de entrega (lead time) es aleatorio.
- *Suposiciones del pedido en espera de ser satisfecho.* La suposición más simple y utilizada es que todo el exceso de demanda representa pedidos en espera con un nivel negativo de inventario. El otro extremo, es que el exceso de demanda se pierde, o bien una parte de la demanda se satisface y otra se pierde. Una opción más es que los clientes aceptan esperar un tiempo razonable para que sus órdenes se satisfagan.
- *El proceso de revisión.* Revisión continua significa que el nivel de inventario es conocido en todo momento. En el otro extremo, el nivel de inventario es conocido solo en puntos discretos.

- *Cambios que ocurren en el inventario durante su almacenamiento.* Teorías tradicionales de inventario asumen que los artículos en inventario no cambian durante el tiempo que son almacenados. Algunos inventarios como líquidos volátiles o radioactivos, experimentan decadencia exponencial donde un porcentaje del inventario se pierde por unidad de tiempo. Inventarios fijos como comida, tienen tiempo de vida definido. Finalmente, los inventarios pueden estar susceptibles a obsolescencia, lo cual significa que el tiempo de vida no se puede predecir con anticipación.

3.3 Procesos estocásticos

Mascareñas (2008) define el proceso auto regresivo de primer orden o AR(1), como se muestra en la ecuación (6).

$$x_t = a + \beta x_{t-1} + \varepsilon_t \quad (6)$$

Donde a y β son constantes, con $-1 < \beta < 1$ y ε_t es una variable aleatoria normalmente distribuida de media nula. Este proceso es estacionario y x_t tiene un valor esperado a largo plazo igual a $a/(1 - \beta)$, independientemente de cual sea su valor actual (este valor se obtiene con $x_t = x_{t-1} = x$ en la ecuación (6) y despejando x). El proceso AR(1) se denomina también proceso de reversión a la media, porque el valor de x_t tiende hacia su valor esperado a largo plazo.

Hay numerosos procesos en la vida diaria que siguen una “reversión a la media”. Por ejemplo, la altura de las personas tiende a un valor medio, el arrojar una moneda al aire varias veces seguidas para contar las “caras” o las “cruces” tiende a un valor del 50% para cada una de ellas, etcétera. Una expresión matemática que muestra este proceso es:

$$x_t = x_{t-1} - b[x_{t-1} - E(X)] + \varepsilon_t \quad (7)$$

Donde $E(x)$ es el valor medio esperado de la variable aleatoria x , y b es la velocidad con la que se aproxima el valor de la variable x a su valor medio (velocidad de ajuste, o porcentaje de la diferencia entre el valor de x y su valor esperado que se elimina en cada periodo de tiempo). De tal manera que si el valor de x_{t-1} es superior al valor medio esperado, el valor de x_t probablemente será inferior a dicho valor esperado. La expresión (7) se puede alterar convenientemente para que sea idéntica a la (6).

Una versión más sofisticada del proceso de reversión a la media, analizado en el apartado anterior, es hacer que el valor de la variable x sufra saltos bruscos en momentos del tiempo aleatorios. Por ejemplo, este tipo de modelos sirve para modelar el comportamiento de los precios de la electricidad en un mercado libre. La ecuación del mismo es:

$$x_t = \alpha + \beta x_{t-1} + \varepsilon_t + \eta_t \varphi_t \quad (8)$$

El sumando $\eta_t \varphi_t$ se encarga de modelar los picos de los precios utilizando un proceso binomial simple. Así η_t , que indica si se produce o no el salto en el momento t , puede tomar un valor igual a la unidad con una probabilidad λ (es decir, se produce un salto) o tomar un valor nulo con una probabilidad $1 - \lambda$ (no se produce el salto). Mientras que φ_t , que indica el tamaño del salto, sigue una distribución normal con una media $(\mu\varphi)$ y una distribución típica $(\sigma\varphi)$.

Tanto el proceso del recorrido aleatorio (con estados discretos o continuos, con tendencia o sin ella) como el AR(1), satisfacen la propiedad de Markov y por ello se denominan procesos de Markov. Dicha propiedad dice que la probabilidad de que ocurra un evento depende del evento inmediatamente anterior.

3.4 Importancia de un inventario preciso

Según Buker (2004), los registros de inventario exactos son muy importantes para la gestión de inventario de una empresa. Esto debido a muchas razones entre las que se encuentran las siguientes:

- Verifican el inventario físico de un activo para la determinación del valor de una empresa.
- Los pedidos de los clientes pueden ser citados con exactitud y se envían desde el inventario.
- Pueden ser desarrollados y cumplidos los programas de producción, porque el personal puede contar con las piezas necesarias y los materiales disponibles en el inventario cuando sea necesario.
- Se pueden eliminar retrasos en la producción causada por la escasez inesperada de materiales críticos, las órdenes de último momento se pueden reducir.
- Los niveles de inventario se pueden reducir debido a que las existencias de seguridad para compensar la escasez inesperada o la información incorrecta de los saldos no son necesarias.
- Mejora la eficiencia productiva, la calidad del producto, productividad y servicio al cliente.

Un control de inventario eficaz depende de la información de inventario precisa y oportuna. Una clave de medición del control de inventarios es la exactitud de los registros de inventario.

3.5 Efecto látigo

Efecto látigo se refiere a las conexiones en las cadenas de suministro. Una amplia investigación se ha llevado a cabo para analizar el efecto látigo en las cadenas de suministro, un fenómeno en el que las fluctuaciones en el orden de la secuencia se hacen más grandes para los proveedores (Ouyang et al, 2010).

Este efecto explica las fluctuaciones de las ventas (demanda), la fabricación y suministro. Se observó por primera vez por Forrester (1961) al estudiar la dinámica industrial. Lee et al. (1997) han descubierto recientemente este fenómeno. Se han mencionado cuatro causas básicas del efecto látigo: efecto Forrester, o los plazos de entrega y el procesamiento de señal de demanda; efecto Burbidge, o procesamiento por lotes; efecto Houlihan, o el racionamiento y efecto de promoción, o fluctuaciones de precios.

3.6 Administración de inventarios

Para Bucker los síntomas de una pobre administración de inventarios son:

- Incumplimiento en tiempos de entrega.
- Crecimiento continuo de inventarios.
- Pérdida de espacio en almacén.
- Cambios frecuentes de producción.
- Excesivo tiempo perdido en máquina por escasez de materiales.
- Altos inventarios para amortiguar las ventas de emergencia, disposición de obsoletos o artículos de lento movimiento.

3.7 Sistema de Administración de Almacenes

Para Carsten (2007) el sistema de administración de almacenes (Warehouse Management System, WMS por sus siglas en inglés) permite a los administradores de almacenes completa visibilidad en todos los rincones de su almacén. Además, WMS también es compatible y automatiza recibos de depósito, almacenaje, preparación de pedidos y despacho. WMS puede ser configurado para seguir las reglas para que coincida con las operaciones de la empresa. Algunos de los principales objetivos de una empresa que desee la implementación de WMS serían los siguientes:

- Mejor utilización de espacio de almacén.
- Aumento de la productividad de los empleados.

- Mejora de la precisión del inventario.

De acuerdo con Aichlmayr (2002) los tres principales responsables de obstrucciones en la implementación de WMS son:

- El 61% de formación de los empleados / la curva de aprendizaje.
- El 45% de las modificaciones y actualizaciones necesarias.
- El 38% funcional (interna) los problemas de integración.

Para implementar con éxito la planificación de WMS la empresa debe disponer de tiempo suficiente para manejar problemas inesperados. La formación es también esencial para el éxito de la puesta en práctica.

3.8 Técnicas de planificación de recursos de fabricación

Según Zhou et al (2006), hoy en día las compañías han tratado de mejorar sus negocios incrementando la eficiencia y la eficacia de sus operaciones internas así como la optimización y gestión de la cadena de suministro externa.

Esto ha implicado que los fabricantes utilicen técnicas como la planificación de recursos de fabricación (materials requirement planning, MRP por sus siglas en inglés), justo a tiempo (just in time, JIT por sus siglas en inglés), y la planificación de recursos empresariales (enterprise resource planning, ERP por sus siglas en inglés).

El objetivo del MRP es determinar un calendario de reposición para un horizonte temporal determinado (Luoly y Dolgui, 2011). El enfoque MRP conlleva el cálculo de estos requisitos para una serie de periodos secuenciales de programación (intervalos de tiempo) que pueden ser igual a un día, semana o mes. Las necesidades brutas para el producto final están dadas por el Plan Maestro de Producción (MPS), las necesidades netas y órdenes proyectadas se deducen de los requerimientos brutos y del inventario disponible.

Por su parte el ERP fue implementado por primera vez en 1980 y es un sistema de información que integra todas las funciones de la empresa.

Desde que se inicia la planeación del proyecto ERP hasta que se da la evaluación del programa ya implantado, en la empresa se presenta un ambiente de generación de conocimientos constante, de tal forma que si los conocimientos que se generan fueran capitalizados, ayudarían a reducir los problemas que se van presentando durante el desarrollo del proyecto y sobre todo agilizaría la implantación de la herramienta ERP (Herrera et al, 2008).

La resistencia al cambio se da en todos los proyectos empresariales, muchas veces no es utilizado el nuevo sistema y se sigue con las mismas prácticas así como con la utilización de las herramientas y prácticas acostumbradas antes del proyecto.

Entre los errores más comunes de los empresarios al desarrollar un proyecto ERP se pueden mencionar los siguientes:

1. Los dirigentes del proyecto no visualizan los cambios en los mapeos funcionales. No hacen los mapeos de procesos.
2. La selección de la gente para dirigir el proyecto no siempre es ni la mejor ni la más adecuada. Un proyecto de esta índole requiere de conocimiento y experiencia.
3. La deficiente comunicación, el no saber qué está haciendo la persona de al lado, en qué fase va el otro o cuáles han sido las mejoras. La nula integración puede hacer que un proyecto de esta índole fracase rotundamente.

3.9 Modelo de tamaño de lote

Los supuestos de este modelo son (Porteus, Evan L., 2002):

- Un producto con tasa de demanda continua conocida en el tiempo indefinido al futuro.
- No se permite escasez o retrasos en entregas.
- Reposición inmediata cuando el nivel de inventario es igual a cero.
- El costo de ordenar es fijo.
- El costo fijo de preparación de máquina.

Notación:

K : costo fijo

c : costo de ordenar

λ : demanda promedio

h : costo de mantener en inventario

Q : tamaño de pedido

$C(Q)$: función objetivo del costo total.

Formulación de la función objetivo:

Un ciclo es la cantidad de tiempo T que transcurre entre órdenes. Dividiendo entre la longitud de tiempo del ciclo se obtiene el costo por unidad de tiempo, que es lo que se pretende minimizar.

Suponga que el primer ciclo comienza en $t = 0$ con el nivel de inventario en cero y termina en $t = T$. Un tamaño de lote Q se ordena y se recibe inmediatamente, incurriendo en un costo de ordenar por ciclo de $K + cQ$. Sea $x(t)$ el nivel de inventario en el tiempo t . Entonces, para $0 \leq t < T$, $x(t) = Q - \lambda t$. Para calcular T : se establece $Q - \lambda t = 0$, así $T = Q/\lambda$. El costo de inventario por ciclo es entonces:

$$\int_{t=0}^T hx(t)dt = h \int (Q - \lambda t)dt = h (QT - \lambda T^2 / 2) = \frac{hQ^2}{2\lambda} = \frac{hQT}{2} \quad (9)$$

Así, el costo total por semana es:

$$\frac{K + cQ + hQT / 2}{T} = \frac{K\lambda}{Q} + \frac{hQ}{2} + c\lambda \quad (10)$$

El primer término proporciona el costo promedio de preparación de máquina. El segundo proporciona el costo promedio de mantener en inventario h , y el nivel promedio de inventario en el tiempo $Q/2$. El último término $c\lambda$ es el costo directo requerido. Dado que éste es independiente de la política de reabastecimiento, se sigue la práctica usual de ignorarlo y escribir

nuestra función objetivo, consistente de los costos relevantes restantes, como sigue:

$$C(Q) = \frac{K\lambda}{Q} + \frac{hQ}{2} \quad (11)$$

Para encontrar la cantidad óptima de pedido, diferenciamos la función objetivo $C(Q)$ con respecto a la variable de decisión Q y establecemos el resultado igual a cero. Las condiciones resultantes de primer orden son:

$$C'(Q) = \frac{-K\lambda}{Q^2} + \frac{h}{2} = 0 \quad (12)$$

Revisando las condiciones de segundo orden, encontramos que la segunda derivada es $2K\lambda/Q^3$, el cual es estrictamente positivo para $Q > 0$, así la función objetivo es convexa sobre $(0, \infty)$. Por lo tanto, las condiciones de primer orden son suficientes para un mínimo. La solución resultante, que es la fórmula introducida por Harris (1913) y popularizada por Wilson (1934), es:

$$Q^* = \sqrt{\frac{2K\lambda}{h}} \quad (13)$$

Si la tasa de demanda se dobla, el tamaño de lote no se duplica. Se multiplica por $\sqrt{2} \cong 1.414$, así el tamaño de lote incrementa solo en un 40%. De forma similar el costo total esperado por semana incrementa aproximadamente en un 40%. Por otro lado, si se corta el costo de preparación de máquina en un 50%, no se reduce el tamaño de lote a la mitad. Se multiplica por $\sqrt{1/2} \cong 0.707$ así el tamaño de lote se reduce cerca de un 30%.

Suponga que la cantidad de la orden es a veces el tamaño de lote óptimo (Economic Order Quantity, EOQ por sus siglas en inglés), el costo resultante es:

$$\frac{1}{2} + a \frac{C^*}{2} \quad (14)$$

Por ejemplo, si el tamaño de la orden es 50% más alto que el EOQ ($a = \frac{3}{2}$) o el EOQ es 50% más alto que el tamaño de lote ($a = \frac{2}{3}$), entonces el costo resultante es $\left(\frac{13}{2}\right)C^*$, que significa que el costo actual es cerca del 8% más alto que el óptimo. El EOQ es robusto en este sentido: errores grandes en las cantidades de orden conducen a bajas penalidades en costo.

3.10 Sistema de “jalar”

Justo a tiempo en producción se basa en la demanda real para desencadenar la liberación del trabajo en el sistema, y "jalando" el trabajo a través del sistema para completar la orden. La producción justo a tiempo es más hábil para responder a las demandas cambiantes de los clientes, que aboga por la producción de los productos adecuados en el momento oportuno y en las cantidades correctas (Marek et al, 2001).

Ventajas del sistema de jalar:

- Hay menos congestión.
- Son más fáciles de controlar que los sistemas de empujar.
- El inventario de trabajo en proceso es limitado.

3.11 Estrategias de pronóstico

Las empresas cuentan con los pronósticos de ventas para planificar la producción, justificar las decisiones de marketing y guiar la investigación. Un método muy eficiente de pronosticar una variable es encontrar una variable relacionada que la conduce por uno o más intervalos de tiempo.

En muchas aplicaciones, no podemos confiar en la búsqueda de una variable principal adecuada y tenemos que probar otros métodos. Un segundo enfoque, común en marketing, es el uso de la información sobre las ventas de productos similares en el pasado. El modelo de difusión de Bass se basa en este principio. Una tercera estrategia es hacer extrapolaciones sobre la base de las tendencias actuales y poner en práctica las estimaciones de adaptación de estas tendencias (Cowpertwait et al, 2009).

En los apartados 3.10.1 al 3.10.4 (Cowpertwait et al, 2009) se revisarán los modelos de Bass, Suavización exponencial, el Método Holt Winters y el modelo de Promedios Móviles, aplicables según las suposiciones del problema particular.

3.11.1 Modelo de Bass

Frank Bass publicó un artículo describiendo su modelo matemático, que cuantifica la teoría de la adopción y difusión de un nuevo producto de la sociedad, en *Management Science* hace casi cincuenta años (Rogers, 1962).

La matemática es simple, y el modelo ha tenido una gran influencia en la comercialización. La fórmula Bass para el número de personas, N_t , que han adquirido un producto en el momento t depende de tres parámetros: el número total de personas que finalmente compran el producto, m , el coeficiente de innovación, p , y el coeficiente de imitación, q . La fórmula Bass es:

$$N_{t+1} = N_t + p(m - N_t) + qN_t(m - N_t)/m \quad (15)$$

3.11.2 Suavización exponencial

El objetivo es predecir algún valor futuro X_{n+k} dada una historia de observaciones $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ hasta el tiempo n . Se asume que no hay tendencia ni efectos estacionales, la media puede cambiar de un punto en el tiempo a otro. El modelo de pronóstico es:

$$x_t = \mu_t + w_t \quad (16)$$

Donde μ_t es la media no estacionaria del proceso en el tiempo t y w_t son las desviaciones aleatorias independientes con $\mu = 0$ y desviación estándar σ .

Dado que no hay una tendencia sistemática, una estimación razonable de la media en el tiempo t es dada por un promedio ponderado de nuestra observación en el tiempo t y nuestra estimación de la media en el tiempo $t - 1$:

$$a_t = \alpha x_t + (1 - \alpha)a_{t-1} \quad 0 < \alpha < 1 \quad (17)$$

El valor de α determina la cantidad de suavización:

Si $\alpha \sim 1$, hay poca suavización y $a_t \sim x_t$.

Si $\alpha \sim 0$, hay alta suavización y toma poco en cuenta la observación más reciente.

La ecuación de pronóstico es:

$$\hat{x}_{n+k|n} = a_n \quad \text{con } k = 1, 2, \dots \quad (18)$$

La ecuación (17) para a_t puede reescribirse como sigue. Podemos escribir la suma de a_{t-1} y una proporción de error de pronóstico un paso hacia adelante $x_t - a_{t-1}$,

$$a_t = \alpha(x_t - a_{t-1}) + a_{t-1} \quad (19)$$

Para cualquier α dada, el modelo (19) con el valor inicial $a_1 = x_1$ puede ser usado para calcular a_t con $t = 2, 3, \dots, n$. Los errores de predicción un paso adelante, están dados por:

$$e_t = x_t - a_{t-1} \quad (20)$$

Puede calcularse α minimizando la suma de los errores de predicción un paso adelante o bien, en el caso específico donde la media del proceso no cambia, $\alpha = 1/n$.

3.11.3 Método Holt Winters

El método Holt-Winters generaliza la ecuación (17) y la forma aditiva estacional a partir de sus ecuaciones actualizadas para una serie $\{x_t\}$ con periodo p es:

$$a_t = \alpha(x_t - S_{t-p}) + (1 - \alpha)(a_{t-1} + b_{t-1}) \quad (21)$$

$$b_t = \beta(a_t - a_{t-1}) + (1 - \beta)(b_{t-1}) \quad (22)$$

$$S_t = \gamma(x_t - a_t) + (1 - \gamma)(S_{t-p}) \quad (23)$$

Siendo a_t , b_t y S_t el nivel estimado, la tendencia y el efecto estacional en el tiempo t y α , β y γ los parámetros de suavización.

La ecuación de pronóstico para \hat{x}_{n+k} hecha después de la observación en el tiempo n es:

$$\hat{x}_{n+k|n} = a_n + kb_n + S_{n+k-p} \quad k \leq p \quad (24)$$

3.11.4 Modelo de Promedios Móviles

Un (MA) proceso de media móvil de orden q es una combinación lineal del término de ruido blanco actual y los términos pasados más recientes de ruido blanco q y se define por:

$$x_t = w_t + \beta_1 w_{t-1} + \dots + \beta_q w_{t-q} \quad (25)$$

donde $\{w_t\}$ es ruido blanco con media cero y varianza σ_w^2 . La ecuación (25) puede reescribirse en términos del operador de desplazamiento hacia atrás B .

$$x_t = \left(1 + \beta_1 B + \beta_2 B^2 + \dots + \beta_q B^q\right) w_t = \phi_q(B) w_t \quad (26)$$

Donde ϕ_q es un polinomio de orden q . Dado que los procesos MA consisten en una suma finita de términos de ruido blanco estacionario, éstos son fijos y por lo tanto tienen una media y autocovarianza invariante en el tiempo.

3.12 Evaluación del Modelo de Pronóstico

La exactitud de predicción es un criterio importante para evaluar la validez de la estrategia de pronóstico. Tres medidas estadísticas para estimar el rendimiento y la fiabilidad del modelo son el error absoluto porcentual promedio (MAPE, por sus siglas en inglés), la desviación media absoluta (MAD, por sus siglas en inglés) y el error cuadrático medio (MSE, por sus siglas en inglés) (Bianco et al 2010).

MAPE es una medida general del porcentaje de precisión de la predicción. MAD y MSE son dos medidas de la magnitud promedio de los errores del pronóstico, pero éste último impone una penalidad mayor a errores grandes que a varias desviaciones pequeñas.

Los tres indicadores arriba mencionados se calculan como sigue:

$$\mathbf{MAPE} = \frac{\sum \frac{|\text{Actual} - \text{Pronóstico}|}{\text{Actual}} * 100\%}{n} \quad (27)$$

$$\mathbf{MSE} = \frac{\sum (\text{Actual} - \text{Pronóstico})^2}{n} = \frac{\sum (\text{Error})^2}{n} \quad (28)$$

$$\mathbf{MAD} = \frac{\sum |\text{Actual} - \text{Pronóstico}|}{n} = \frac{\sum |\text{Error}|}{n} \quad (29)$$

4. ESTADO DEL ARTE

A continuación se compendia algunos aspectos importantes relacionados con el control de inventarios que pretenden describir la forma en que pueden mejorarse las operaciones dentro de un almacén y dentro de la cadena logística. Esto con el objetivo de clarificar como el sistema de administración de almacenes, previsto a implementar en la empresa Kimberly Clark, contribuirá a un modelo más eficiente de tamaño de lote de materias primas a través de la provisión de información en tiempo real sobre el estado de los inventarios.

Por otro lado se continúa con la revisión de la literatura sobre los modelos de tamaño de lote donde se incluyen algunas características útiles para el problema planteado, considerando restricciones de espacio, demanda de múltiples productos y tiempos de entrega estocásticos.

En lo que refiere a las fuentes de incertidumbre Gong y Koster (2011) las clasifican de acuerdo a la ubicación como:

- Fuentes fuera de la cadena de suministro.
- Fuentes de la cadena de suministro, pero fuera del almacén.
- Fuentes en el interior del almacén.
- Fuentes dentro de los sistemas de control de almacén.

Para enfrentar estas incertidumbres, varios modelos estocásticos han sido aplicados por investigadores de almacenamiento como la optimización heurística y la simulación. Por otro lado, las incertidumbres también pueden clasificarse de acuerdo con la estructura como:

- Eventos impredecibles como la guerra, huelgas, inundaciones y huracanes entre otros que generalmente son eventos raros.
- Eventos predecibles como la estacionalidad de la demanda.

En lo que concierne a las fluctuaciones de la demanda de los clientes, el efecto látigo implica que estas fluctuaciones puedan resultar en una demanda amplificada además de fluctuaciones en los niveles de inventario sobre la cadena de suministro.

Dado que el aumento de inventarios genera costos de transporte, tiempos de entrega más largos y la dificultad para responder de manera proactiva a los cambios en tiempo real; una información exacta, flujo de información exacta, visible, en tiempo real y transparente es vital para la gestión de las empresas comerciales y seguimiento de la producción a nivel local y mundial de la cadena de suministro. La precisión de la toma de decisiones depende totalmente de la información exacta en tiempo real de la empresa (Zhou et al 2006). En la Tabla 4 se enlistan las operaciones del almacén con operaciones de incertidumbre y las prácticas que contribuyen a minimizar su impacto.

Zhou resume en tres métodos generales el seguimiento de activos y su identificación: papel y lápiz o de mantenimiento de registros manual, las técnicas de código de barras impreso con etiquetas de papel o de plástico con los lectores de láser y computadoras para el mantenimiento de registros y técnicas de RFID con los interrogadores de la lectura y las computadoras para el mantenimiento de registros.

Los métodos manuales son operaciones costosas en mano de obra, que fueron los primeros métodos que se utilizaron y todavía se encuentran en uso. Con su precisión y facilidad de uso en comparación con los métodos manuales, los códigos de barras pronto se convirtieron en el método predominante para la identificación de activos, hoy en día todavía continúa en uso.

Como el uso de códigos de barras creció, una característica significativa comenzó a limitar las aplicaciones: la etiqueta se lee mediante un haz de luz. El código de barras fue, por tanto, limitada a ambientes limpios con una línea de visión directa al lector y el lector tenía que estar cerca de la etiqueta.

Tabla 4. Prácticas que contribuyen a minimizar el impacto de las incertidumbres (Zhou et al 2006).

| Proceso estocástico | Operación del proceso | Práctica | Puntos asociados con incertidumbre |
|------------------------------------|-------------------------|-------------------------------|--|
| Proceso de llegada | Llegada de producto | Transporte | Ruptura del transporte afecta el proceso de llegada e incrementa la incertidumbre. |
| | | Preparación de pedido | Reduce la variabilidad de rendimiento de tiempo simplificando procesos. |
| | | Programación de recibo | Reduce la incertidumbre y mejora el ritmo de llegada a través de los recursos en programación de recibo. |
| | | Pre-recibo | Reduce incertidumbre capturando información como asignación de localización y la identificación del producto anticipada. |
| | | Preparación de recibo | Se reduce la incertidumbre y mejora el ritmo de llegada a través de la planeación. |
| | Orden de llegada | Demanda del cliente | La estacionalidad puede afectar la demanda del cliente. |
| | | Comunicación | Los errores de comunicación del sistema entre el cliente y el almacén incrementarán la incertidumbre. |
| Proceso medular de servicio | Entrada a inventario | Entrada directa a inventario | La entrada directa al almacén elimina actividades de inspección. |
| | | Entrada a inventario dirigida | El proceso de coordinación de entrada a stock a través de maximizar la localización y utilización de espacio. |
| | | Entrada secuenciada | Una eficiente forma de estabilizar el ritmo de servicio de entrada a stock. |
| | Almacenamiento | Área reservada | Logra una mejor utilización del espacio y reduce la incertidumbre del reabastecimiento. |
| | | Área anticipada | Mejora el ritmo de servicio y reduce la fluctuación de la recolección. |
| | Orden de recolección | Recolector a partes | Adecuadas políticas de ruteo mejorarán la velocidad del servicio. |
| | | Partes a recolector | Un sistema automático de bandas y el balanceo de las estaciones de trabajo reducirá la incertidumbre. |
| | Empaque y clasificación | Empaque | Inexactitud en el orden de empaque incrementa la incertidumbre y reduce la velocidad de entrega. |
| Proceso de salida | Embarque | Contenedor de carga | Optimización puede maximizar la utilización de cada contenedor y reducir además la incertidumbre de utilización. |
| | | Actividad de puesta en marcha | Una actividad automática y embarque directo puede eliminar la incertidumbre y mejorar la velocidad de embarque. |
| | | Inexactitud de embarque | Técnicas de trazabilidad y rastreo pueden disminuir la incertidumbre de la entrega. |

El desarrollo de la radio frecuencia (RF) prometió técnicas para superar estas limitaciones, y con la introducción de los productos RFID desarrollada por Savi Technology, esta promesa se hizo realidad.

Con esto podemos identificar sistemas de administración de inventarios apoyados en métodos de identificación de activos como el RFID o código de barras que permiten contar con información sobre el estado de los inventarios en tiempo real contribuyendo con ellos a una mejor toma de decisiones.

Continuando en lo concerniente a la programación de materiales Wong et al (2011) proponen un problema dinámico y estocástico de tamaño de lote con materias primas que se deterioran fácilmente, en el que son determinados el costo unitario óptimo de materiales y costo unitario de mantenimiento. Este problema abarca un sub-problema de planeación de reposición por lo que aplica un sistema de decisión, basada en una red neuronal artificial (ANN) y optimización modificada de colonia de hormigas (ACO).

El modelo ANN es utilizado para conocer los resultados de simulación, seguido por la aplicación de un algoritmo ACO real modificado para encontrar las variables de decisión óptimas. En este trabajo Wong adoptó técnicas de inteligencia artificial para resolver un problema estocástico de reposición.

El objetivo fue minimizar el costo total esperado, mediante la adopción del inventario gestionado por el vendedor. El costo total incluye el costo de manufactura, el costo de reposición para el mayorista y el costo del mayorista. Como trabajo futuro Wong sugiere probar el impacto del método propuesto o análisis de sensibilidad bajo diferentes escenarios.

Para el problema planteado en este documento las principales diferencias con el modelo propuesto por Wong son que las materias primas no se deterioran fácilmente, el inventario no es gestionado por el vendedor sino que se determina en base a un pronóstico de ventas y no considera restricciones de capacidad de almacén.

Por su parte Louly y Dolgui (2011) analizaron la parametrización del software de Planeación de los Requerimientos de Materiales (MRP) en virtud de la incertidumbre del tiempo de entrega real, sin embargo su modelo no abarca las incertidumbres en la demanda del cliente. Así mismo, se limitó a un sólo artículo de inventario con una demanda fija.

El modelo y algoritmos propuestos por Louly y Dolgui minimizan la suma de los costos al tiempo que satisface una restricción del nivel de servicio y su originalidad consiste en encontrar una forma cerrada de la función objetivo, válido para cualquier distribución de probabilidad de los tiempos de entrega reales.

MRP se basa en la suposición de que la demanda y tiempo de entrega son deterministas. Sin embargo, la mayoría de los sistemas de producción son estocásticos. El objetivo del modelo propuesto por Louly y Dolgui es la búsqueda de los valores óptimos de los parámetros p (periodicidad) y x (tiempo de entrega planeado), minimizando la suma de costos por mantenimiento de inventario y preparación de máquinas con la restricción de servicio al cliente.

El método que sugieren toma en cuenta el hecho de que los actuales tiempos de entrega son aleatorios. Como trabajo futuro Louly y Dolgui sugieren utilizar su modelo con diferentes posibles valores de la demanda para examinar la sensibilidad de los parámetros obtenidos a dichos valores.

En lo que refiere al punto de interés del presente trabajo, cabe mencionar que MRP se basa en la suposición de que la demanda y tiempo de entrega son deterministas. Sin embargo, la mayoría de los sistemas de producción son estocásticos. Además, es crucial considerar que los sistemas MRP no consideran una demanda estocástica y dinámica. Por otro lado, el modelo propuesto por Louly y Dolgui no abarca restricciones de capacidad de almacenamiento, que es una variable a considerar para las necesidades de la empresa Kimbelry Clark de México.

En lo que concierne al problema de la reposición de múltiples productos para satisfacer las demandas dinámicas cuando la capacidad de almacenamiento o el presupuesto de inventario disponible son limitados, Minner (2009) analiza la temporización de reposición de los tamaños de lote de forma escalonada para proporcionar una distribución efectiva de espacio en adición a la solución de la compensación entre los costos de preparación de máquina y los costos de mantener en inventario.

Minner propone un método heurístico basado en el ahorro para el problema de programación de almacén y compara tres métodos sencillos para el problema de tamaño de lote con demanda dinámica de varios artículos con capacidad de almacenamiento limitada. Adicionalmente, probó el rendimiento de los métodos propuestos mediante un estudio numérico; el objetivo fue reducir al mínimo la suma de tiempos de preparación y el costo de mantener en inventario.

Como trabajo futuro Minner propone mejorar el óptimo global mediante la aplicación de meta-heurísticas como Búsqueda Tabú y Algoritmos Genéticos. Por otro lado el método propuesto puede considerar una demanda además de dinámica, estocástica.

Por su parte Piperagkas et al. (2012) definen que el problema de tamaño del lote determinista (DLS) consiste en determinar la cantidad de productos a ordenar o producir en cada período de tiempo en un horizonte de planificación discreta finita, con el fin de satisfacer la demanda de cada período de tiempo que minimiza la suma de los costos de preparación de máquina y de mantener en inventario.

Seleccionaron tres algoritmos de optimización heurística, aún sin estudiar en el problema específico: enjambre de partículas de optimización (PSO), la evolución diferencial (DE) y búsqueda de la armonía (HS).

PSO se parece al comportamiento observado en un enjambre de aves. Por otro lado, DE está estrechamente asociado con algoritmos evolutivos, se asemeja a procedimientos de recombinación y mutación.

HS lleva a cabo un procedimiento similar al proceso de improvisación musical, aunque su estructura y funcionamiento tienen semejanzas con algoritmos evolutivos, tales como estrategias de evolución. En éste método se asume que:

- El horizonte de planificación se compone de H periodos de tiempo.
- La demanda en cada período, t , es no negativo, independiente y estocástico con densidad conocida.
- La capacidad de producción es ilimitada.
- La demanda insatisfecha se acumula en órdenes insatisfechas y se tiene un costo al final de cada período por unidad atrasada.
- Un tiempo de espera fijo, L , se asume y no se permite la disposición de inventario.
- Al final del horizonte, los costos de mantenimiento o atrasos son evaluados y cualquier demanda insatisfecha se deja sin cubrir.
- El primer lote de producción programado llega al inicio del periodo 1, y no hay lotes de producción de tuberías.

Notación:

d_t : demanda en el periodo $t = 1, 2, \dots, H$ con función de densidad conocida $\phi_t(x)$.

h_t : costo de mantener en inventario.

b_t : costo por orden atrasada (proporcional a h_t)

A_t : preparación de máquina fija por cada periodo.

S_t : suma acumulada de todos los lotes de producción para llegar hasta e incluyendo el período t .

$K(x)$: variable de decisión binaria definida como

$$k(x) = \begin{cases} 1, & x \neq 0 \\ 0, & x = 0 \end{cases}$$

Donde x es el volumen de producción en un periodo de tiempo.

Formulación matemática

El costo esperado incurrido en el periodo $t = 1, 2, \dots, H$ es dado por la siguiente expresión:

$$E_t(S_1, S_2, \dots, S_T) = A_{t-L}k (S_t - S_{t-1}) + h_t \int_0^{S_t} (S_t - q) f_t(q) dq + b_t \int_0^{\infty} (q - S_t) f_t(q) dq \quad (30)$$

Donde $f_t(q)$ es la circunvolución de las funciones de densidad de demanda ϕ_i para los periodos $i = 1 - L$ hasta t . El problema de optimización correspondiente es especificar las cantidades acumulativas de producción, S_t , $t = 1, 2, \dots, H$, que produce el costo mínimo de preparación de máquina, costos de mantener en inventario y de órdenes atrasadas.

$$\min_{0 < S_1 \leq S_2 \leq \dots \leq S_H} \sum_{t=1}^H E_t(S_1, S_2, \dots, S_t) \quad (31)$$

En realidad, el problema se resuelve en dos etapas. Al principio, se determinan las cantidades de reabastecimiento óptimas para cualquier secuencia de épocas y después se identifica la secuencia óptima de las épocas de reposición.

Los resultados experimentales de los algoritmos en un caso de estudio con demanda con distribución normal, muestran como DE y PSO, pueden ser muy eficaces, incluso en problemas de alta dimensión con respecto a la precisión y al tiempo para la solución. El siguiente paso en la investigación tendrá en cuenta los problemas con diferentes distribuciones de demandas así como los diferentes enfoques de optimización heurística.

Para el problema de investigación que nos concierne, se obtienen formulaciones matemáticas útiles para calcular el costo de mantener en inventario, considerando demanda estocástica mediante una función de distribución dada.

Sin embargo, en la formulación se consideran órdenes atrasadas, costo de preparación de máquina y capacidad ilimitada de producción que no empatan con los requerimientos del problema planteado en este proyecto.

Tiacci y Saetta (2012) definen como el problema de tamaño de lote capacitado (CLSP, por sus siglas en inglés) al problema de un solo nivel de tamaño de lote para varios elementos que compiten por los recursos finitos (máquina o instalación) de capacidad. El CLSP es un modelo de gran cubo (es decir, más de un producto puede ser producido en cada periodo) que no considera la secuencia de productos en cada periodo.

En este trabajo se proponen y prueban en un horizonte rodante, formulaciones simplificadas que tienen en cuenta futuros costos de preparación de máquina y se considera el impacto de la utilización de los datos de demanda pronosticada en lugar de los reales. De hecho si por un lado la incertidumbre de la demanda justifica la simplificación del modelo por el otro lado se introducen problemas de inestabilidad que tienen que ser considerados cuando se generen los planes de producción.

Se formulan modelos simplificados con algunas variantes aplicables en un horizonte rodante. Se evalúa la adecuación de estos modelos simplificados mediante la simulación del proceso de pronóstico y la generación de planes de producción durante un año, a partir de datos históricos de la demanda de la empresa.

Los productos se fabrican sobre la base de la demanda pronosticada, y los pedidos sin cumplir no están permitidos. La restricción de la capacidad no es muy fuerte, es decir, la capacidad de la planta normalmente excede el total de la demanda ordinaria por período. Sin embargo, además de esta demanda ordinaria, que se colecta en una base mensual y debe ser cumplido de inmediato, a veces se programan algunas órdenes especiales con antelación para una gran cantidad de productos (normalmente un pedido especial tiene que ser despachado en cuatro meses).

Así, el horizonte de planificación tiene que ser extendido después del primer período, con el fin de evitar una escasez de capacidad debido a las órdenes especiales. También es necesario un horizonte de planificación para prever la producción de las necesidades futuras. En realidad, los cambios de producción que son dependientes de secuencia también son caros. Por lo tanto, puede ser conveniente producir grandes lotes con el fin de limitar el número total de cambios de máquina.

Los sistemas de planificación y pronóstico se aplican sobre una base de horizonte rodante. Se recogen los requisitos de demanda ordinaria para el próximo período; estos requisitos representan pedidos confirmados, que se toman como ciertos. Si el horizonte rodante de tiempo es T periodos, el sistema de pronóstico de la demanda proporciona previsiones de demanda ordinarias de los $T - 1$ periodos restantes ($t = 2, \dots, T$) a través de un método de adaptación automática (suavizado exponencial simple), sobre la base de los datos históricos que se actualizan según el tiempo rodante siguiente. A continuación, se añaden órdenes especiales (con fechas de vencimiento).

Las necesidades totales (demanda ordinaria colectada + demanda ordinaria prevista + pedidos especiales) para los próximos T períodos se utilizan como insumos en el sistema de planificación. La adaptación automática del sistema de pronóstico de la demanda no se ve influenciada por órdenes especiales, sino sólo por los datos de demanda ordinarios. El sistema de planificación genera los planes de producción para los próximos T períodos con base en las necesidades totales y las existencias actuales; sin embargo, sólo las decisiones relacionadas con el primer período son aplicadas.

El *modelo completo* es una versión adaptada del problema del tamaño de lote general y su programación (GLSP, por sus siglas en inglés) presentado en Fleischmann y Meyr (1997). GLSP hace uso de una estructura de tiempo de dos niveles que divide el horizonte de planificación en cubos grandes que se subdividen en lotes pequeños, proporcionando una forma natural de modelos dependientes de la secuencia de los costos de preparación de máquina.

Cada macro-período $t = 1, \dots, T$ del horizonte de planificación se divide en un número fijo de n_t sub períodos no traslapados con longitud variable, en la que un solo tipo de producto puede ser producido. La longitud de un micro-periodo es también una variable de decisión, pero se expresa en el modelo por la cantidad producida dentro. Por lo tanto, teniendo Z_t igual al número de productos P , cada macro-período se divide en P sub períodos en los que cada producto se produce ya sea sobre el sub-período completo o no.

Índices y parámetros

$p, i, j, k = 1, \dots, P$ productos

$t = 1, \dots, T$ periodos

$n = 1, \dots, \eta$ sub –periodos

P el número de productos, y el número de cambios de máquina posibles en el periodo t .

T el número de periodos (igual al horizonte de planeación).

η_t el número de sub-periodos en el periodo t , en este caso igual a P .

$L_t = F_t + \eta_t - 1$ el índice del primer sub periodo en el periodo t .

$L_t = \sum_{t=1}^T \eta_t$ el índice del último sub periodo en el periodo t .

$\eta_t = \sum_{t=1}^T \eta_t$ el número total de sub periodos sobre los periodos $1, \dots, T$.

Datos

C la capacidad disponible en cada periodo t .

r_p la capacidad requerida para producir una unidad del producto p .

d_{pt} la demanda del producto p en el periodo t .

h_{pt} el costo de mantener en inventario el producto p en el periodo t .

s_{jk} el costo de preparación de máquina por cambiar del producto j al producto k , donde $s_{jj} = 0$

Variables

x_{pn} la cantidad (tamaño de lote) del producto p a ser producido en el sub periodo n .

I_{pt} el inventario del producto p al final del periodo t .

y_{kn} variable binaria que indica el estado de la planta en el sub periodo n .

= 1 si la planta es configurada para producción del producto k .

= 0 de otra forma.

z_{jkn} variable binaria que indica si hay un cambio del producto j al producto k al comienzo del sub periodo n .

= 1 si la planta es configurada para producción del producto k .

= 0 de otra forma.

$$\text{Minimize } \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T h_{pt} I_t + \sum_{j=1}^P \sum_{k=1}^P \sum_{n=F_1}^{L_t} S_{jk} Z_{jkn} \quad (32)$$

Sujeto a

$$I_{p,t-1} + \sum_{n=F_t}^{L_t} x_{pn} - I_{pt} = d_{pt} \quad \forall t, p \quad (33)$$

$$r_k x_{kn} \leq C y_{kn} \quad \forall j, k, n \quad (34)$$

$$\sum_{k=1}^P \sum_{n=F_t}^{L_t} \Gamma_k x_{kn} \leq C \quad \forall t \quad (35)$$

$$z_{jkn} \geq y_{j,n-1} + y_{kn} - 1 \quad \forall j, k, n \quad (36)$$

$$\sum_{k=1}^P y_{kn} = 1 \quad \forall n \quad (37)$$

$$y_{kn} \in \{0,1\} \text{ con } y_{k0} \quad \forall k, n \quad (38)$$

$$z_{jkn} \geq 0; k_{pn} \geq 0; I_{pt} \geq 0 \text{ con } I_{p0} = 0 \quad \forall j, k, n, p, t \quad (39)$$

La función objetivo (32) minimiza la suma de los costos de mantenimiento y los costos de preparación de máquina dependientes de la secuencia en el horizonte de planificación. La restricción (33) asegura que la demanda se cumple. La restricción (34) asegura que un producto puede ser producido en un sub-periodo si y sólo si la planta está configurado para ello ($y_{kn} = 1$), así como mantener la producción dentro de la capacidad de la planta. Sin embargo, debido a que en nuestro caso la capacidad C es la capacidad total disponible en cada período t (y no en cada sub-periodo), la restricción (35) asegura que la producción de todos los productos en cada período no exceda la capacidad de la planta.

La restricción (36), junto con la función objetivo (32), forzan la variable continua z_{jkn} a tener un valor de 1 si hay un cambio del producto j al producto k , o bien un valor 0 en caso contrario. Restricciones (37) y (38) aseguran que un solo tipo de producto puede ser producido en cada sub-período. Consideramos la variable del tamaño del lote x_{pn} continua y, por supuesto, positiva (39).

Sin pérdida de generalidad, suponemos que $y_{k0} = 0$ y $I_{p0} = 0$. El estado del cambio de máquina en el comienzo del primer periodo se conoce y se tiene en cuenta, así como el nivel de inventario de cada producto.

En este documento se supone que la configuración siempre satisface el triángulo de la desigualdad $s_{ik} + s_{kj} \geq s_{ij} \forall i, j, k$. En el modelo simplificado Corregido (CSM) se introduce en la función objetivo un término que representa, aunque de forma aproximada, costos de preparación de máquina futuros, sin introducir la complejidad de especificar las secuencias exactas de producción. Por esta razón se introducen la variable binaria y_{kn} , la cual indicará la producción efectiva de un producto k en periodos anteriores y un término sm_k que estima el costo de preparación de máquina futuro correspondiente.

La formulación siguiente es propuesta:

$y_{kn}, n = F_1, \dots, + L_1$ la variable binaria que indica el estado de la planta en el sub-periodo n

= 1 si la planta es configurada para producir el producto k

= 0 de otra forma

$y_{kn}, n = F_2, \dots, + L_T$ la variable binaria que indica si el producto k es producido actualmente en el sub-periodo n

= 1 si el producto k es producido

= 0 de otra forma

$sm_k = (\sum_{j=1}^P s_{kj} + \sum_{j=1}^P s_{jk})/2(P - 1)$ Costo estimado de preparación de máquina del producto k

$$\mathbf{Minimize} \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T h_{pt} I_t + \sum_{j=1}^P \sum_{k=1}^P \sum_{n=F_1}^{L_t} S_{jk} Z_{jkn} + \sum_{k=1}^P \sum_{n=F_2}^{L_T} sm_k y_{kn} \quad (40)$$

Sujeto a las restricciones mencionadas de la (33) a la (36), (38) y considerando además:

$$Z_{jkn} \geq 0 \quad \forall j, k, n = F_1, \dots, L_1 \quad (41)$$

$$k_{pn} \geq 0; I_{pt} \geq 0 \text{ con } I_{p0} = 0 \quad \forall n, p, t \quad (42)$$

$$z_{jkn} \geq y_{j,n-1} + y_{kn} - 1 \quad \forall j, k, n = F_1, \dots, L_1 \quad (43)$$

$$\sum_{k=1}^P y_{kn} = 1, n = F_1, \dots, L_1 \quad (44)$$

Aplicando el modelo CSM, un producto se puede producir en el primer periodo aunque sus inventarios iniciales sean más altos que sus requerimientos para el primer periodo. Este comportamiento es debido a que el costo de preparación de máquina s_{jj} para el cambio del producto i al j en el primer periodo puede ser más bajo que sm_j (el costo estimado de preparación de máquina para producir el producto j en periodos anteriores); si por ejemplo el producto i se ha programado en el primer periodo (porque sus inventarios iniciales son más bajos que sus requerimientos), esto puede además ser conveniente para futuros periodos, evitando la necesidad de establecer un costo (estimado) alto de preparación de máquina en el futuro.

Desafortunadamente, cuando los requerimientos futuros son pronosticados, hay una probabilidad consistente de que la cantidad producida en el primer periodo no sea suficiente para cubrir con exactitud el número esperado para periodos anteriores, con la consecuencia de tener preparaciones de máquina antes de lo esperado. Esto ocurre cada vez que el pronóstico subestime la demanda real, causando un incremento en costos de preparación de máquina.

Para corregir este comportamiento y limitar el número de cambios de máquina para el primer periodo, el CSM se modifica añadiendo una restricción adicional que asegura que si el inventario inicial de un producto es más alto que el requerimiento del primer periodo, el producto no tiene que producirse en el primer periodo. A este se le llama *Modelo congelado corregido simplificado (FCSM)*.

Consideremos un horizonte de planeación igual a t periodos:

G_1 el conjunto de productos p : $I_{p0} > d_{p1}$

G_2 el conjunto de productos p : $I_{p0} < d_{p1}$

Se está considerando no producir productos del grupo G_1 en el primer periodo. En este caso, la capacidad total R_1 requerida en periodos 2, ..., t para producir productos del grupo G_1 sería igual a

$$R_1 = \sum_{p \in G_1} \max \left\{ 0, \left(\sum_{\tau=1}^t d_{p\tau} - I_{p0} \right) \cdot r_p \right\} \quad (45)$$

De forma similar, la siguiente fórmula representa la capacidad total requerida en periodos 1, ..., t para producir productos del grupo G_2 , porque éstos pueden ser producidos posiblemente además en el periodo 1.

$$R_2 = \sum_{p \in G_2} \max \left\{ 0, \left(\sum_{\tau=1}^t d_{p\tau} - I_{p0} \right) \cdot r_p \right\} \quad (46)$$

Considerando que la producción del grupo G_2 puede ser anticipada en el primer periodo, hasta la saturación de la capacidad total de la planta, la mínima capacidad R_3 requerida en periodos 2, ..., t para producir productos del grupo G_2 puede ser igual a

$$R_3 = \max \{0, R_2 - C\} \quad (47)$$

Resumiendo:

R_1 la capacidad total requerida en periodos 2, ..., t para producción de productos del grupo G_1 , si los productos del grupo G_1 no son producidos en el periodo 1;

R_2 la capacidad total requerida en periodos 1, ..., t para producción de productos del grupo G_2 ;

R_3 la capacidad total requerida en periodos 2, ..., t para producción de productos del grupo G_2 ;

Así podemos definir

$(R_1 + R_3)$ La capacidad total requerida en periodos 2, ..., t para producir todos los productos, si los productos del grupo G_1 no son producidos en el periodo 1.

Los modelos arriba descritos han sido implementados en un caso de la industria real. Los datos disponibles para la simulación son dos años de datos de demanda (2007 y 2008) para 23 productos diferentes.

Dos alternativas diferentes se utilizan para producir pronósticos en estudios previos. Una aproximación es generar el error del pronóstico acorde a alguna distribución de probabilidad y añadirlo a la demanda actual. La otra es utilizar un modelo de pronóstico para hacer pronósticos sobre datos previos de demanda. En este caso se eligió utilizar la suavización exponencial como método de pronóstico, ya que no hay evidencia de tendencia y estacionalidad sobre los datos de demanda históricos. La Tabla 5 muestra los resultados de la simulación de los modelos CSM y FCSM de Tiacci y Saetta.

Tabla 5. Resultados de la simulación (Tiacci y Saetta, 2012).

| | CSM | | | | FCSM | | | |
|------------|----------------|---------------|----------------|------|----------------|---------------|----------------|------|
| | SC | HC | TC | %Cap | SC | HC | TC | %Cap |
| 1 | 19,047 | 1,957 | 21,004 | 99 | 19,047 | 1,957 | 21,004 | 99 |
| 2 | 12,764 | 4,852 | 17,616 | 92 | 10,850 | 5,335 | 16,185 | 99 |
| 3 | 12,273 | 4,897 | 17,170 | 67 | 4,833 | 5,331 | 10,163 | 64 |
| 4 | 12,159 | 4,654 | 16,813 | 89 | 7,260 | 4,850 | 12,110 | 87 |
| 5 | 12,197 | 6,901 | 19,098 | 96 | 8,537 | 6,024 | 14,561 | 85 |
| 6 | 12,055 | 6,839 | 18,894 | 75 | 12,944 | 4,536 | 17,480 | 58 |
| 7 | 9,655 | 6,554 | 16,209 | 77 | 7,855 | 4,546 | 12,401 | 82 |
| 8 | 4,195 | 5,685 | 9,879 | 33 | 1,762 | 3,407 | 5,168 | 30 |
| 9 | 11,521 | 6,432 | 17,953 | 87 | 10,260 | 5,313 | 15,574 | 99 |
| 10 | 12,977 | 6,701 | 19,678 | 81 | 4,194 | 4,305 | 8,500 | 68 |
| 11 | 9,050 | 5,232 | 14,282 | 49 | 9,235 | 5,068 | 14,304 | 71 |
| 12 | 7,331 | 5,459 | 12,791 | 56 | 6,027 | 6,790 | 12,818 | 72 |
| Tot | 135,224 | 66,162 | 201,386 | | 102,803 | 57,463 | 160,267 | |

El CSM estima costos futuros de cambios de máquina, tratando en este sentido de anticipar producciones y acumular inventarios para evitar excesivos cambios de máquina. Sin embargo, debido a la incertidumbre de la demanda, CSM falla para reducir costos totales debido a los ajustes frecuentes necesarios para ajustar inventarios a la demanda real.

Mediante la introducción de un mecanismo de congelación para el primer periodo del horizonte rodante de planeación, el FCSM demuestra su eficacia para generar los costos más bajos, a través de reducir considerablemente el número total de cambios de máquina con respecto al CSM. El resultado es obtenido a través de introducir una restricción condicional que preserva la habilidad para evitar faltantes de capacidad futuros si grandes cantidades de productos son ordenados en periodos anteriores. Este modelo permite extender el horizonte de planeación a muchos periodos sin sufrir el típico efecto de inestabilidad debido a la incertidumbre de la demanda.

Los modelos propuestos por Tiacci y Saetta (2012) resultan útiles ya que consideran restricciones y formulaciones tales como capacidad limitada de producción, no se permiten órdenes insatisfechas, el costo de mantener en inventario y el uso de pronósticos de demanda que podrían adecuarse al problema particular planteado. Se descartan los costos de preparación de máquina y la obtención de planes de producción.

Por otro lado, como caso práctico, Lee et al (1997) describe como los ejecutivos de logística de Procter & Gamble (P & G) examinaron los patrones de pedidos para uno de sus productos más vendidos, Pampers. Sus ventas en las tiendas de venta al por menor fueron fluctuantes, pero las variaciones no eran excesivas.

Sin embargo, al examinar los pedidos de los distribuidores, los ejecutivos se vieron sorprendidos por el grado de variabilidad. Cuando revisaron los pedidos de materiales a sus proveedores, descubrieron que los cambios eran aún mayores.

Mientras que los consumidores, en este caso, los bebés, consumen pañales a un ritmo constante, la variabilidad de la demanda de pedidos de la cadena de suministro se amplifica a medida que avanzaban en la cadena de suministro. P&G llama a este fenómeno el efecto "látigo". Se identificaron cuatro causas principales del efecto látigo que se detallan en la Tabla 6 con sugerencias para amortiguar este fenómeno.

En resumen, mediante la revisión del estado del arte se concluye que existen sistemas de gestión como la planeación de recursos empresariales; otras prácticas en sistemas estocásticos como el pre-recibo, programación de recibo y entrada directa a inventario; tecnologías de información como el RFID o códigos de barras así como sistemas de simulación que permiten un mayor grado de eficiencia en el control de inventarios. Se considera que la información en tiempo real contribuye a obtener un tamaño de lote óptimo bajo diferentes restricciones.

En lo concerniente al problema de tamaño de lote existen estudios recientes donde se plantean modelos que abarcan restricciones y/o características como materias primas que se deterioran fácilmente, inventario gestionado por el vendedor, restricciones de capacidad de almacén así como incertidumbre en la demanda y tiempos de entrega; de los cuales se obtiene información valiosa para el desarrollo de un modelo híbrido que incluya las características planteadas en el problema: demanda estocástica y dinámica con restricciones de espacio. Así mismo, se mostró un caso práctico donde se parte del entendimiento del comportamiento de la demanda para de esta forma analizar adecuadamente el origen de las fluctuaciones en los tamaños de lote y en las frecuencias de reposición.

El objetivo de todos los modelos es minimizar el costo total esperado que incluye costos de manufactura, costos por mantener en inventario y preparación de máquinas con restricciones de servicio al cliente. Esta información será de utilidad para el modelo a desarrollar.

Tabla 6. Coordinación de iniciativas en la cadena de suministro (Lee et al, 1997).

| Causas del efecto látigo | Comunicación de información | Alineación del canal | Eficiencia operacional |
|--|---|--|---|
| Actualización del pronóstico de demanda. | <ul style="list-style-type: none"> * Datos en el punto de venta. * Intercambio electrónico de información. * Internet. * Órdenes asistidas por computadora. | <ul style="list-style-type: none"> * Inventario administrado por el vendedor. * Descuento por compartir información. * Consumidor directo. | <ul style="list-style-type: none"> * Reducción del lead time. * Control de inventarios basado en eslabones. |
| Órdenes por lotes. | <ul style="list-style-type: none"> * Intercambio electrónico de datos. * Órdenes por internet. | <ul style="list-style-type: none"> * Descuento por clasificación de mercancías. * Entregas programadas. * Consolidación. * Outsourcing de logística. | <ul style="list-style-type: none"> * Comercio electrónico. * Órdenes asistidas por computadora. |
| Fluctuaciones en el precio. | | <ul style="list-style-type: none"> * Reaprovisionamiento Continuo. * Todos los días costo bajo. | <ul style="list-style-type: none"> * Todos los días precio bajo. |
| Juego por escasez. | <ul style="list-style-type: none"> * Compartir ventas, capacidad e información sobre inventarios. | <ul style="list-style-type: none"> * Asignación basada en ventas pasadas. | |

5. METODOLOGÍA PROPUESTA

De acuerdo a la literatura revisada es posible establecer un proceso para definir la programación de materiales a aplicar en el caso particular estocástico y dinámico, representado en el diagrama de flujo de la Figura 3.

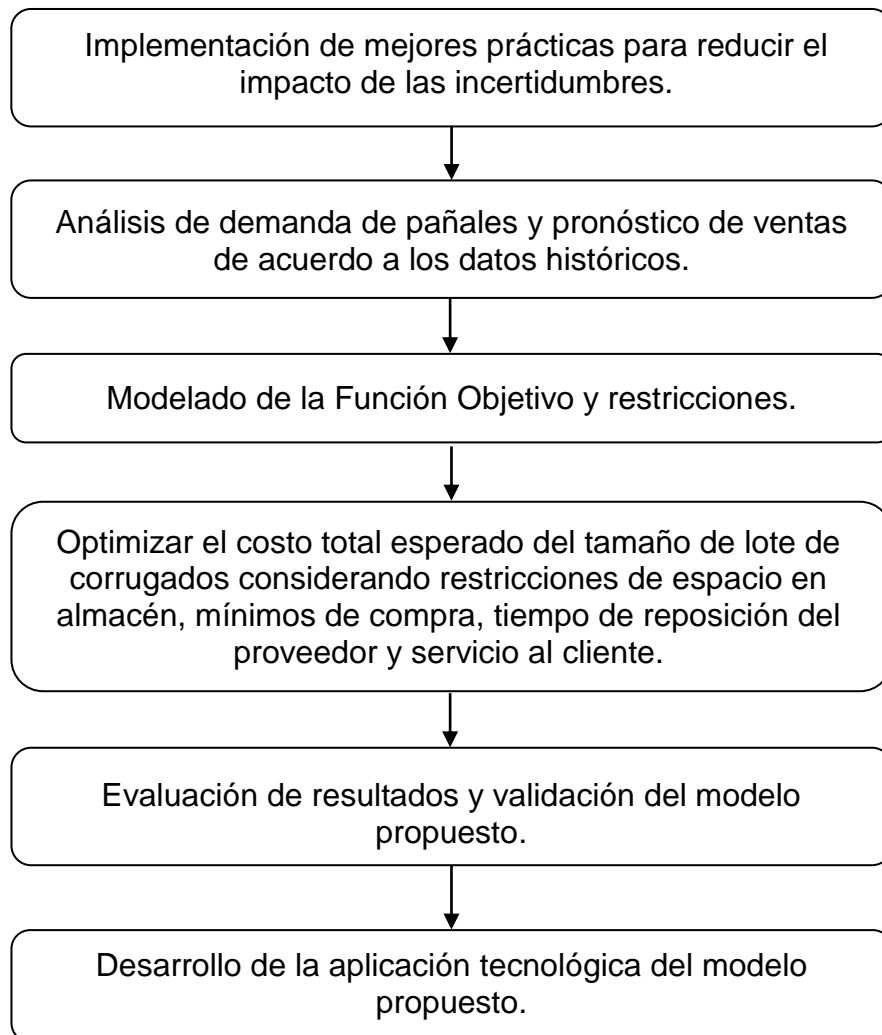


Figura 3. Diagrama de flujo de la metodología propuesta.

En la Figura 4 se muestra el diagrama que representa las entradas y salidas del sistema para la programación dinámica de materiales.

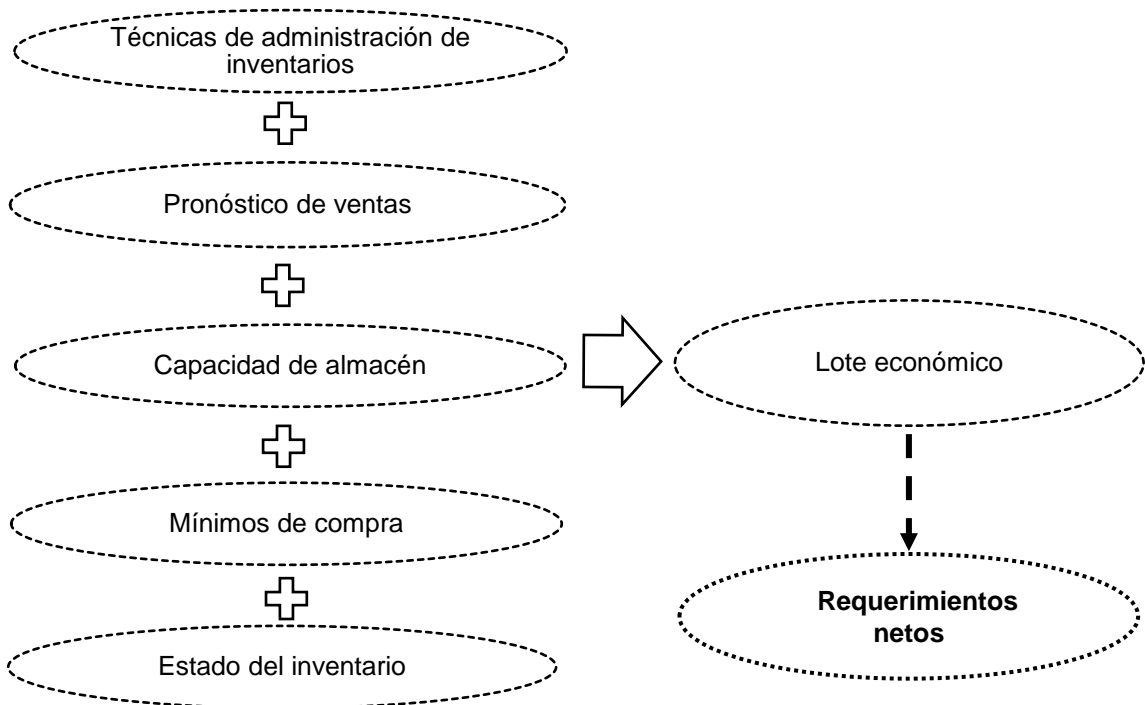


Figura 4. Entradas y salidas del sistema para la programación de materiales.

En la Figura 3 se generaliza un proceso para determinar la programación de materiales adecuada a casos particulares y en la Figura 4 se resume este proceso para el caso de estudio específico. En el apartado siguiente se describen a detalle las entradas y salidas del sistema del problema planteado, se determinaron siguiendo el proceso de programación de materiales.

6. IMPLEMENTACIÓN Y RESULTADOS

6.1 Implementación de mejores prácticas para reducir el impacto de las incertidumbres

En el caso de estudio particular de la empresa Kimberly Clark, se implementaron las siguientes prácticas con el objetivo de disminuir el impacto de la incertidumbre.

- Proceso de llegada: se implementó programación de recibo, pre recibo y comunicación.
- Proceso medular de servicio: se implementó entrada directa a inventario y área reservada para almacenamiento.
- Proceso de salida: se implementó contenedor de carga.
- Seguimiento a activos: un sistema de códigos de barras resultaría más eficiente que el actual seguimiento manual a activos que realiza la empresa Kimberly Clark.

6.2 Análisis de demanda de pañales y pronóstico de ventas de acuerdo a los datos históricos

En la Figura 5 se detalla gráficamente un ejemplo de la descomposición de la demanda de pañales de 5 años atrás para un tipo de pañal que fabrica la empresa Kimberly Clark, para el segmento de mercado medio-alto; la demanda se analizó considerando sus componentes de tendencia, efecto estacional y efecto aleatorio. La unidad de medida que se utilizó para la demanda es propia de la empresa mencionada y se modificaron los datos proporcionalmente para efectos de confidencialidad. Enseguida se evaluaron cuatro estrategias de pronóstico, donde el método de promedios móviles obtuvo errores de predicción más bajos; los resultados se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7. Evaluación de los modelos de pronóstico.

| | Suavización exponencial | Regresión lineal simple | Holt- Winters | Promedio Móvil |
|-------------|------------------------------------|------------------------------------|----------------------|---------------------------|
| MAPE | 20 | 19 | 11 | 10 |
| MAD | 5237 | 5052 | 3418 | 2839 |
| MSE | 42178196 | 39504079 | 22430030 | 13926521 |

El resumen del pronóstico de demanda para las claves de pañales de mayor venta de la empresa Kimberly Clark Planta Ramos Arizpe a través del modelo de promedios móviles se presenta en las Tablas 8, 9, 10 y 11.

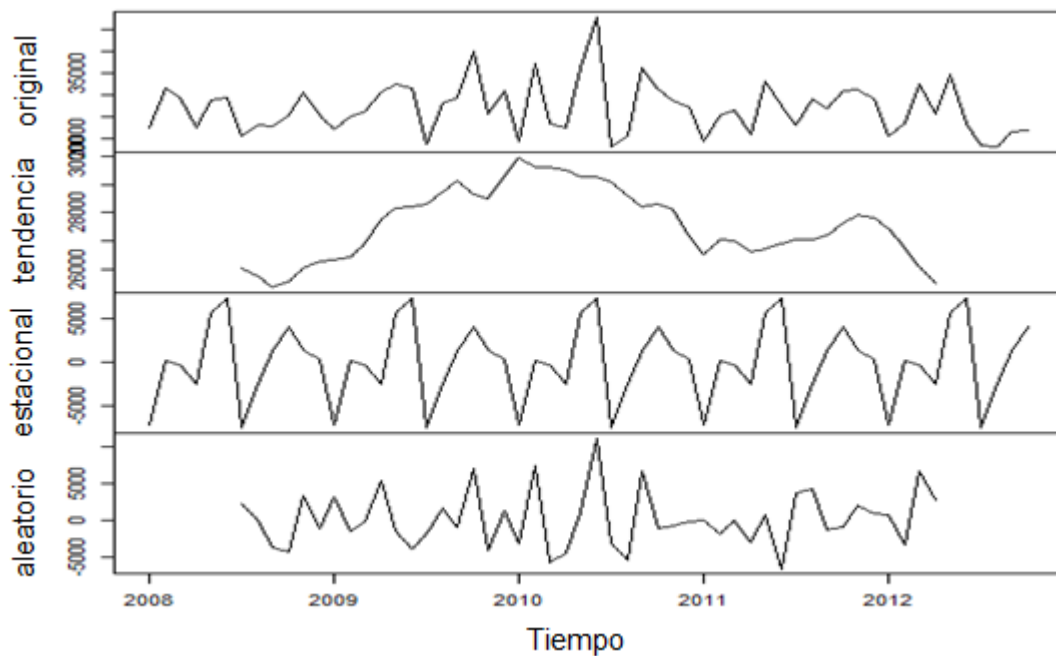


Figura 5. Descomposición de demanda.

La figura 5 denota la presencia de un patrón estacional semestral de demanda, tendencia decreciente y un efecto aleatorio que convierte a la serie de tiempo en estocástica; y es en este efecto aleatorio sobre el que se pronostica la demanda mostrada en las Tablas 8 a la 11.

Tabla 8. Pronóstico de ventas del mes de agosto.

| PRODUCTO | Estimado KCM | Ventas reales | Pronóstico | Diferencia contra pronóstico | Diferencia contra estimado KCM |
|----------|--------------|---------------|--------------|------------------------------|--------------------------------|
| ERN | 11,017 | 10,060 | 9,452 | 609 | 956 |
| E1 | 9,768 | 7,714 | 8,211 | 497 | 2,054 |
| E2 A | 13,388 | 12,229 | 11,963 | 267 | 1,159 |
| E2 B | 1,456 | 1,626 | 1,221 | 405 | 170 |
| E3O A | 13,136 | 9,689 | 9,266 | 423 | 3,447 |
| E3A A | 14,899 | 10,905 | 11,022 | 117 | 3,994 |
| E3O B | 2,192 | 1,129 | 1,440 | 311 | 1,063 |
| E3A B | 2,614 | 1,797 | 2,079 | 282 | 817 |
| E3O C | 1,962 | 1,704 | 1,590 | 114 | 258 |
| E3A C | 1,895 | 1,887 | 2,079 | 192 | 8 |
| E4O A | 23,681 | 19,193 | 18,149 | 1,044 | 4,488 |
| E4A A | 24,079 | 18,521 | 17,996 | 525 | 5,558 |
| E4O B | 1,212 | 4,366 | 4,272 | 94 | 3,155 |
| E4A B | 1,016 | 4,020 | 4,243 | 223 | 3,005 |
| E4O C | 3,031 | 4,521 | 3,668 | 854 | 1,491 |
| E4A C | 3,037 | 4,422 | 3,616 | 806 | 1,385 |
| E5O A | 25,009 | 19,860 | 18,755 | 1,105 | 5,149 |
| E5A A | 22,048 | 15,994 | 16,963 | 970 | 6,055 |
| E5O B | 2,930 | 4,856 | 4,599 | 258 | 1,926 |
| E5A B | 1,742 | 4,380 | 3,631 | 749 | 2,638 |
| E5O C | 2,772 | 5,331 | 4,083 | 1,248 | 2,559 |
| E5A C | 2,891 | 5,528 | 4,782 | 746 | 2,638 |
| E6O A | 32,583 | 19,826 | 18,253 | 1,573 | 12,757 |
| E6A A | 20,735 | 14,275 | 13,548 | 727 | 6,460 |
| E6O B | 3,820 | 3,730 | 4,252 | 522 | 90 |
| E6A B | 1,971 | 1,746 | 3,900 | 2,154 | 225 |
| | | | Total | 16,809 | 73,500 |

Tabla 9. Pronóstico de ventas del mes de septiembre.

| Producto | Estimado KCM | Ventas reales | Pronóstico | Diferencia contra pronóstico | Diferencia contra estimado KCM |
|----------|--------------|---------------|--------------|------------------------------|--------------------------------|
| ERN | 11,467 | 8,984 | 9,779 | 795 | 2,483 |
| E1 | 10,327 | 8,740 | 7,705 | 1,036 | 1,587 |
| E2 A | 14,486 | 13,864 | 11,256 | 2,608 | 622 |
| E2 B | 958 | 2,226 | 1,135 | 1,091 | 1,268 |
| E3O A | 14,731 | 10,050 | 8,299 | 1,751 | 4,681 |
| E3A A | 16,282 | 12,022 | 9,602 | 2,420 | 4,260 |
| E3O B | 2,122 | 726 | 1,048 | 322 | 1,396 |
| E3A B | 2,521 | 737 | 1,503 | 766 | 1,784 |
| E3O C | 915 | 3,118 | 1,203 | 1,916 | 2,203 |
| E3A C | 1,035 | 3,597 | 1,355 | 2,243 | 2,562 |
| E4O A | 25,257 | 18,014 | 16,881 | 1,133 | 7,243 |
| E4A A | 25,614 | 18,635 | 16,211 | 2,424 | 6,979 |
| E4O B | 2,932 | 3,449 | 4,053 | 604 | 517 |
| E4A B | 2,746 | 3,714 | 4,652 | 938 | 967 |
| E4O C | 1,998 | 5,565 | 3,780 | 1,785 | 3,567 |
| E4A C | 2,077 | 5,494 | 3,477 | 2,017 | 3,418 |
| E5O A | 26,052 | 18,153 | 17,757 | 396 | 7,898 |
| E5A A | 23,268 | 16,956 | 14,126 | 2,830 | 6,312 |
| E5O B | 2,516 | 4,681 | 5,000 | 318 | 2,165 |
| E5A B | 1,392 | 4,194 | 4,519 | 325 | 2,801 |
| E5O C | 2,167 | 6,164 | 5,268 | 897 | 3,997 |
| E5A C | 2,069 | 5,939 | 5,197 | 743 | 3,870 |
| E6O A | 30,674 | 18,949 | 17,753 | 1,197 | 11,725 |
| E6A A | 19,379 | 14,051 | 12,632 | 1,419 | 5,328 |
| E6O B | 3,260 | 5,571 | 6,169 | 597 | 2,312 |
| E6A B | 1,511 | 4,172 | 4,651 | 478 | 2,661 |
| | | | Total | 33,048 | 94,606 |

Tabla 10. Pronóstico de ventas del mes de octubre.

| Producto | Estimado KCM | Ventas reales | Pronóstico | Diferencia contra pronóstico | Diferencia contra estimado KCM |
|----------|--------------|---------------|--------------|------------------------------|--------------------------------|
| ERN | 11,696 | 10,895 | 9,591 | 1,305 | 801 |
| E1 | 10,378 | 9,127 | 8,319 | 808 | 1,251 |
| E2A | 13,918 | 12,261 | 13,080 | 819 | 1,657 |
| E2 B | 1,582 | 1,562 | 1,926 | 363 | 19 |
| E3O A | 13,494 | 10,089 | 9,736 | 353 | 3,405 |
| E3A A | 14,678 | 11,455 | 10,847 | 608 | 3,223 |
| E3O B | 2,122 | 1,279 | 928 | 351 | 843 |
| E3 A B | 2,521 | 1,797 | 1,242 | 555 | 723 |
| E3O C | 1,982 | 1,647 | 2,410 | 763 | 335 |
| E3A C | 2,482 | 1,712 | 2,742 | 1,030 | 771 |
| E4O A | 23,513 | 16,109 | 18,603 | 2,494 | 7,404 |
| E4A A | 23,837 | 16,620 | 18,629 | 2,008 | 7,216 |
| E4O B | 534 | 2,234 | 3,907 | 1,673 | 1,700 |
| E4A B | 512 | 2,027 | 3,867 | 1,841 | 1,514 |
| E4O C | 3,887 | 4,063 | 5,043 | 980 | 176 |
| E4A C | 4,038 | 4,167 | 4,958 | 791 | 129 |
| E5O A | 24,412 | 13,695 | 19,006 | 5,311 | 10,717 |
| E5A A | 21,821 | 12,559 | 16,475 | 3,916 | 9,262 |
| E5O C | 3,861 | 7,078 | 5,748 | 1,331 | 3,217 |
| E5A C | 3,534 | 6,922 | 5,734 | 1,188 | 3,388 |
| E6O A | 30,022 | 19,492 | 19,387 | 105 | 10,530 |
| E6A A | 18,660 | 13,669 | 14,163 | 493 | 4,991 |
| | | | Total | 29,086 | 73,271 |

Tabla 11. Pronóstico de ventas del mes de noviembre.

| Producto | Estimado KCM | Ventas reales | Pronóstico | Diferencia contra pronóstico | Diferencia contra estimado KCM |
|----------|--------------|---------------|--------------|------------------------------|--------------------------------|
| ERN | 12,284 | 11,607 | 9,940 | 1,668 | 677 |
| E1 | 10,835 | 10,628 | 8,972 | 1,656 | 207 |
| E2A | 13,977 | 14,233 | 13,063 | 1,170 | 256 |
| E2 B | 2,049 | 1,882 | 1,894 | 12 | 167 |
| E3O A | 13,361 | 10,798 | 10,070 | 728 | 2,563 |
| E3A A | 14,321 | 12,251 | 11,239 | 1,012 | 2,070 |
| E3O C | 2,581 | 1,969 | 2,383 | 413 | 612 |
| E3A C | 3,258 | 2,206 | 2,655 | 448 | 1,052 |
| E4O A | 23,204 | 15,904 | 17,062 | 1,157 | 7,300 |
| E4A A | 23,573 | 15,529 | 17,628 | 2,099 | 8,044 |
| E4O C | 5,069 | 3,844 | 4,814 | 970 | 1,225 |
| E4A C | 5,256 | 4,083 | 4,831 | 748 | 1,173 |
| E5O A | 23,990 | 16,057 | 15,924 | 133 | 7,932 |
| E5A A | 21,269 | 13,350 | 14,757 | 1,407 | 7,919 |
| E5O C | 5,017 | 5,578 | 6,621 | 1,043 | 560 |
| E5A C | 4,604 | 5,182 | 6,431 | 1,248 | 578 |
| E6O A | 30,585 | 20,759 | 19,221 | 1,539 | 9,826 |
| E6A A | 18,621 | 14,065 | 13,860 | 205 | 4,557 |
| | | | Total | 17,656 | 56,717 |

En las Tablas 8 a la 11 se muestra el comparativo del pronóstico de promedios móviles propuesto contra el estimado de ventas actual de la empresa Kimberly Clark que se tuvo en los meses de agosto, septiembre, octubre y noviembre del 2013, denotando una mejora en la predicción de 77.1%, 65%, 60.3% y 68.8% respectivamente.

En las Figuras 6 y 7 se ilustran gráficamente algunos de los pronósticos realizados por promedios móviles para las claves de mayor venta durante el mes de noviembre.

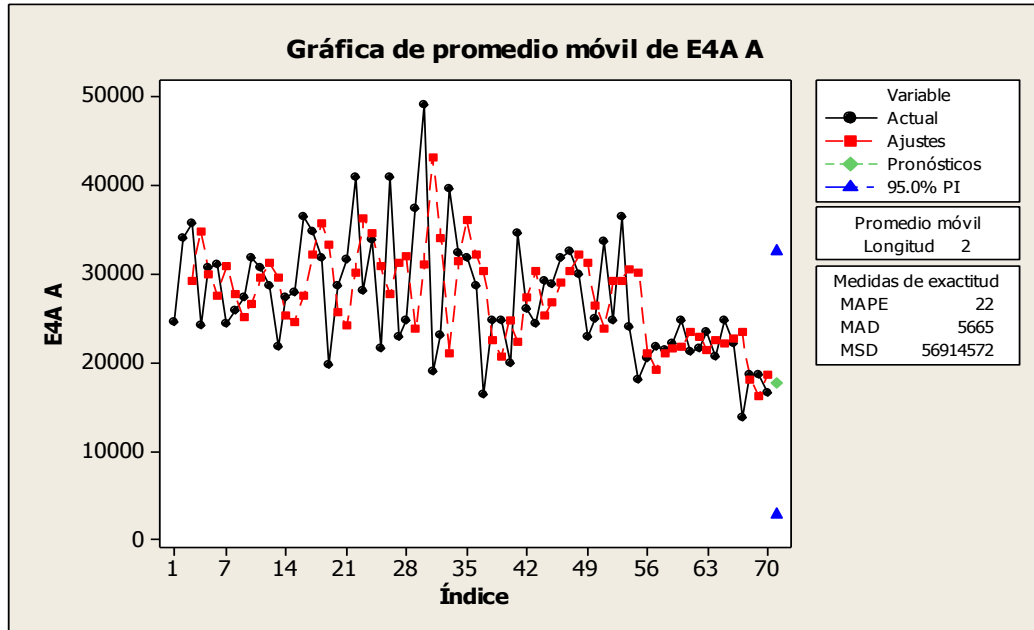


Figura 6. Gráfica del pronóstico de ventas del producto E4O A.

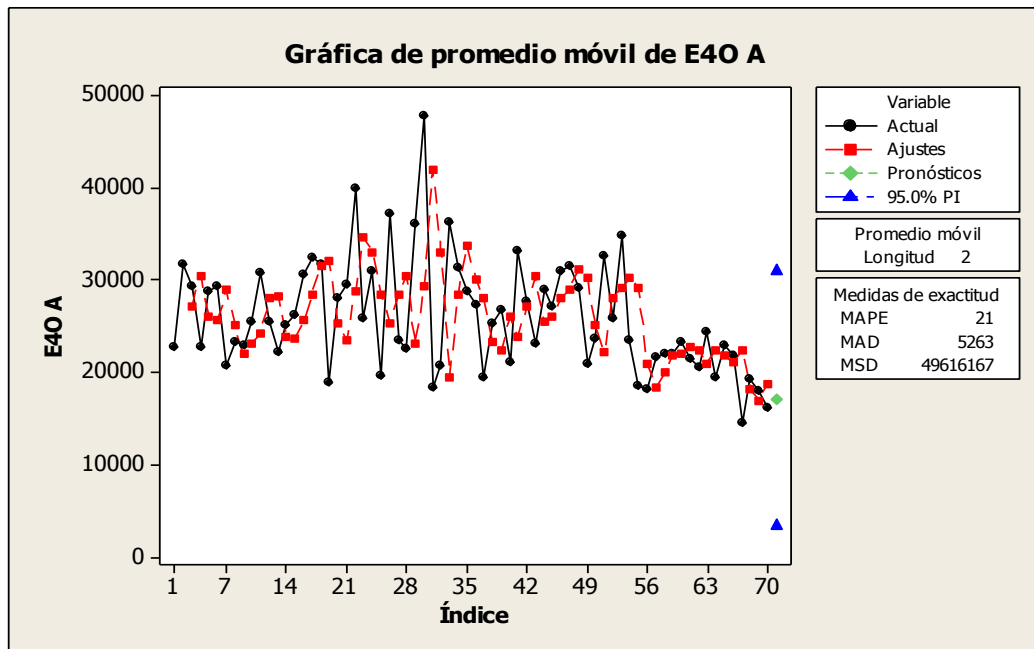


Figura 7. Gráfica del pronóstico de ventas del producto E4A A.

6.3 Modelado de la función objetivo y restricciones

El modelo de programación dinámica de materiales propuesto consiste en determinar la cantidad de materiales a ordenar considerando demanda estocástica, restricciones de espacio (ecuación 53) y mínimos de venta (ecuación 52), con el objetivo de minimizar la suma de costos de ordenar y de mantener en inventario (ecuación 48). La descripción matemática del modelo de tamaño de lote propuesto se describe enseguida.

Función objetivo:

$$\min C(Q_P) = \sum_{i=1}^P \sum_{t=1}^T h_{it} \frac{Q_{it}}{2} + \frac{K \lambda_{itneta}}{Q_{it}} \quad (48)$$

Donde:

$$S_{jt} = \sum_{j=1}^P \sum_{t=1}^T \left[A_{jt} * \left(\frac{I_{jt}}{P_{A_j}} \right) \right] \quad (49)$$

$$S_{Rest} = S_{Total} - S_{jt} \quad (50)$$

$$\lambda_{itneta} = \sum_{i=1}^P \sum_{t=1}^T \lambda_{it} - I_{it} \quad (51)$$

Restricciones:

- Mínimos de venta del proveedor

$$Q_{it} \geq Q_{i\text{proveedor}}^* \quad (52)$$

- Capacidad

$$\sum_{i=1}^P \sum_{t=1}^T \left[A_{it} * \left(\frac{Q_{it} + I_{it}}{P_{A_i}} \right) \right] \leq S_{Rest} \quad (53)$$

- No negatividad

$$\begin{aligned} Q_{it} \geq 0, \quad I_{it} \geq 0, \quad I_{jt} \geq 0, \quad \lambda_{it} \geq 0, \quad \lambda_{it\text{neto}} \geq 0, \quad K_{it} \geq 0, \quad h_{it} \geq 0, \\ S_{\text{total}} \geq 0, \quad S_{\text{Rest}} \geq 0, \quad S_{jt} \geq 0, \quad A_{jt} \geq 0, \quad A_{it} \geq 0, \quad P_{A_i} \geq 0, \quad P_{A_j} \geq 0 \end{aligned} \quad (54)$$

Note que:

$\frac{I_{jt}}{P_{A_j}}$ y $\left(\frac{Q_{it}+I_{it}}{P_{A_i}}\right)$ Será redondeado al entero inmediato superior.

Índices y parámetros:

- $t = 1, 2, \dots, t$ periodos.
- $i = 1, 2, \dots, P$ productos a ordenar en el periodo en curso.
- $j = 1, 2, \dots, P$ productos en inventario que no se ordenarán en el periodo en curso.

Variables:

- Q_{it} : tamaño de lote de los productos i a ordenar en el tiempo t .
- $Q_{i\text{proveedor}}^*$: tamaño de lote mínimo aceptado por el proveedor.
- I_{it} : Inventario del producto i a ordenar en el tiempo t .
- I_{jt} : Inventario del producto j que no se ordenarán en el tiempo t .
- h_{it} : costo de mantener en inventario los productos i en el tiempo t .
- $\lambda_{it\text{neto}}$: productos i en el tiempo t netos a ordenar.
- λ_{it} : demanda de los productos i en el tiempo t .
- S_{jt} : espacio que ocupa los productos j en el almacén que no se ordenarán en el tiempo t .
- A_{jt} : espacio definido por línea que ocupan los productos j en el almacén que no se ordenarán en el tiempo t .
- A_{it} : espacio definido por línea que ocupa los productos i en el almacén que se ordenarán en el tiempo t .

- P_{A_j} : Productos j que no se ordenarán en el tiempo t que caben por línea de estiba en el almacén A_{jt} .
- P_{A_i} : Productos i a ordenar en el tiempo t que caben por línea de estiba en el almacén A_{it} .
- K : Costo fijo de ordenar
- S_{total} : Capacidad total en almacén.
- S_{Rest} : Capacidad restante en almacén para los productos i a ordenar.

6.4 Optimizar el costo total esperado del tamaño de lote de corrugados, evaluación de resultados y validación del modelo propuesto

Para el caso particular se consideraron en la fase experimental las claves de mayor venta de la empresa Kimberly Clark para un solo tipo de material (corrugados), considerado el más susceptible a tornarse obsoleto y el que ocupa mayor espacio en almacén.

Para resolver el problema planteado a través del modelo descrito en el punto anterior, se utilizó el método simplex mediante la aplicación SOLVER de Microsoft EXCEL. En la tabla 12 se resumen los datos de entrada al comienzo del mes de octubre del 2013 (tiempo i), mes en que se realizó la fase experimental del modelo propuesto, y el tamaño de lote obtenido que satisface las restricciones establecidas. En este resumen se evidencia que el modelo propuesto satisface la demanda y minimiza el inventario en almacén. Note que el promedio de tamaño de lote resultante es 40% menor al que se obtiene con el método empírico utilizado actualmente la empresa Kimberly Clark.

Por otro lado, se desarrolló una aplicación en EXCEL que enlaza los requerimientos netos de corrugado y el inventario inicial de corrugado con la producción programada en el tiempo t (en días) para definir el espacio total ocupado en el momento t . Esto es, se suma el requerimiento neto diario de corrugado y el inventario actual del día en cuestión y se resta el equivalente en corrugados de la producción programada.

Consecuentemente, a través de la restricción del espacio se define si se sobrepasa el espacio o si la programación fue eficiente. Así mismo, la aplicación envía alertas cuando la programación de corrugados no permite cumplir con la producción planeada.

Tabla 12. Resumen de datos de entrada al modelo y el tamaño de lote resultante.

| Producto | Pronóstico | Inventario Inicial | Demanda neta | Tamaño de lote del modelo propuesto | Tamaño de lote con el método actual |
|-----------------|-------------------|---------------------------|---------------------|--|--|
| ERN | 9,591 | 4,300 | 5,291 | 6,000 | 6,000 |
| E1 | 8,319 | 8,500 | 0 | 0 | 7,000 |
| E2A | 13,080 | 5,960 | 7,120 | 7,120 | 0 |
| E2 B | 1,926 | 2,850 | 0 | 0 | 0 |
| E3O A | 9,736 | 15,350 | 0 | 0 | 9,000 |
| E3A A | 10,847 | 17,960 | 0 | 0 | 10,000 |
| E3O B | 928 | 1,000 | 0 | 0 | 0 |
| E3 A B | 1,242 | 2,738 | 0 | 0 | 0 |
| E3O C | 2,410 | 4,800 | 0 | 0 | 0 |
| E3A C | 2,742 | 4,550 | 0 | 0 | 3,000 |
| E4O A | 18,603 | 15,755 | 2,848 | 6,000 | 0 |
| E4A A | 18,629 | 1,450 | 17,179 | 6,000 | 7,000 |
| E4O B | 3,907 | 200 | 3,707 | 6,000 | 0 |
| E4A B | 3,867 | 1,350 | 2,517 | 6,000 | 0 |
| E4O C | 5,043 | 2,170 | 2,873 | 6,000 | 10,000 |
| E4A C | 4,958 | 716 | 4,242 | 6,000 | 11,000 |
| E5O A | 19,006 | 19,240 | 0 | 0 | 9,000 |
| E5A A | 16,475 | 21,425 | 0 | 0 | 9,000 |
| E5O C | 5,748 | 3,180 | 2,568 | 6,000 | 0 |
| E5A C | 5,734 | 625 | 5,109 | 6,000 | 0 |
| E6O A | 19,387 | 2,800 | 16,587 | 6,000 | 0 |
| E6A A | 14,163 | 3,510 | 10,653 | 6,000 | 0 |
| | | | Promedio | 3,324 | 5,400 |

A través del soporte de esta aplicación, con el uso de la restricción de espacio formulada, fue posible reducir en promedio 25% los sobreinventarios en almacén y 98% los faltantes de corrugado debido a una planeación incorrecta, logrando con esto cumplir con la producción deseada. En los Anexos 1 al 4 se muestran imágenes de los datos que arrojó dicha aplicación en EXCEL utilizando el tamaño de lote obtenido con el modelo propuesto y el tamaño de lote empírico que definió el planeador de la empresa Kimberly Clark, siguiendo el proceso descrito en la Figura 2 para el mes de octubre del 2013. Los resultados comparativos justifican los porcentajes de reducción de sobreinventarios y faltantes de corrugados antes mencionados.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los modelos de programación de inventarios y los sistemas de administración de almacenes con el soporte de tecnologías de información, permiten a las empresas mejorar su competitividad a través de la reducción de desperdicios tales como sobre inventarios, tiempos muertos debido a falta de materiales, espera, obsolescencia, entre otros; así como la mejora del servicio al cliente permitiendo entregar las órdenes en tiempo y forma. En la empresa Kimberly Clark se implementaron técnicas para mejorar la administración de inventarios tales como programación de recibo, pre-recibo y comunicación, entrada directa a inventario, área reservada para almacenamiento y contenedor de carga encontrándose aún pendiente la implementación del sistema de códigos de barras para el seguimiento de activos.

A través de la revisión de la literatura sobre los modelos de programación, fue posible definir las variables de entrada que deben considerarse para problemas específicos como el caso de estudio de la empresa Kimberly Clark; entre las que destacan el pronóstico de ventas, el estado del inventario y algunas restricciones. El modelo propuesto de tamaño de lote abarca las restricciones de capacidad de almacenamiento, servicio al cliente y mínimos de venta del proveedor, con lo cual fue posible satisfacer los requerimientos de la empresa, mejorando la exactitud del pronóstico de ventas un 68% en promedio.

Por otro lado, con la aplicación desarrollada en EXCEL para apoyar la programación de corrugado, fue posible reducir en el mes de octubre del 2013 en 98% los faltantes y 25% los sobreinventarios en almacén de esta materia prima, lo que conlleva esto último a reducir los costos de almacenaje en un 27.3%. Así mismo, al contar de esta forma con mayor espacio disponible en almacén, se logró reducir los costos por daños a materiales en un 54%.

Resta evaluar la reducción de costos de obsolescencia para el segundo trimestre del 2014, fecha en que se tiene programado el primer cambio al diseño de este año.

Dados los resultados obtenidos mediante la implementación de la metodología propuesta para la programación dinámica de materiales con demanda estocástica y restricciones de espacio en un caso práctico, se acepta la hipótesis planteada ya que fue posible determinar el nivel adecuado de inventario de corrugados y minimizar los faltantes.

Como trabajo futuro se sugiere evaluar el modelo de tamaño de lote propuesto al resto de los materiales que se ocupan en la empresa Kimberly Clark y adecuarlo a una aplicación de software para extender los beneficios logrados.

Así mismo, se propone aplicarlo a casos de estudio de otras empresas con diferentes datos de entrada para analizar nuevas restricciones o variables que aplicasen.

8. BIBLIOGRAFÍA

Aichlmayr, Mary, 2002. Training ensures WMS results. *Transportation & Distribution*, Vol. 43, No. 10, pp. 52-57.

Buker, David-W. *Logistics and Distribution*, 2004. *The Buker Group Altamonte Springs, Florida*, pp 10.87-10.110.

Errasti, Ander; Chackelson, Claudia y Arcelus, Mikel, 2010. Estado del arte y retos para la mejora de sistemas de preparación en almacenes-Estudio Delphi. *Dirección y Organización*, Núm. 40, I ISSN: 1132-175X.

Forrester, J., 1961. *Industrial Dynamics*. MIT Press, Cambridge, MA.

García-Sánchez, Noé y Pérez-Bernal, Luis-E, 2007. Determination of critical success factors in implementing an ERP system: A Field Study in Mexican Enterprises View From Practice. *Information Technology for Development*, Vol. 13.

Gong, Yeming y de Koster-Rene, B. M., 2011. A review on stochastic models and analysis of warehouse operations. *Logistics research* Vol. 3, No. 4. pp. 191-205.

Graves, S. C.; Rinnoy, A. H. G. y Zipkin, P.H., 2005. *Logistics of production and inventory*. ELSIEVER. Vol. 4, pp 6-9.

Herrera, A.; Rivera, G. y Cruz, E., 2008. Propuesta metodológica para administrar conocimientos durante los proyectos ERP, *Revue internationale de projectique*. Vol. 1, no. 0, pp. 41-54.

Howitz, Carsten, 2010. *Warehouse Management Systems* SimCrest, Inc. Dallas, Texas, USA.

Lee, Hau, Padmanabhan, V, Whang, Seungjin, 1997. The Bullwhip Effect in Supply Chains. Sloan management review/spring.

Louly, Mohamed-Aly y Dolgui, Alexandre, 2011. Optimal MRP parameters for a single item inventory with random replenishment lead time, POQ policy and service level constraint. International Journal of Production Economics (2011).

KCM, 2013. http://www.kimberly-clark.com.mx/Empresa/KCM_hoy.asp

Ouyang, Yanfeng y Li, Xiaopeng, 2010. The bullwhip effect in supply chain networks. European Journal of Operational Research 201 (2010) 799–810

Mascareñas, Juan, 2008. Procesos estocásticos: Introducción. ISSN: 1988-1878.

Minner, Stefan, 2009. A comparison of simple heuristics for multi-product dynamic demand lot-sizing with limited warehouse capacity. Int. J. Production Economics 118 pp 305–310.

Marek, Richard; Elkins, DA y Smith, DR, 2001. Manufacturing controls: understanding the fundamentals of Kanban and CONWIP pull systems using simulation, Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference.

Monk, E. y Wagner, B., 2006. Concepts in Enterprise Resource Planning, Segunda edición, Editor Mac Mendelsohn.

Porteus, Evan L, 2002. Foundations of Stochastic Inventory Theory. Stanford University Press.

Wong, Jui-Tsung; Su, Chwen-Tzeng y Wang, Chun-Hsien, 2011. Stochastic dynamic lot-sizing problem using bi-level programming base on artificial intelligence techniques. Applied Mathematical Modelling 36 pp 2003–2016.

Zhou, Shouqin; Ling, Weiqing y Peng, Zhongxiao, 2006. An RFID-based remote monitoring system for enterprise internal production management.

ANEXO 1

**Programación de corrugados considerando el tamaño de lote del modelo
propuesto.**

ANEXO 2

Inventario diario aplicando el tamaño de lote del modelo propuesto.

ANEXO 3

Programación de corrugados considerando el tamaño de lote definido por el proceso empírico actual.

ANEXO 4

Inventario diario aplicando el tamaño de lote definido por el proceso empírico actual.