



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA DE SISTEMAS – INVESTIGACIÓN DE OPERACIONES

**METODOLOGÍA PARA LA PLANEACIÓN DE LA PRODUCCIÓN
UTILIZANDO SIMULACIÓN Y PROGRAMACIÓN ENTERA**

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
JORGE ANDRÉS GARCÍA HERNÁNDEZ

TUTOR:
DRA. IDALIA FLORES DE LA MOTA
FACULTAD DE INGENIERÍA

MÉXICO, D. F. MARZO, 2013

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Juan Manuel Estrada Medina
Secretario: Dra. Hérica Sánchez Larios
Vocal: Dra. Idalia Flores de la Mota
1^{er.} Suplente: M. I. Ann Godelieve Wellens Purnal
2^{do.} Suplente: Dra. Esther Segura Pérez

Lugar donde se realizó la tesis: México, Distrito Federal

TUTOR DE TESIS:

Dra. Idalia Flores de la Mota



FIRMA

Dedicado a mi mamá.

AGRADECIMIENTOS

La vida es un camino que adquiere significado sólo al andar en él.
Después el significado se convierte en el camino a seguir.

A la *Universidad Nacional Autónoma de México* por darme la oportunidad de estudiar en uno de sus programas de posgrado. Principalmente, agradecer la diversidad de actividades culturales, deportivas, recreativas, académicas y de vinculación que ofrece a su comunidad. Desde ahora soy un orgulloso egresado de la UNAM.

Al Ing. Carlos Careaga de la Garza por la motivación que para mí significó la resolución de los problemas de su libro electrónico. A tres años desde entonces, puedo decir que constituyeron señales para descubrir mi verdadera vocación.

A la Dra. Idalia por haber promovido, en los que tuvimos el gusto de ser sus alumnos, la realización de actividades escolares y extraescolares. Estas últimas, las más importantes porque se refieren a formas visibles de creatividad, la auténtica *sal de la vida*. También, agradecer el aliento para la fijación de metas más elevadas y el impulso para lograrlas.

A los profesores con los que tuve el gusto de tomar clase. El conocimiento más valioso que pude obtener de ellos fue siempre extracurricular.

A los profesores revisores de esta tesis porque son coproductores de la misma. Cualquier mérito es debido a ellos. Cualquier error, ausencia o inconsistencia es responsabilidad mía.

A mis compañeros de investigación de operaciones y de otros campos. Creo que aprendí algo diferente de cada uno de ellos. Así como sólo es posible ver la imagen de uno mismo a través de una superficie reflejante, el ser humano sólo puede llegar a conocerse a través de las respuestas que provoca en los demás. Ahora que las trayectorias divergen, les deseo éxito en todo lo que emprendan.

Al CONACYT por el apoyo económico que hizo posible la realización de mis estudios.

Al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica de la UNAM por la beca recibida para la elaboración de la tesis. <<PAPIIT IN-116012>>
<<Simulación y optimización de sistemas logísticos y de manufactura>>

RESUMEN

En el presente trabajo se propuso una forma de planear y controlar la producción a través del uso de modelos cuantitativos que faciliten la toma de decisiones. La metodología propuesta es la siguiente: 1. *Pronósticos y pedidos*; se utiliza un modelo de serie de tiempo para estimar la demanda de productos. 2. *Capacidad de la planta*; a través de un modelo de simulación se determina si el sistema actual tiene la capacidad suficiente para cubrir la combinación de productos de la demanda estimada. 3. *Plan de producción*; una vez que se determinó la demanda y la capacidad, se utiliza un programa entero para establecer la cantidad a producir, a almacenar y la demanda insatisfecha para un horizonte considerado. 4. *Control de la producción*; a través del uso de un indicador se mide la producción semanal para asegurar el cumplimiento del plan, se activa una reprogramación cuando éste se vuelve infactible. 5. *Control del entorno*; a través del uso de un indicador se mide el comportamiento de la demanda, para asegurar que esté de acuerdo a lo estimado, en caso de que no, se activa una reprogramación. Se realizó un caso de estudio en una empresa que pertenece al sector de cuero y calzado.

ABSTRACT

In this paper we proposed a way to plan and control production through the use of quantitative models to facilitate decision-making. The proposed methodology is the following: 1. *Forecasts and orders*, using a time series model to estimate demand for products. 2. *Plant's capacity*, through a simulation model that determines whether the current system has sufficient capacity to meet the product mix of estimated demand. 3. *Production plan*, once it was determined the demand and capacity, an integer program is used to establish the amount to produce, store and unmet demand for a specific horizon. 4. *Production control*, through the use of an indicator that measure production weekly and ensure compliance with the plan, reprogramming is activated when it becomes infeasible. 5. *Environment control*, through the use of an indicator that measures the behavior of the demand and ensures compliance with the estimate, if not a rescheduling is activated. We conducted a case study in a company belonging to the leather and footwear sector.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	i
PROBLEMA.....	iv
PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN.....	iv
OBJETIVO GENERAL.....	v
<i>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</i>	v
JUSTIFICACIÓN.....	v
ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN.....	v
DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.....	vi
DESCRIPCIÓN DE CAPÍTULOS.....	vi
CAPÍTULO I. PLANEACIÓN DE LA PRODUCCIÓN.....	2
1.1 PLANEACIÓN DE LA CAPACIDAD.....	4
1.2 PLANEACIÓN AGREGADA.....	8
1.3 PROGRAMACIÓN MAESTRA.....	11
1.4 PROGRAMACIÓN Y CONTROL.....	15
CAPÍTULO II. PROGRAMACIÓN ENTERA.....	20
2.1 INTRODUCCIÓN.....	20
2.2 MODELOS TIPO DE PLANEACIÓN DE LA PRODUCCIÓN.....	21
2.3 COMPLEJIDAD COMPUTACIONAL.....	26
2.3.1 ALGORITMO SÍMPLEX.....	27
2.3.2 PROGRAMACIÓN ENTERA.....	29
2.4 ALGORITMOS DE SOLUCIÓN EXACTOS.....	29
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA PROPUESTA.....	38
3.1 PRONÓSTICO & PEDIDOS.....	39
3.1.1 OBJETIVO.....	39
3.1.2 DESCRIPCIÓN.....	39
3.1.3 HERRAMIENTA.....	39
3.1.4 ENTRADAS.....	39
3.1.5 SALIDAS.....	39
3.2 CAPACIDAD DE LA PLANTA.....	40
3.2.1 OBJETIVO.....	40
3.2.2 DESCRIPCIÓN.....	40
3.2.3 HERRAMIENTA.....	40
3.2.4 ENTRADAS.....	40
3.2.5 SALIDAS.....	41
3.3 PLAN DE PRODUCCIÓN.....	41
3.3.1 OBJETIVO.....	41
3.3.2 DESCRIPCIÓN.....	41
3.3.3 HERRAMIENTA.....	41
3.3.4 ENTRADAS.....	42

3.3.5 SALIDAS.....	42
3.4 CONTROL DE PRODUCCIÓN	42
3.4.1 OBJETIVO	42
3.4.2 DESCRIPCIÓN.....	42
3.4.3 HERRAMIENTA	42
3.4.4 ENTRADAS.....	43
3.4.5 SALIDAS.....	43
3.5 CONTROL DEL ENTORNO	43
3.5.1 OBJETIVO	43
3.5.2 DESCRIPCIÓN.....	43
3.5.3 HERRAMIENTA	44
3.5.4 ENTRADAS.....	44
3.5.5 SALIDAS.....	44
CAPÍTULO IV. CASO DE ESTUDIO	46
4.1 GENERALIDADES DE LA EMPRESA	46
4.1.1 ANTECEDENTES	47
4.1.2 PRODUCTOS	47
4.1.3 MAQUINARIA	48
4.1.4 PROVEEDORES Y CLIENTES.....	48
4.2 PROBLEMÁTICA	49
4.3 SOLUCIÓN PROPUESTA.....	50
4.3.1 JUSTIFICACIÓN.....	50
4.3.2 ALCANCE	51
4.3.3 PROPUESTA.....	51
4.4 PROCESO DE PRODUCCIÓN.....	53
4.4.1 OPERACIONES DE PRODUCCIÓN.....	53
CAPÍTULO V. SERIE DE TIEMPO Y SIMULACIÓN	57
5.1 MODELO DE SERIE DE TIEMPO	57
5.1.1 SUPUESTOS	57
5.1.2 PROCEDIMIENTO	57
5.1.3 FORMULACIÓN.....	61
5.1.4 RESULTADOS	61
5.2 MODELO DE SIMULACIÓN.....	62
5.2.1 SUPUESTOS	63
5.2.2 PROCEDIMIENTO	63
5.2.3 FORMULACIÓN.....	69
5.2.4 RESULTADOS	70
CAPÍTULO VI. PROGRAMA ENTERO E INDICADORES	75
6.1 PROGRAMA ENTERO.....	75
6.1.1 SUPUESTOS	75
6.1.2 PROCEDIMIENTO	75
6.1.3 FORMULACIÓN.....	80
6.1.4 RESULTADOS	80
6.2 INDICADORES	82

6.2.1 CONTROL DE PRODUCCIÓN.....	82
6.2.2 CONTROL DEL ENTORNO.....	83
CONCLUSIONES	86
BIBLIOGRAFÍA.....	90
APÉNDICE A.....	92
APÉNDICE B	95

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Métodos de pronóstico más comunes.	6
Tabla 1.2 Decisiones sobre planeación agregada.	10
Tabla 1.3 Ejemplos de actividades a programar.	16
Tabla 1.4 Enfoque de programación en relación al tipo de proceso.	17
Tabla 2.1 Aplicaciones de la programación entera.	21
Tabla 4.1 Operaciones de producción del modelo PA/01.	54
Tabla 5.1 Medidas de error en los modelos de serie de tiempo.	59
Tabla 5.2 Resultados estadísticos de las medidas de error en la simulación de 100 periodos.	60
Tabla 5.3 Pronóstico de ventas.	61
Tabla 5.4 Estimación de ventas.	62
Tabla 5.5 Tiempos de operación.	65
Tabla 5.6 Comportamiento estadístico de la producción en un turno.	70
Tabla 5.7 Valores estadísticos de la utilidad mensual.	73
Tabla 6.1 Parámetros del modelo.	76
Tabla 6.2 Solución óptima.	81
Tabla 6.3 Producción mínima semanal.	83
Tabla 6.4 Intervalo permitido de ventas semanales.	84

ÍNDICE DE FIGURAS Y GRÁFICAS

Fig. 1.1 Relaciones del sistema de producción.	2
Fig. 1.2 Importancia de la planeación de la producción.	3
Fig. 1.3 Ubicación de cada etapa de la planeación de la producción.	4
Fig. 1.4 Proceso de la planeación de la capacidad.	5
Fig. 1.5 Costos unitarios con relación al tamaño de la instalación.	7
Fig. 1.6 Relaciones de la planeación agregada.	9
Fig. 1.7 Diagrama de actividades de la programación maestra.	12
Fig. 1.8 Árbol de estructura de producto e inventario de seguridad.	14
Fig. 1.9 Tipos de cargas de trabajo.	16
Fig. 2.1 Ilustración para el caso de $n=2$.	28
Fig. 2.2 Árbol de ramificación y acotamiento.	34
Fig. 3.1 Metodología propuesta de planeación de la producción.	38
Fig. 4.1 Domicilio de la empresa.	46
Fig. 4.2 Gama de productos.	47
Fig. 4.3 Actividades de transformación.	48
Fig. 4.4 Problemática de la empresa.	50
Fig. 4.5 Modelo de zapato de descanso seleccionado.	51
Fig. 4.6 Metodología propuesta de planeación de la producción.	53
Fig. 4.7 Diagrama de las operaciones de producción.	55
Gráfica 5.1 Ventas semanales y pronóstico de ventas.	58
Fig. 5.1 Corridas de simulación realizadas en Excel.	61
Fig. 5.2 Modelo de simulación en Simio.	64
Fig. 5.3 Diagrama de flujo de la simulación.	69
Gráfica 5.2 Distribución de frecuencias de la producción.	70
Gráfica 5.3 Porcentaje de utilización promedio de cada operación/máquina.	71
Gráfica 5.4 Cantidad promedio de materia prima en línea de espera.	71
Fig. 6.1 Matriz asociada al programa entero.	79
Fig. 6.2 Reporte sumario de la solución obtenida.	81
Fig. 6.3 Pantalla de Excel con la solución óptima.	82

TABLA DE SÍMBOLOS

SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN	MODELO
a	Porcentaje de producción mínimo alcanzado en el periodo.	Indicador de producción
b	Porcentaje de desviación de la demanda permitido.	Indicador de demanda
c	Parámetro seleccionado en la suavización exponencial.	Serie de tiempo
d_i	Demanda real en la semana i .	Simulación
\bar{d}	Promedio de la demanda real.	Simulación
$E(X)$	Valor esperado de la producción en una semana.	Simulación
$V(X)$	Varianza de la producción en una semana.	Simulación
μ	Media de la producción semanal.	Prueba de hipótesis
α	Nivel de significancia.	Prueba de hipótesis
\bar{x}	Media muestral de producción.	Prueba de hipótesis
Y	Utilidad mensual.	Función de utilidades
$V(Y)$	Varianza de la utilidad mensual.	Función de utilidades
ρ	Utilidad unitaria.	Función de utilidades
ϕ	Cantidad de días laborados en un mes.	Función de utilidades
ψ	Costo fijo mensual.	Función de utilidades
x_i	Cantidad producida en la semana i en tiempo normal.	Programa entero
x'_i	Cantidad producida en la semana i en tiempo extra.	Programa entero
y_i	Cantidad almacenada en la semana i .	Programa entero
w_i	Cantidad de demanda insatisfecha en la semana i .	Programa entero
α	Costo unitario de producción en tiempo normal.	Programa entero
β	Costo unitario de producción en tiempo extra.	Programa entero
γ	Costo unitario de almacenar.	Programa entero
δ	Costo unitario por no tener producto (perder una venta).	Programa entero
d_i	Demanda estimada de producto en la semana i .	Programa entero
ε	Cantidad máxima de producto que es posible almacenar en una semana.	Programa entero
ζ	Cantidad mínima de producto que debe haber en existencia entre semanas.	Programa entero
μ	Capacidad de producción en tiempo normal en una semana.	Programa entero
λ	Cantidad máxima de producción en tiempo extra en una semana.	Programa entero
x_i	Tasa de salida de la operación i .	Inversión en capacidad
w_i	Cantidad de máquinas adicionales invertidas en la operación i .	Inversión en capacidad
a_i	Capacidad máxima de salida por máquina de la operación i .	Inversión en capacidad
p	Cantidad de producción mínima requerida.	Inversión en capacidad
c_i	Costo unitario de adquisición de una máquina en operación i .	Inversión en capacidad
d	Desviación relativa permitida en la tasa de salida de la operación i .	Inversión en capacidad
b	Presupuesto máximo de inversión.	Inversión en capacidad

INTRODUCCIÓN

Buscando el bien de nuestros semejantes, encontramos el nuestro.
Platón

El sector de la Pequeña y Mediana Empresa (PyME) es muy importante para la economía del país, de acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI, 2009), representa el 99.8% de los negocios, genera el 73% de los empleos y produce aproximadamente el 35% del Producto Interno Bruto.

Los principales problemas que enfrenta la empresa PyME se relacionan con la dificultad en el acceso a financiamiento, bajos niveles de productividad y la necesidad de especialización en la producción.

En el presente trabajo se propone una metodología que sirva de herramienta para incrementar la productividad en una empresa PyME, a través del uso de métodos cuantitativos que optimicen el funcionamiento del sistema de producción.

No obstante, en un entorno dinámico y complejo la optimización no es suficiente. Se requiere una capacidad de respuesta rápida para adecuarse a los cambios en el entorno, es decir, un comportamiento adaptativo (Gershenson, 2007). Es por ello que la metodología propuesta es un intento de combinar el enfoque de optimización (la mejor configuración del sistema) con un enfoque adaptativo (configuración dinámica).

Un sistema es un conjunto interrelacionado de elementos; un sistema de producción es la conceptualización de los recursos involucrados en la producción de un bien o servicio. Las siguientes, son las principales características de un sistema de producción:

1. Gran cantidad de elementos diferentes (operaciones, insumos, máquinas, trabajadores).
2. El comportamiento asociado a cada elemento es estocástico o desconocido (tiempos de operación, propiedades físicas de los insumos, fallas en la maquinaria).
3. Las relaciones entre los elementos no siempre son lineales (sensibilidad de la demanda a la oferta, curva de aprendizaje de un operador).
4. Existe un entorno cambiante que difícilmente puede ser estudiado como probabilidad, debido a que existen cambios tecnológicos o legales que difícilmente son predecibles y afectan significativamente a la empresa.

En esas condiciones, la planeación de la producción es un intento por mantener viable el sistema de producción contra las variaciones internas y externas.

El enfoque abordado en la literatura de administración de operaciones consiste en el seguimiento de una metodología *activa*, que se adelanta a los eventos antes de que éstos ocurran. Es decir, se otorga un gran peso a los métodos de pronóstico para anticipar la demanda.

En cambio, la cibernética presenta una solución opuesta: concentrar los esfuerzos en el diseño de un sistema que tenga una capacidad de respuesta rápida a los cambios en el entorno. En este sentido se puede decir que este enfoque es *reactivo*.

En la presente investigación se ha intentado conciliar ambas visiones, aprovechando las ventajas de cada una, en una metodología que incorpore tanto una buena previsión del futuro como una buena capacidad de respuesta a los cambios de estado internos o externos.

La metodología propuesta combina las ventajas de la investigación de operaciones en su enfoque sistémico para abordar una problemática compleja y el uso de indicadores que activen la señal de (re)programación de actividades de manera que se ajuste al cumplimiento de los objetivos trazados.

En primer lugar la metodología contempla el empleo de un modelo para pronosticar la demanda futura. La selección del modelo más adecuado dependerá del tipo de producto y del horizonte de planeación. A mayor plazo, mayor borrosidad en la información y por lo tanto se debe preferir un modelo cualitativo. A corto plazo, mayor detalle y por lo tanto se debe preferir un modelo cuantitativo.

El segundo paso de la metodología consiste en determinar si la instalación tiene la capacidad de producción suficiente para esa combinación de productos, en los horizontes considerados. Aquí se determina las necesidades de inversión a futuro.

El tercer paso es propiamente la planeación de la producción. Una vez conocida la demanda estimada y la capacidad de la planta, entonces a través de un programa entero se determina la cantidad a producir de manera que se optimice una medida de desempeño. Para el caso estudiado, se minimizó el costo total.

El cuarto paso consiste en monitorear, a través de uno o más indicadores, la producción, de modo que se active una subrutina de reprogramación cuando la producción esté por debajo de lo planeado.

El quinto paso consiste en monitorear al entorno, i.e., las ventas del producto a través de uno o más indicadores que midan el comportamiento de las ventas con relación a lo estimado. Se activa una subrutina cuando el nivel de ventas está por encima o por debajo de una franja de seguridad.

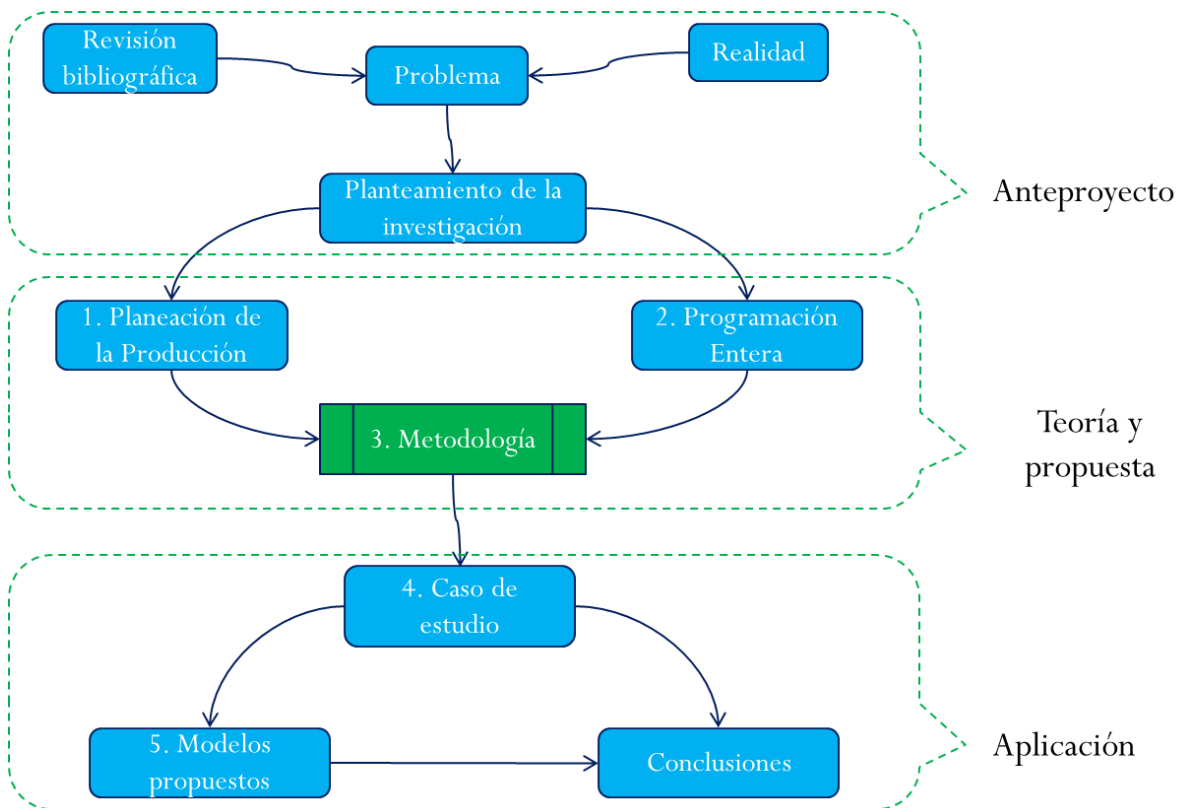
En la literatura revisada no se encontró ninguna metodología con las características de la que se presenta en esta investigación.

La investigación se dividió en tres fases:

1. Anteproyecto. Aquí se realizó una revisión bibliográfica del estado actual de la planeación de la producción y su importancia en el entorno competitivo que enfrentan las empresas. A partir de ello se determinó el problema y se planteó la investigación.

2. Teoría y propuesta. Aquí se revisó con mayor detalle la literatura de planeación de la producción para conocer qué elementos debe contener y cuáles son las herramientas que existen para las diferentes fases de la planeación. También se realizó una revisión a los programas enteros relacionados con la producción, la complejidad computacional inherente en ellos y los métodos exactos de solución más comunes. Se desarrolló la propuesta de metodología.

3. Aplicación. Se presenta la empresa elegida como caso de estudio, los modelos construidos contemplados en la metodología y se comentan los resultados. A partir de ello, se determinan las conclusiones de la investigación.



PROBLEMA

Derivado de la revisión de la literatura se identificó que es posible llevar a cabo una metodología de planeación de la producción que considere desde un punto de vista sistémico las variaciones originadas en el propio sistema así como en su entorno.

Beer (1974) establece de forma muy general una manera de integrar los conceptos de autorregulación, caja negra y homomorfismo para una aplicación en un sistema de producción. Su aportación consiste en esbozar un posible diseño de funciones, de suerte que el sistema responda adecuadamente al entorno.

A su vez las nuevas técnicas (Heizer y Render 2009) de administración de operaciones integran metodologías de planeación de la producción con filosofías de producción como justo a tiempo o manufactura esbelta. Sin embargo, en ellas no se resalta de forma explícita ni se propone un enfoque sistémico para abordar dicho tema.

Debido a lo anterior, se ha considerado la propuesta de integrar en una metodología los métodos “tradicionales” basados en la predicción, con las ideas de comportamiento adaptativo estudiadas por la cibernética.

Es por ello que una pregunta interesante para ser respondida por la investigación es:

¿De qué forma es posible planear y controlar la producción con un enfoque de optimización y adaptabilidad?

PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

Las siguientes preguntas sirvieron de base para orientar la investigación:

- a) ¿Cuáles son las componentes que deben considerarse en la planeación de la producción?
- b) ¿Qué metodologías existen para la planeación de la producción?
- c) ¿Cuáles son los modelos que existen en la literatura sobre planeación de la producción y qué elementos incorporan?
- d) ¿Cuáles son los algoritmos utilizados para resolver dichos modelos, y qué ventajas y desventajas ofrecen?
- e) ¿Cuál puede ser una metodología apropiada para enfrentar las variaciones internas y externas al sistema de producción?
- f) ¿Cuáles son los posibles beneficios de la utilización de la metodología?
- g) ¿Cómo se comporta la metodología en un sistema de producción real?
- h) ¿Qué métodos son adecuados para validar dichos modelos?

OBJETIVO GENERAL

Considerando lo anteriormente expuesto, la presente investigación se propone el siguiente objetivo:

Proponer una metodología para la planeación de la producción que ayude a tomar decisiones relacionadas con la capacidad, operaciones de producción y demanda de producto, empleando simulación y programación entera en la Pequeña y Mediana Empresa.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Seleccionar un modelo de serie de tiempo para representar la demanda del producto.
- b) Construir un modelo de simulación que imite el comportamiento del sistema de producción para determinar la capacidad instalada.
- c) Construir un programa entero para determinar la cantidad de producir en cada periodo del horizonte considerado.
- d) Proponer un indicador para el control de la producción.
- e) Proponer un indicador para el control de la demanda.

JUSTIFICACIÓN

En años recientes las compañías se han tenido que enfrentar a un entorno de mayor complejidad, debido a una mayor apertura de los mercados, mayor diversificación de la demanda, variaciones pronunciadas en oferta de las materias primas y en la demanda final, cambios tecnológicos, etc.

Esto obliga a las empresas no sólo a tener sistemas de producción eficientes, sino una capacidad de respuesta rápida para poder ajustarse al entorno, porque de lo contrario corren el riesgo de desaparecer. Aquellas herramientas que les permitan hacer ajustes dinámicos, de modo rápido y sencillo, constituyen una ayuda muy valiosa, sobre todo en el sistema de producción porque es ahí donde confluyen las variaciones más críticas para la empresa.

ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN

La presente investigación es explicativa, debido a que se centra en conocer y describir el sistema, identificando sus elementos y las interacciones entre ellos, en qué condiciones se da y cómo cambia de estado, y cuál es el grado de certidumbre respecto al comportamiento de las variables.

También la investigación se limitó a:

- ⊕ Sistemas de producción en empresas PyME.
- ⊕ Modelos cuantitativos para la toma de decisiones.

DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

La presente investigación es de tipo no experimental, debido a que no se propuso manipular las variables del sistema real, sino observar los fenómenos como se dan en su contexto natural para después analizarlos.

También es de tipo transversal descriptivo, porque se propuso la investigación del problema en un solo momento, identificando y categorizando los elementos que influyen en el sistema.

DESCRIPCIÓN DE CAPÍTULOS

Capítulo I. Planeación de la producción

Contiene una revisión de los elementos que debe contener el proceso de planeación de la producción. Las fases en que comúnmente se subdivide, la definición, propósito y decisiones asociadas a cada una. Adicionalmente se ofrece una explicación de la importancia de cada fase y se comentan las herramientas más utilizadas en cada una.

Capítulo II. Programación entera

Aquí se presentan los modelos de programación entera típicos que existen sobre la planeación de la producción. Dicha revisión no se propone ser exhaustiva sino una presentación de las formulaciones típicas que existen para problemas relacionados con la planeación de la producción. También se comenta acerca de la complejidad computacional para resolver programas enteros, y se presentan detalladamente los pasos de los algoritmos exactos más eficientes.

Capítulo III. Metodología propuesta

Contiene la metodología propuesta y una explicación de las fases en que divide, comentando en cada una: objetivo, descripción de la función que cumple cada fase, herramienta propuesta como más idónea de acuerdo con dicha función, las entradas de información requerida y las salidas de información.

Capítulo IV. Caso de estudio

Se presenta la empresa seleccionada como caso de estudio, antecedentes, giro, domicilio, productos que ofrece, maquinaria con que cuenta, proveedores, clientes. Así mismo se comenta la problemática que enfrenta y que la convierte en una buena candidata para el presente estudio. Se propone una forma de abordar dicha problemática a través de la metodología de planeación de producción propuesta. Finalmente se comentan detalles específicos sobre el proceso de producción que serán de utilidad para la formulación de los modelos.

Capítulo V. Serie de tiempo y simulación

Se presenta el proceso de modelación para los modelos propuestos que corresponden con las primeras dos fases de la metodología de producción. En primer lugar se presenta el modelo de serie de tiempo seleccionado para pronosticar la demanda, después el modelo de simulación que se construyó para determinar la capacidad de producción de la instalación y finalmente la propuesta de una función que asigna utilidades a niveles de producción para valorar la productividad en términos monetarios.

Capítulo VI. Programa entero e indicadores

En este capítulo se describe el programa entero que se construyó para determinar las cantidades a producir, almacenar y demanda insatisfecha para un horizonte de 12 semanas a costo mínimo. El modelo toma los parámetros de demanda y de producción de la serie de tiempo y de la simulación para minimizar el costo de producción para el horizonte considerado. También se construyen los indicadores de control de producción y de demanda.

CAPÍTULO I

PLANEACIÓN DE LA PRODUCCIÓN

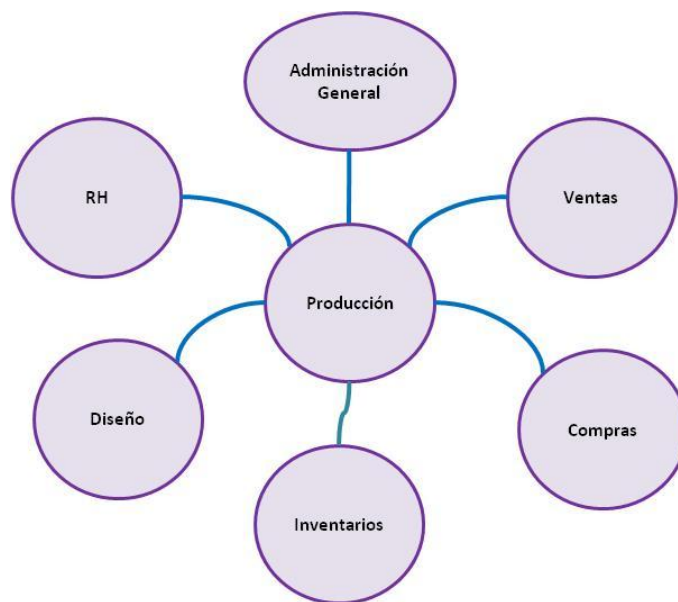
CAPÍTULO I. PLANEACIÓN DE LA PRODUCCIÓN

Se denomina planeación de la producción (PP) al conjunto de actividades, métodos y técnicas dirigidas a determinar con anticipación el tipo, cantidad y tiempo en que deberán producirse ciertos productos. Los productos pueden ser tangibles (generalmente llamados bienes) o intangibles (servicios). En el largo plazo, también involucra la decisión sobre el tamaño, tipo y localización de las instalaciones de producción (Monks, 1991).

También se puede definir la PP como el subsistema que regula los flujos de entrada y de salida del sistema de producción y coordina las interacciones entre sus elementos, de manera que se asegure el cumplimiento de los objetivos establecidos.

En la figura 1.1 se observan las relaciones que tiene el sistema de producción con las demás áreas de una empresa típica.

Fig. 1.1 Relaciones del sistema de producción



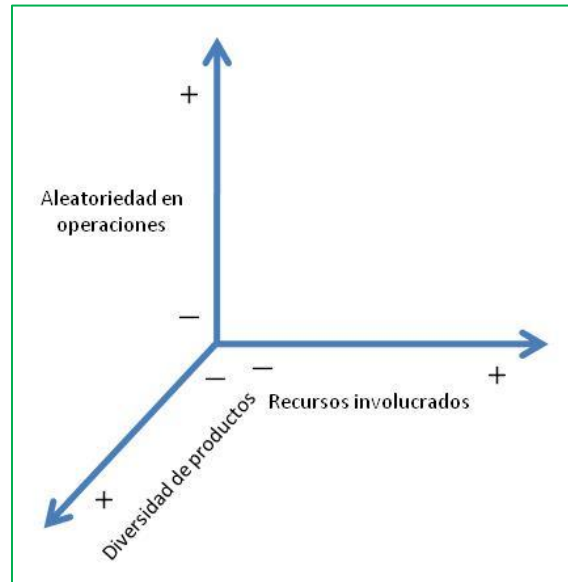
La PP tiene sentido a partir de que existe un déficit entre una petición de compra y el tiempo necesario para satisfacerla. Es decir, si una empresa fuera capaz de producir instantáneamente, entonces no necesitaría planear sus actividades. Pero en la realidad, toda empresa requiere prever los recursos que intervienen en el proceso (materia prima, recursos humanos, etc.) así como el tiempo que toma producir el producto.

Existen recursos o insumos que se pueden conseguir instantáneamente (luz, agua) en cambio existen otros que pueden tardar semanas, meses o más (materia prima, maquinaria, personal). Por otro lado, el tiempo de producción se refiere al tiempo que toma realizar las operaciones de

transformación, y aunque éste puede considerarse determinísticamente, es más aproximado a la realidad si se consideran como una variable aleatoria dado que es común que existan retrasos.

De lo dicho anteriormente se infiere la importancia de la PP. Es importante porque en todo proceso productivo se requiere la combinación de recursos que no están disponibles en todo momento y porque las operaciones de transformación son estocásticas. Si se considera también la diversidad de productos, se tiene la siguiente imagen que refleja la importancia de la PP.

Fig. 1.2 Importancia de la planeación de la producción



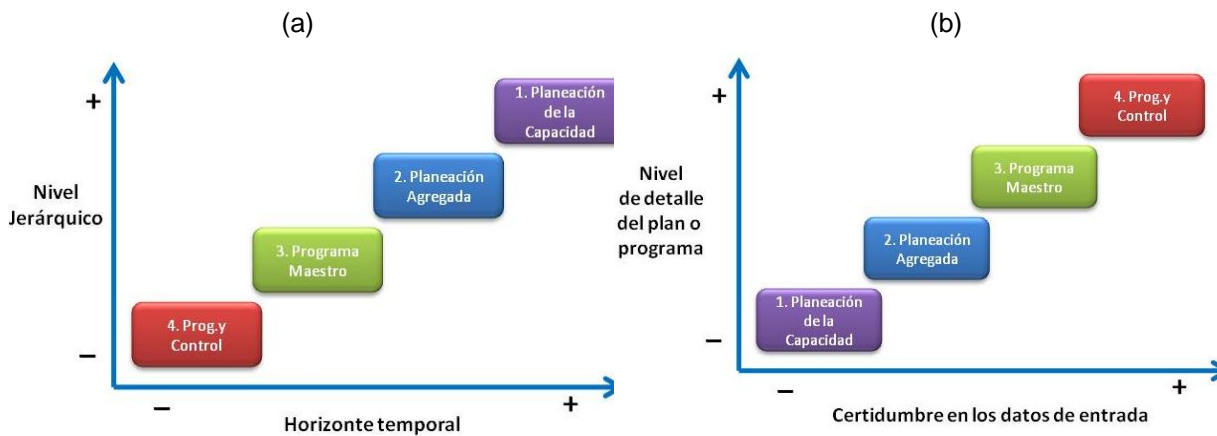
En la figura 1.2 se observa que la importancia de la planeación de la producción aumenta con el grado de aleatoriedad de las operaciones, los recursos involucrados y la diversidad de productos.

Debido a que la PP involucra decisiones para el largo, mediano y corto plazo, es necesaria una toma de decisiones escalonada que corresponda con dichos horizontes de tiempo. Es por ello que la PP se divide en las siguientes actividades o etapas:

1. Planeación de la capacidad
2. Planeación agregada
3. Programación maestra
4. Programación y control

En la primera gráfica de la figura 1.3 se puede apreciar la ubicación de cada etapa de la PP en relación con el nivel jerárquico de la organización y el horizonte temporal de la toma de decisiones. En la segunda gráfica se ubican con relación al nivel de detalle del plan o programa resultante y la certidumbre en los datos de entrada.

Fig. 1.3 Ubicación de cada etapa de la planeación de la producción



A continuación se comenta brevemente la definición, propósito, decisiones y métodos de cada una de las etapas de la PP.

1.1 PLANEACIÓN DE LA CAPACIDAD

Definición. Capacidad es el número de unidades que puede alojar, recibir, almacenar o producir una instalación en un periodo específico de tiempo. Planeación de la capacidad es la determinación de los requerimientos de capacidad futuros. Lo cual puede implicar la modificación de la capacidad presente. Capacidad de diseño es la producción teórica máxima de un sistema en un periodo dado y bajo condiciones ideales de funcionamiento. Es útil para comparar diferentes instalaciones. Capacidad efectiva es la que se espera lograr de un sistema, considerando la mezcla de productos, métodos de programación, mantenimiento y estándares de calidad (Heizer, 2009).

Propósito. El propósito de la Planeación de la capacidad consiste en asegurar altos niveles de utilización de las instalaciones y un elevado rendimiento sobre la inversión. Se debe tomar en cuenta que si la instalación es demasiado grande, algunas partes estarán ociosas y se tendrá un costo fijo alto. Si es demasiado pequeña, se tendrá demanda insatisfecha y se corre el riesgo de perder clientes o mercados completos.

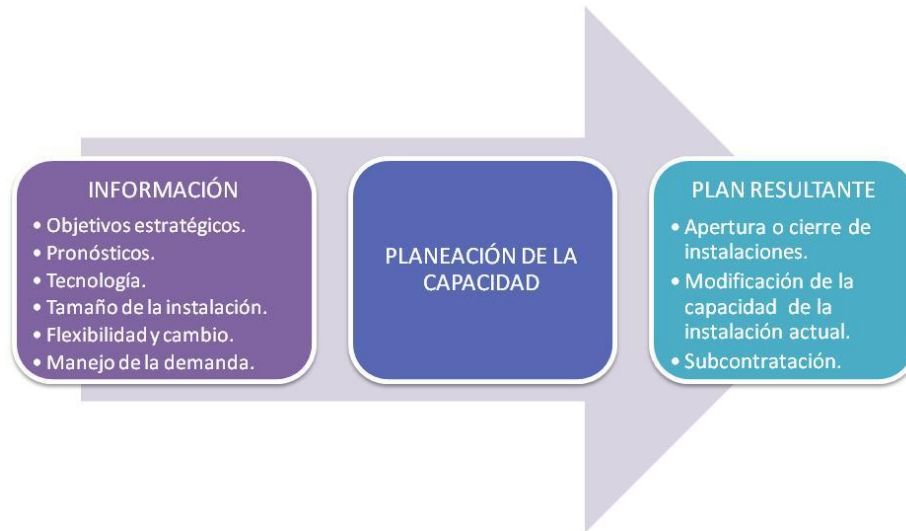
Decisiones. Las decisiones sobre capacidad involucran algunas de las siguientes alternativas:

1. Diseño y localización de nuevas instalaciones, o cierre de instalaciones.
2. Incremento/decremento de la capacidad de la instalación actual.
3. Subcontratación de la producción.

Para tomar una decisión adecuada, es imprescindible considerar los objetivos estratégicos y la visión de la organización. De manera que la decisión sobre capacidad esté en armonía con las

estrategias elegidas y que no se realicen inversiones aisladas que se dirijan a paliar necesidades temporales. En la figura 1.4 se puede apreciar la información de entrada y de salida en la planeación de la capacidad. La de entrada debe considerar: objetivos estratégicos de la organización, pronósticos de precios sobre los factores productivos, cambios tecnológicos, tamaño óptimo de la instalación, flexibilidad del sistema para responder a los cambios en el entorno y las políticas sobre el manejo de la demanda.

Fig. 1.4 Proceso de la planeación de la capacidad



Existen otras consideraciones necesarias para tomar una buena decisión sobre capacidad, las cuales se comentan a continuación. Debido a que los pronósticos son una función indispensable y recurrente en todas las etapas de la PP, se comentarán con mayor amplitud. Pero ello no implica que sean el insumo de mayor importancia para la toma de decisiones sobre capacidad.

Pronósticos

Los pronósticos son estimaciones de la ocurrencia, cronología o la magnitud de futuros eventos inciertos (Monks, 1994). Tienen el propósito de guiar las actividades futuras de la organización, anticipándose a los eventos antes de que estos sucedan. No sólo se pronostica la demanda sino también los precios de materias primas, mano de obra, tasas de interés y los ingresos.

Existen diferentes métodos de pronóstico, para elegir el más adecuado es necesario tomar en cuenta (Monks, 1991):

1. La naturaleza del objeto a pronosticar (v.gr. demanda, tecnología)
2. El horizonte temporal (corto, mediano, largo plazo).
3. La base de datos disponible (¿qué datos existen?, ¿son confiables?).

4. La metodología empleada (cuantitativa o cualitativa).

A continuación se presenta una tabla sumaria sobre los métodos más comunes para pronosticar (Ballou, 2004):

Tabla 1.1 Métodos de pronóstico más comunes

No.	Método	Descripción	Tipo	Horizonte	Costo relativo
1	Opinión de Ventas	Estimación del área de ventas como un todo.	Cualitativo	Corto a mediano	Bajo a medio
2	Opinión ejecutiva	Realizados por los gerentes de Mercadotecnia, Finanzas y Producción.	Cualitativo	Corto a largo	Bajo a medio
3	Ventas y gerente de línea	Proyecciones de venta nacionales realizados por los gerentes corporativos, de forma independiente a las estimaciones regionales.	Cualitativo	Mediano	Medio
4	Analogía histórica	Proviene de la comparación de un producto similar previamente introducido.	Cualitativo	Corto a largo	Bajo a medio
5	Delphi	Los expertos responden una batería de preguntas de forma anónima, reciben retroalimentación y llegan a un consenso.	Cualitativo	Largo	Medio a alto
6	Investigación de mercados	Se usan cuestionarios y paneles para obtener datos que anticipen el comportamiento del consumidor.	Cualitativo	Mediano a largo	Alto
7	Serie de tiempo simple	Se utiliza una regla simple que pronostica igual al último valor o igual más o menos algún porcentaje.	Cuantitativo	Corto	Bajo
8	Promedio móvil	El pronóstico es un promedio de los n últimos periodos más recientes.	Cuantitativo	Corto	Bajo
9	Proyección de la tendencia	El pronóstico es una proyección lineal, exponencial u otra, de la tendencia pasada.	Cuantitativo	Mediano a largo	Bajo
10	Descomposición	Las series de tiempo se dividen en sus componentes de tendencia, estacional, cíclica y aleatoria.	Cuantitativo	Corto a largo	Bajo
11	Suavización exponencial	Son promedios móviles ponderados exponencialmente, donde los últimos valores tienen mayor peso.	Cuantitativo	Corto	Bajo
12	Box-Jenkins	Se propone un modelo de regresión de serie de tiempo, estadísticamente probado, modificado y vuelto a probar hasta que sea satisfactorio.	Cuantitativo	Mediano a largo	Mediano a alto
13	Regresión y correlación	Se utilizan una o más variables explicativas para pronosticar por medio de la ecuación de mínimos cuadrados o de una correlación.	Cuantitativo	Corto a mediano	Mediano a alto
14	Econométricos	Se usa una solución por ecuaciones simultáneas de regresión múltiple para una actividad económica.	Cuantitativo	Corto a largo	Alto

El costo está asociado a la recolección y procesamiento de información y el empleo de conocimientos técnicos específicos. Fuente: Tomado de Administración de operaciones, Joseph Monks, 1991.

Es posible el uso de una combinación de diferentes métodos, sobre todo aquellos que toman en cuenta aspectos diferentes para realizar sus estimaciones. Para ser más efectivos, la organización debe documentar la validez de las predicciones y conservar registros de los métodos empleados así como de sus modificaciones.

Cambios tecnológicos

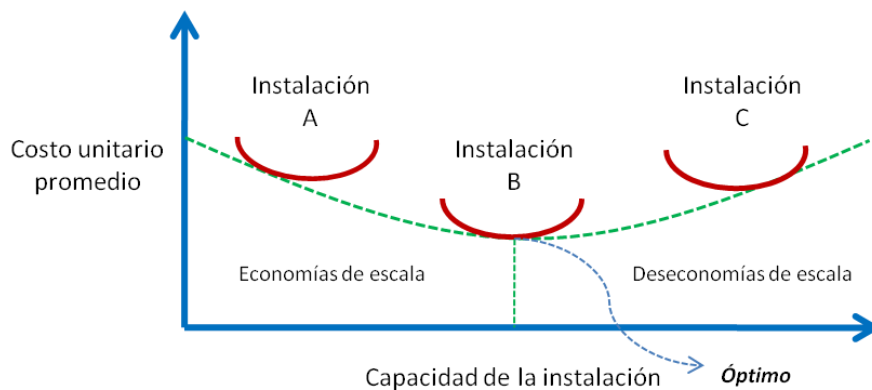
Existen diferentes alternativas tecnológicas para el sistema productivo, cada una de ellas con diferentes implicaciones de costos, mano de obra, mantenimiento, volumen de producción, etc. Se debe elegir aquella que esté más en armonía con los demás criterios.

Tamaño de la instalación

Si una instalación es diseñada con una capacidad muy baja, los costos fijos resultan excesivos. Si su capacidad es demasiado grande, también los costos son altos por el costo de la instalación no utilizada. Al primero de ellos se le conoce como economías de escala, al segundo, deseconomías de escala. Lo ideal es encontrar un tamaño óptimo.

En la figura 1.5 se observa cómo para 3 diseños de instalaciones con capacidades diferentes, corresponden diferentes costos unitarios promedio. La instalación A no aprovecha suficientemente las economías de escala. La C presenta deseconomías de escala. La óptima es la instalación B.

Fig. 1.5 Costos unitarios con relación al tamaño de la instalación



Flexibilidad y cambios

Debido al entorno global, la apertura de mercados, el libre flujo de las inversiones, cambios tecnológicos, etc. La organización debe preferir sistemas productivos que ofrezcan flexibilidad en sus instalaciones, de suerte que exista la posibilidad de realizar cambios en los equipos para adecuarse a la demanda. Para ello es importante que se evalúe la sensibilidad de las decisiones, y se consideren los escenarios más probables.

Manejo de la demanda

Una correspondencia perfecta entre la capacidad de las instalaciones y la demanda no es una afirmación realista. La demanda puede superar la capacidad o la capacidad superar la demanda. Incluso se pueden presentar ambos casos de forma alternada a lo largo de un horizonte temporal. Sin embargo, existen las siguientes tácticas:

- ⊕ Cuando la demanda es estacional, ofrecer productos con patrones contracíclicos para nivelar la producción en todo el año.

- ⊕ Aumento o disminución en el personal para hacer frente a las temporadas altas y bajas.
- ⊕ Compra de equipo adicional o venta o renta del equipo existente.
- ⊕ Mejora de los procesos para aumentar la producción.
- ⊕ Rediseño del producto para facilitar la producción.
- ⊕ Aumento o disminución del precio del producto.

Métodos. Los métodos auxiliares de uso más común en la planeación de la capacidad son los siguientes (Heizer, 2009):

Análisis del punto de equilibrio

Es una técnica que determina el punto (en unidades y en dinero) en donde los costos se igualan a los ingresos, este punto se llama punto de equilibrio. Las compañías deben operar por arriba de él para lograr rentabilidad. Puede ser para uno o varios productos.

Árboles de decisión

Son una representación gráfica de las posibles decisiones y de los posibles estados de la naturaleza, existe una probabilidad asociada a cada estado de la naturaleza. A cada combinación decisión-estado se le asigna una ganancia o pérdida. La mejor decisión es aquella con ganancia esperada más alta.

Valor presente neto

Es la determinación del valor descontado de una serie de ingresos en el futuro, para hacer el cálculo se requiere conocer los pagos futuros, la cantidad de periodos y una tasa de interés. Es importante porque para la mayoría de las decisiones de inversión es de interés calcular el valor presente de una serie de pagos en el futuro.

1.2 PLANEACIÓN AGREGADA

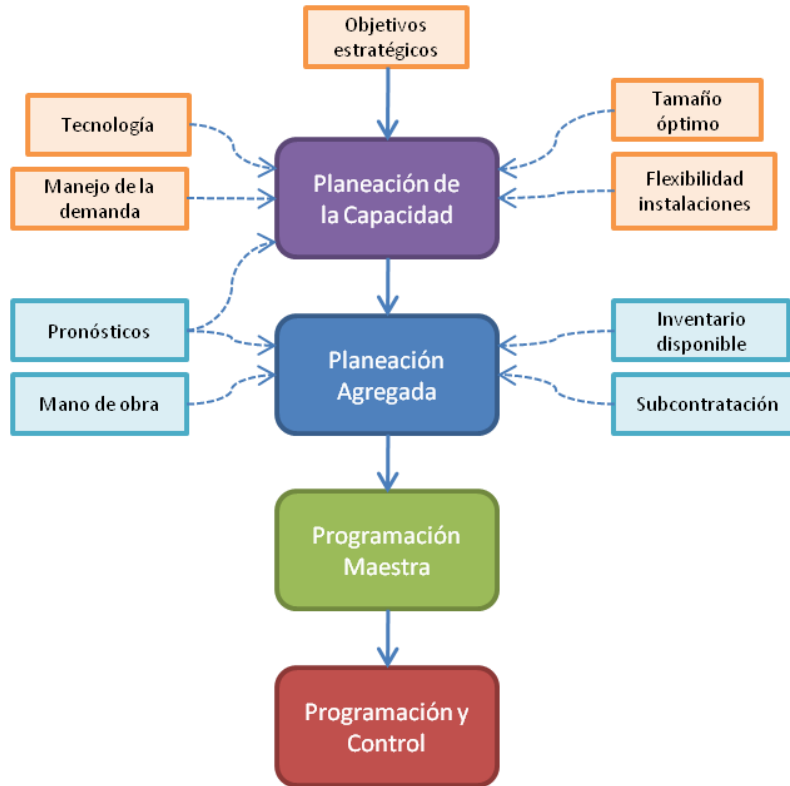
Definición. Planeación agregada es el proceso de planeación de la cantidad y cronología de la producción sobre un rango intermedio (generalmente de 3 a 18 meses), ajustando la tasa de producción, empleo, inventarios y otras variables controlables (Monks, 1991). El plan resultante está expresado en términos agregados o globales, es decir, en familias de productos.

Propósito. El propósito de la planeación agregada consiste en minimizar los costos para el periodo considerado, determinando los niveles de producción, inventario, mano de obra, nivel de servicio, etc. Para ello necesita 4 elementos:

1. Una unidad general lógica para medir las ventas y la producción (piezas, cajas, lotes).
2. Un pronóstico de demanda para un periodo intermedio expresado en forma agregada.
3. Un método para determinar los costos.
4. Un modelo que combine los elementos anteriores para tomar las decisiones adecuadas.

En la figura 1.6 se aprecian los elementos que se consideran para las decisiones de capacidad y de planeación agregada.

Fig. 1.6 Relaciones de la planeación agregada



Un Plan agregado debe responder las siguientes preguntas (Heizer, 2009):

- ⊕ ¿Deben usarse los inventarios para absorber los cambios en la demanda?
- ⊕ ¿Se debe variar la fuerza de trabajo o mantener el mismo nivel de trabajadores?
- ⊕ ¿Debe contratarse personal de tiempo parcial o utilizar horas extra y periodos de inactividad?
- ⊕ ¿Qué productos y cuánta producción se debe subcontratar?
- ⊕ ¿Deben cambiarse los precios para influir en la demanda?

Decisiones. A continuación se comentan algunas de las estrategias que existen para manejar la capacidad de producción y la demanda. Para facilitar la lectura se presentan en una tabla.

Tabla 1.2 Decisiones sobre planeación agregada

#	Alternativa	Ventajas	Desventajas	Comentarios
1	<i>Cambiar los niveles de inventario.</i>	Cambios graduales o nulos en los recursos humanos. No existen cambios abruptos en la producción.	Los costos de mantener inventarios se pueden incrementar. Los faltantes pueden ocasionar pérdida de ventas.	Se aplica principalmente a operaciones de producción y no de servicio.
2	<i>Variar el tamaño de la fuerza de trabajo mediante contrataciones y despidos.</i>	Evita los costos de otras alternativas.	Los costos por contrataciones, despidos y capacitación pueden ser significativos.	Se usa donde el tamaño de la fuerza de trabajo es grande.
3	<i>Variar la tasa de producción mediante tiempo extra u ocioso.</i>	Se ajusta a fluctuaciones estacionales sin generar costos de contratación y capacitación.	Primas de tiempo extra, trabajadores cansados; quizá no se satisfaga la demanda.	Permite flexibilidad dentro del plan agregado.
4	<i>Subcontratación.</i>	Permite que la producción de la empresa sea flexible y suavizada.	Pérdida del control de la calidad; utilidades reducidas; pérdida de negocios futuros.	Se aplica principalmente en entornos de producción.
5	<i>Uso de trabajadores de tiempo parcial.</i>	Es menos costoso y más flexible que usar trabajadores de tiempo completo.	Altos costos por rotación y capacitación; se afecta la calidad; la programación es difícil.	Es bueno en el caso de trabajos no calificados, en áreas con gran fuerza de trabajo temporal.
6	<i>Influir en la demanda.</i>	Intenta usar el exceso de capacidad. Los descuentos atraen a clientes nuevos.	Demanda incierta. Es difícil ajustar exactamente la oferta a la demanda.	Crea ideas de mercadotecnia. Algunos negocios usan la sobreventa.
7	<i>Órdenes pendientes durante periodos de demanda alta.</i>	Puede evitar el tiempo extra. Mantiene una capacidad constante.	Los clientes deben estar dispuestos a esperar, pero hay pérdida de confianza.	Muchas compañías aceptan órdenes pendientes.
8	<i>Mezcla de productos con estacionalidad opuesta.</i>	Utiliza completamente los recursos, permite mantener una fuerza de trabajo estable.	Se pueden requerir habilidades o equipo que están fuera del área de experiencia de la empresa.	Es arriesgado encontrar productos o servicios con patrones de demanda opuestos.

Fuente: Tomado de *Principios de administración de operaciones*, Jay Heizer, 2009

Las estrategias anteriores se pueden clasificar en 2 grandes grupos: de persecución y de nivelación. La estrategia de persecución intenta ajustar la producción a la demanda, periodo a periodo. La de nivelación procura mantener una producción uniforme en todo el año y aprovechar el inventario para absorber las variaciones. No existe una estrategia única que sea igualmente bondadosa para cualquier empresa, se deben tener en cuenta las características del mercado y los objetivos estratégicos de la empresa. Es posible combinar dos o más de ellas para obtener mejores resultados.

Métodos. A continuación se comentan los métodos más frecuentes que se utilizan para determinar el plan agregado de producción (Heizer, 2009).

Métodos gráficos

Los métodos gráficos son populares porque resultan fáciles de entender y usar, aunque están limitados en cuanto al número de variables que pueden utilizar. Se trata de enfoques de prueba y error que no garantizan una solución óptima.

Modelo de coeficientes administrativos

Consiste en desarrollar modelos de regresión que incorporan las decisiones anteriores de los administradores para predecir las necesidades de capacidad. La línea de regresión proporciona la relación que existe entre las variables (mano de obra, demanda) para apoyar decisiones futuras.

Regla de decisión lineal

Determina la tasa de producción y el nivel de mano de obra óptimos para un periodo específico. Minimiza el costo total de nómina, contrataciones, despidos, tiempo extra e inventarios mediante una serie de curvas cuadráticas de costos.

Programación lineal y entera

El uso de modelos de optimización que son capaces de incluir gran cantidad de variables y de periodos considerados. Se puede utilizar un nivel de detalle muy cercano al real. Ofrecen soluciones óptimas o cercanas al óptimo. En el capítulo 2 se comentará a detalle los modelos tipo existentes.

Simulación

El empleo de modelos lógico-matemáticos que intentan imitar el comportamiento del sistema real, utilizando distribuciones de probabilidad. Tiene como desventaja el costo y el tiempo que toma determinar los parámetros del modelo. Como ventajas, el que permite evaluar la bondad de diferentes alternativas sin experimentar en el sistema real.

1.3 PROGRAMACIÓN MAESTRA

Definición. La programación maestra es la técnica de expresar el plan agregado en términos de artículos finales, especifica qué debe hacerse y cuándo hacerlo (Heizer, 2009).

Mientras que el plan agregado se establece en términos generales como familias de productos, toneladas de acero; el programa maestro se establece en términos de productos específicos. A medida que el proceso de planeación pasa del plan a la ejecución, cada programa inferior debe ser

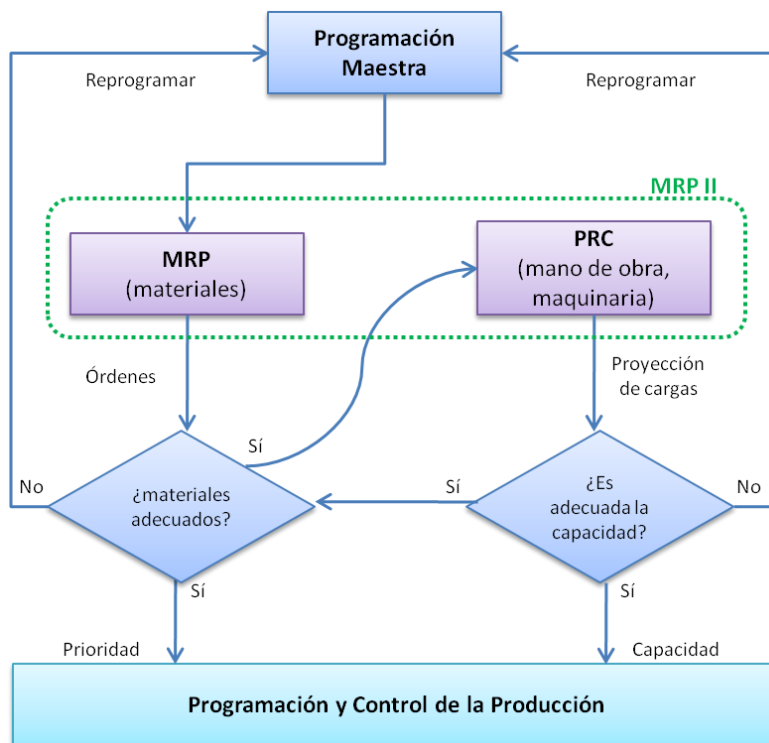
factible. Si no es factible, se utiliza la retroalimentación hacia un nivel superior para hacer el ajuste necesario.

Propósito. El propósito de la programación maestra consiste en formalizar el plan agregado de producción y convertirlo en requerimientos específicos de materias primas y capacidad. Entonces deben ser evaluadas las necesidades de mano de obra, materia prima, y equipos.

La programación maestra maneja la producción entera y el sistema de inventarios, estableciendo metas de producción específicas y respondiendo a la retroalimentación de todo el flujo de operaciones. Algunas de sus funciones clave son:

1. Traducir planes agregados en artículos finales.
2. Evaluar alternativas de programación.
3. Generar requerimientos de materiales.
4. Generar requerimientos de capacidad.
5. Facilitar el procesamiento de información.
6. Mantener las prioridades válidas.
7. Utilizar la capacidad con efectividad.

Fig. 1.7 Diagrama de actividades de la programación maestra



Existen dos subrutinas en el programa maestro (ver figura 1.7): plan de requerimientos de materiales (MRP) y el plan de requerimientos de capacidad (PRC). El primero de ellos determina la cantidad y tiempo (específico) en que deben comprarse o producirse los componentes del producto para cumplir con el plan de producción. Para ello utiliza una lista de materiales (*bill of materials*), inventario, tiempos de entrega o producción y el plan de producción. Tiene como objetivo asegurar la existencia de insumos en el momento preciso en que son requeridos en las operaciones.

El segundo de ellos (PRC) determina la cantidad de tiempo-máquina y mano de obra necesarios para llevar a cabo el programa de producción. Su objetivo consiste en asegurar su factibilidad en cuanto a maquinaria y mano de obra.

Es posible unificar ambas subrutinas (MRP y PRC) dado que ambas tratan con la planeación de recursos, a ese subsistema de producción se le llama planeación de recursos de la producción (MRP II). El cual constituye una herramienta muy poderosa porque permite incluir n cantidad de recursos y no sólo materia prima, maquinaria y personal. Existen diversos y poderosos modelos de programación entera de MRP II que se verán en el Capítulo II.

Al sistema de información que vincula un MRP II con otros módulos administrativos (impuestos, inventarios, contabilidad, compras, etc.) se le llama *enterprise resource planning* (ERP).

Un ERP es un sistema de información utilizado para planear e identificar los amplios recursos empresariales necesarios para tomar, procesar, embarcar y contabilizar las órdenes del cliente. Su objetivo consiste en coordinar todo el negocio de la empresa, pero pocas veces se logra. Un caso de éxito es el de Nestlé que en el año 2000 firmó un contrato por 200 millones de dólares con SAP para desarrollar un ERP, más 80 millones por consultoría y mantenimiento. Además invirtió 500 millones en hardware y software. Después de 3 años se logró implementar y le generó ahorros por 325 millones de dólares (Heizer, 2009).

Las ventajas de un ERP son: integrar la cadena de suministro y el proceso administrativo, crear bases de datos compartidas, mejora de proceso y aumento de la comunicación y colaboración.

Las desventajas son: alto costo y necesidad de personalización, su implementación requiere cambios en la organización y es un proceso continuo que quizá nunca termine, muchas compañías no logran adaptarse a él.

Decisiones. La programación maestra no se centra en pronósticos o en estrategias para manejar la demanda, eso ya debe estar determinado en el paso anterior, lo importante ahora consiste en programar la producción de manera que se cumplan las órdenes. Es decir, se centra en determinar una configuración factible del sistema, contestando a las siguientes preguntas:

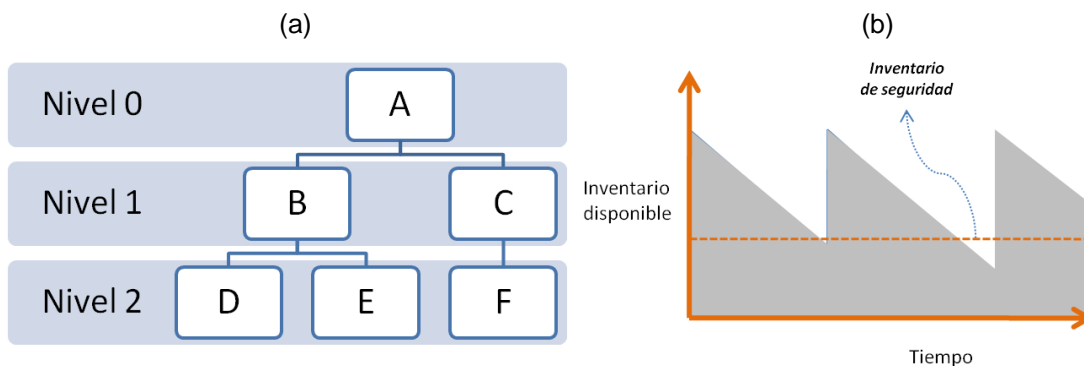
- ⊕ ¿Qué insumos son necesarios, en qué cantidad y en qué momento?
- ⊕ ¿Cuáles son las unidades de tiempo que se utilizarán para planear?
- ⊕ ¿Cuántas horas-hombre son necesarias (tiempo normal y extra)?
- ⊕ ¿Cuántas horas-máquina son necesarias?
- ⊕ ¿De qué tamaño es el segmento programado que no podrá ser modificado?

En cuanto a la segunda pregunta, es importante comentar que al momento de realizar la planeación, es posible elegir las unidades tiempo en que se hará. Mientras más pequeña sea ésta, más precisa será la planeación pero también se complica en la misma proporción. Es posible hacer la programación por semanas, días, horas, incluso menos. A estas unidades se les llama cubos.

Como se puede apreciar en la figura 1.7, existe una reprogramación del programa maestro siempre que no esté disponible la materia prima o que no haya capacidad suficiente en la planta. Pero las constantes reprogramaciones pueden generar problemas en el sistema de producción y en el resto de departamentos periféricos (nerviosismo del sistema), es por ello que se recomienda determinar un intervalo de tiempo el cual no se reprogramará. Cabe mencionar que si dicho nerviosismo es recurrente, es probable que el problema no se encuentre en el MRP II, sino en el entorno del sistema de producción.

Métodos. Existen ciertas técnicas que se utilizan para determinar los requerimientos de materiales y los de capacidad. En la figura 1.8, (a) corresponde a un diagrama de árbol, el cual refleja gráficamente la estructura del producto y las relaciones de dependencia. La segunda (b) muestra la función del inventario de seguridad como una protección contra el riesgo de inexistencias. A continuación se comentan cuatro de ellos (Heizer, 2009).

Fig. 1.8 Árbol de estructura de producto e inventario de seguridad



Árbol de estructura de producto

Es una técnica que muestra la relación origen-componente, requiere de una *lista de materiales* y se utiliza para facilitar el cálculo del tiempo en que deberán procesarse los componentes para entregar el producto terminado a tiempo.

Inventario de seguridad

El punto de reorden determina el nivel de inventario para el cual es necesario emprender acciones para reabastecer el artículo almacenado. En ocasiones es conveniente agregar un inventario adicional para protegerse contra el riesgo de tiempos de entrega tardíos.

Tamaño del lote

Son técnicas utilizadas para determinar de qué tamaño (cantidad de productos) deben ser los lotes de producción. Entre ellos se tiene el modelo de lote económico (EOQ), el cual se utiliza cuando la demanda es independiente. La técnica de lote por lote genera exactamente lo que se necesita para cumplir con el plan. El balance parcial del periodo tiene un enfoque más dinámico y equilibra los costos de mantener y de preparar.

Programación entera

Existen modelos de programación entera que son muy completos para determinar los recursos necesarios en la producción, así como los tamaños de lote de cada producto. Éstos se verán en el Capítulo II.

1.4 PROGRAMACIÓN Y CONTROL

Definición. Se llama programación y control al conjunto de actividades que se dirigen a priorizar las órdenes de producción, asignarlas a los centros de trabajo (especificando trabajadores y máquinas) y monitoreo de las mismas para asegurar el cumplimiento de la programación maestra. Se trata de decisiones a corto plazo (horas, días, semanas), que deben considerar un nivel de detalle amplio, lo suficiente para producir un programa que sea realista (factible). El control se ejerce a través de un monitoreo (a intervalos planificados) para conocer el estado de las órdenes de producción, a partir de ello cambiar prioridades o asignar tiempos extra. No todas las órdenes de producción son igualmente importantes.

Propósito. El propósito de la programación y control consiste en elaborar programas de trabajo de corto plazo que sean factibles y realizar ajustes dinámicos a los mismos para asegurar el cumplimiento de las entregas, de acuerdo con el programa maestro. Ello implica la determinación

de los recursos necesarios (maquinaria, personal) tomando en consideración su disponibilidad y la asignación de órdenes con base en una prioridad (Monks, 1991).

Decisiones. Las decisiones que se toman son de *corto plazo* exclusivamente, por dos motivos principalmente: uno técnico que consiste en la dificultad de programar con gran nivel de detalle para periodos medianos o largos; el otro práctico, porque solamente es de interés la programación inmediata.

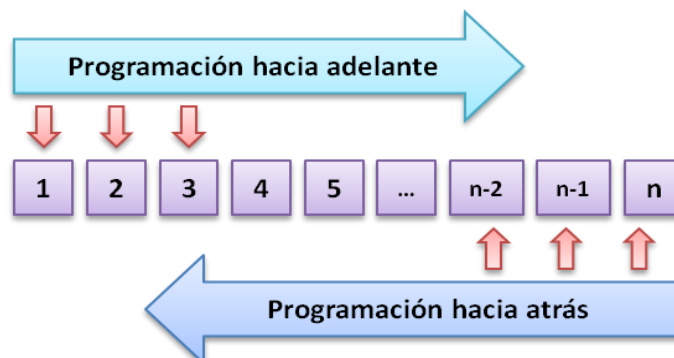
Tabla 1.3 Ejemplos de actividades a programar

Organización	Programación
<i>Hospital</i>	Uso de la sala de operaciones Admisión de pacientes. Personal de enfermería, seguridad y mantenimiento. Tratamiento de pacientes externos.
<i>Universidad</i>	Aulas y equipo audiovisual. Horarios de estudiantes y profesores. Cursos de licenciatura y posgrado.
<i>Fábrica</i>	Producción de bienes. Compras de materiales. Horarios de trabajadores.
<i>Restaurante</i>	Horarios de los trabajadores. Compras de materia prima. Horarios de comida promocionales.
<i>Aerolínea</i>	Mantenimiento de aviones. Horarios de salida. Rutas de vuelo. Tripulación.

Fuente: Tomado de Principios de administración de operaciones, Jay Heizer, 2009

Al realizar la programación, es posible iniciar el programa comenzando desde el día uno, que es cuando conoce el primer requerimiento de producción, e ir adicionando cargas de trabajo sucesivamente. A este método se le llama programación hacia adelante. Cuando el programa se inicia con las fechas de entrega y se programa en orden inverso, comenzando desde la última operación, se llama programación hacia atrás (ver figura 1.9).

Fig. 1.9 Tipos de cargas de trabajo



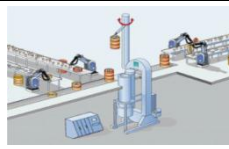



Existen diferentes criterios que guían las decisiones en la programación, los cuales tienen implicaciones diferentes en cuanto a costo y servicio. A continuación se listan y comentan brevemente (Heizer, 2009):

1. Minimizar el tiempo de terminación. El tiempo de terminación es el tiempo promedio que tarda una unidad de producto (bien o servicio) en ser procesado, incluye las operaciones, espera, transporte e inspección.
2. Maximizar la utilización de la instalación. Se obtiene a través del cociente que resulta del tiempo de utilización de la instalación y el tiempo total disponible. Lo que determina es el porcentaje de uso de la instalación.
3. Minimizar el inventario de trabajo en proceso. Esto se evalúa determinando el número promedio de trabajos incluidos en el sistema (pendientes por terminar). Cuanto menor sea el número de trabajos, menor será el inventario.
4. Minimizar el tiempo de espera del cliente. Se evalúa a través de indicadores de servicio, como puede ser el número de días de retraso, el número de incumplimientos de la fecha de entrega, etc.

A continuación se hace mención sobre los diferentes tipos de sistemas productivos y la orientación de la programación y control asociada a cada uno de ellos.

Tabla 1.4 Enfoque de programación en relación al tipo de proceso

Tipo de proceso	Producción intermitente	Células de trabajo	Líneas de ensamble	Producción continua
Imagen				
Descripción	Producción de lotes a través de máquinas de uso general.	Instalaciones enfocadas a producir familias de componentes similares.	Instalaciones repetitivas para la producción de una amplia variedad de productos.	Instalaciones orientadas a producir grandes volúmenes de pocos productos.
Enfoque de la programación	Programación hacia adelante.	Programación hacia adelante.	Programación hacia adelante.	Programación hacia adelante.
Ejemplos	Fundiciones, talleres de maquinado, restaurantes, impresiones, etc.	Construcción de ambulancias, motores, productos de temporada.	Automóviles, electrodomésticos, computadoras	Papel, cerveza, metales, etc.

Fuente: Elaboración propia basada en Administración de operaciones, Heizer, 2009

Métodos. Los métodos de mayor uso para esta etapa de la planeación son (Heizer, 2009):

Control de insumos y de productos

Es una técnica que permite administrar el flujo de trabajo en la instalación. Si los trabajos llegan con velocidad mayor de lo que pueden ser procesados, se cargan órdenes en espera. Se mantiene el control de insumos y productos con un conjunto de tarjetas que acompañan el trabajo a lo largo de todo el proceso. A través de ella se conoce el tiempo de producción, retrasos, saturación del sistema, etc.

Gráficas de Gantt

Se trata de una técnica gráfica que muestra las cargas y tiempos ociosos de los departamentos, máquinas o instalaciones. Despliega las cargas de trabajo para que sea más fácil determinar los ajustes necesarios. Es importante mencionar que dichas gráficas no consideran cambios o retrasos en la producción, por tanto, es necesario actualizarlas constantemente.

Modelos de optimización

Existen modelos de optimización para la programación de tareas, los cuales pueden consistir en la minimización del costo o del tiempo ocioso, o la maximización de la utilización o del aprovechamiento de las instalaciones. Los modelos pueden ser lineales, enteros, o no lineales; de entre los más utilizados en programación son los de asignación y calendarización.

Reglas de prioridad

Se trata de un conjunto de lineamientos para determinar la secuencia en que se debe realizar los trabajos. Algunas de ellas son PEPS (primero en entrar, primero en salir), TCP (tiempo de procesamiento más corto), FEP (fecha de entrega más próxima), TPL (tiempo de procesamiento más largo), razón crítica (tiempo restante/ días de trabajo restantes) o la regla de Johnson, la cual consiste en:

1. Listar las órdenes con tiempo de procesamiento en cada máquina.
2. Seleccionar la orden con el tiempo de procesamiento más corto. Si éste se encuentra en la primera máquina, se programa en primer lugar, si el menor tiempo se encuentra en la segunda máquina, el trabajo se programa al final.
3. Se elimina la orden de la lista.
4. Regrese a 2 si existen más órdenes, de lo contrario termine.

CAPÍTULO II

PROGRAMACIÓN ENTERA

CAPÍTULO II. PROGRAMACIÓN ENTERA

2.1 INTRODUCCIÓN

Se llama programa entero a un programa lineal en el que alguna o todas sus variables decisionales están restringidas a asumir valores discretos. Un programa entero puro es aquel en el que todas sus variables son enteras. Un programa entero mixto es aquel que combina variables discretas y continuas (Salkin, 1989).

Usando notación matricial, a continuación se escribe un programa general entero:

$$\text{Max } z = \mathbf{c}\mathbf{x} + \mathbf{d}\mathbf{y} \quad (1)$$

s.a

$$\mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{D}\mathbf{y} \leq \mathbf{b}, \quad (2)$$

$$\mathbf{x}, \mathbf{y} \geq \mathbf{0}, \quad (3)$$

$$\mathbf{x} \in \mathbf{Z}^+$$

En donde:

- ⊕ \mathbf{c} es un vector renglón de n componentes.
- ⊕ \mathbf{d} es un vector renglón de n' componentes.
- ⊕ \mathbf{A} es una matriz de $m \times n$.
- ⊕ \mathbf{D} es una matriz de $m \times n'$.
- ⊕ \mathbf{b} es un vector columna de m componentes.
- ⊕ \mathbf{x} es un vector columna de n variables enteras.
- ⊕ \mathbf{y} es un vector columna de n' variables continuas.

Se puede observar que si $n = 0$, entonces se tiene un programa lineal. Por el contrario si $n' = 0$, entonces se tiene un programa entero puro. Y si $n \neq 0$ y $n' \neq 0$, entonces se tiene un programa entero mixto.

Importancia. La importancia de la programación entera se deriva del hecho de que una gran cantidad de problemas reales sólo tienen sentido cuando sus variables asumen valores discretos. Por ejemplo, no se pueden asignar 1.3 trabajadores a una tarea, tampoco tiene sentido construir 0.7 de una fábrica en determinado lugar, ni producir 2,120.66 productos diarios.

Como se ve, dependiendo del problema, la solución lineal obtenida (llamada solución relajada) puede ser un poco aceptable y adecuarse muy bien a un redondeo práctico, como en la producción de artículos; pero en el caso de la fábrica no es posible. Redondear la solución a un valor entero próximo tiene el riesgo de que la nueva solución sea infactible, es decir, que viole al menos una restricción, además que no garantiza la optimalidad. Por lo tanto, el redondeo de la solución relajada no es un método para encontrar una solución a un programa entero.

Una gran cantidad de programas enteros emplean variables binarias que representan decisiones del tipo *sí/no*. A estos modelos se les llama programas enteros binarios.

Algunos ejemplos de situaciones en las que se requiere la programación entera son:

Tabla 2.1 Aplicaciones de la programación entera

Situación	Variables enteras
Asignación de personal	Cantidad de personal
Análisis de inversión	Decidir si realizar la inversión o no.
Localización de instalaciones	Decidir si se elige determinado sitio o no.
Producción y distribución	Cantidad a producir y a transportar de un bien.
Despacho de envío y ruteo.	Seleccionar qué caminos debe seguir el transporte.
Programación de actividades	Determinar la secuencia y tiempo en que deben ejecutarse las actividades.
Flujos financieros	Determinar qué inversiones adquirir y en qué periodo.

2.2 MODELOS TIPO DE PLANEACIÓN DE LA PRODUCCIÓN

Debido a que el propósito de la tesis es centrarse en los modelos de planeación de la producción, a continuación se incluyen algunas de las formulaciones tipo que existen para representar los aspectos relevantes de la misma. Se presentan de la siguiente forma: título, objetivo (función objetivo), comentarios, variables, formulación y datos del modelo (cantidad de variables enteras y continuas y cantidad de restricciones, incluyendo las de valores enteros y excluyendo las de no negatividad).

MODELO I

Título: Localización de instalaciones (Salkin, 1989).

Objetivo: Minimizar el costo total (variable y fijo).

Comentarios: Se trata de determinar *cuál* localización de la planta seleccionar, y *cuánto* producir en ella de manera que se satisfaga la demanda de cada cliente, que no se rebase la capacidad de producción de cada planta, se tome en consideración los costos fijos asociados a cada planta, y los costos variables asociados a cada combinación de planta y cliente.

Existe un conjunto de variables continuas para representar la cantidad a producir, otro de variables binarias para activar el costo fijo de una instalación en el caso de que se utilice. Para utilizar este modelo, se requiere determinar los costos unitarios de transporte (fabrica, cliente) y los fijos de una instalación. La producción iguala a la demanda.

Variables y parámetros:

Notación	Representa	Tipo
z_{ij}	Cantidad a producir en la fábrica i para enviarse al cliente j.	Variable (continua)
x_i	Si se selecciona la fábrica i.	Variable (binaria)
g_{ij}	Costo unitario de envío desde la fábrica i al cliente j.	Parámetro
f_i	Costo fijo de la operación de la fábrica i.	Parámetro
d_j	Demanda del cliente j.	Parámetro
M_i	Cantidad muy grande asociada a cada fábrica i.	Parámetro

Formulación:

$$\begin{aligned}
 \text{Min } z &= \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n g_{ij} z_{ij} + \sum_{i=1}^m f_i x_i \\
 \text{s.a} \\
 \sum_{i=1}^m z_{ij} &= d_j, \quad \forall j \\
 \sum_{j=1}^n z_{ij} &\leq M_i x_i, \quad \forall i \\
 z_{ij} &\geq 0, \quad \forall i, j \\
 x_i &\in (0, 1), \quad \forall i
 \end{aligned}$$

Datos del modelo:

$$\text{Cantidad de variables} = m(n + 1)$$

$$\text{Cantidad de restricciones} = 2m + n$$

MODELO II

Título: Planeación de requerimientos de materiales, MRP (Woodruff, 2006)

Objetivo: Maximizar el aplazamiento de la producción, sin que se incurra en incumplimiento.

Comentarios: Se trata de determinar *cuánto* y *cuándo* comenzar a producir unidades SKU (*stock keeping unit*) para cada producto, de manera que se satisfaga la demanda a tiempo y se produzca

un tamaño mínimo de lote. No tiene restricciones de capacidad, por lo que el programa resultante no se asegura que sea factible.

El modelo considera la producción de más de un tipo de producto, en diferentes periodos de tiempo. Existe un conjunto de variables binarias para asegurar un tamaño mínimo de lote en cada par (producto, periodo). Existe un tiempo de entrega que se debe respetar.

Variables y parámetros:

Notación	Representa	Tipo
x_{it}	Cantidad de SKU del tipo i a producir en el periodo t .	Variable (continua)
δ_{it}	Si se producen SKU del tipo i en el periodo t .	Variable (binaria)
P	Cantidad de bienes diferentes que se producen.	Parámetro
T	Cantidad de horizontes temporales.	Parámetro
$LT(i)$	Tiempo de producción/entrega de un SKU i .	Parámetro
$R(i,j)$	Cantidad de material i para producir una unidad de j .	Parámetro
$D(i,t)$	Demanda externa del SKU del tipo i en el periodo t .	Parámetro
$I(i,0)$	Inventario inicial del SKU del tipo i .	Parámetro
$LS(i)$	Tamaño mínimo de lote para el SKU del tipo i .	Parámetro
M	Cantidad muy grande.	Parámetro

Formulación:

$$\begin{aligned}
 \text{Max } z &= \sum_{i=1}^P \sum_{t=1}^T (T-t)x_{it} \\
 \text{s.a} \\
 \sum_{\tau=1}^{t-LT(i)} x_{i\tau} + I(i,0) - \sum_{\tau=1}^t \left[D(i,\tau) + \sum_{j=1}^P R(i,j)x_{j\tau} \right] &\geq 0, \quad \forall i,t \\
 x_{it} - \delta_{it}LS(i) &\geq 0, \quad \forall i,t \\
 M\delta_{it} &\geq x_{it}, \quad \forall i,t \\
 x_{it} &\geq 0, \quad \forall i,t \\
 \delta_{it} &= (0,1), \quad \forall i,t
 \end{aligned}$$

Datos del modelo:

$$\begin{aligned} \text{Cantidad de variables} &= 2PT \\ \text{Cantidad de restricciones} &= 4PT \end{aligned}$$

MODELO III

Título: Planeación de recursos de manufactura, MRP II (Yves Pochet, 2006)

Objetivo: Minimizar el costo total de producción para los periodos considerados, el cual se compone del costo unitario de producir, el costo de mantener en inventario, el costo fijo de preparación de la instalación y el costo de demanda insatisfecha.

Comentarios: Se trata de determinar *cuánto y cuándo* producir, *cuánto y cuándo* almacenar en inventario, *en qué* periodo producir cada tipo de bien y *cuánta* demanda dejar insatisfecha en cada periodo. De manera que se asegure que no se rebase la capacidad de producción de cada bien para cada periodo y que sólo un tipo de bien se produzca en cada periodo.

Existen tres conjuntos de variables para representar la producción, almacenaje y demanda insatisfecha en cada periodo. Adicionalmente otro conjunto de variables binarias para activar un costo de preparación y que en cada periodo se produzca un solo tipo de producto.

Variables y parámetros:

Notación	Representa	Tipo
x_t^i	Cantidad a producir del bien i en el periodo t .	Variable (continua)
s_t^i	Cantidad a almacenar del bien i durante el periodo t .	Variable (continua)
r_t^i	Cantidad no satisfecha del bien i en el periodo t .	Variable (continua)
y_t^i	Representa si se va a producir el bien i en el periodo t .	Variable (binaria)
p_t^i	Costo unitario de producir el bien i en el periodo t .	Parámetro
h_t^i	Costo unitario de mantener el bien i en inventario durante el periodo t .	Parámetro
b_t^i	Costo unitario de no satisfacer la demanda del bien i en el periodo t .	Parámetro
q_t^i	Costo de preparación para la producción del bien i en el periodo t .	Parámetro
d_t^i	Demanda del bien i en el periodo t .	Parámetro
C_t^i	Capacidad de producción del bien i durante el periodo t .	Parámetro

Formulación:

$$\begin{aligned}
 \text{Min } z &= \sum_{i,t} p_t^i x_t^i + \sum_{i,t} h_t^i s_t^i + \sum_{i,t} b_t^i r_t^i + \sum_{i,t} q_t^i y_t^i \\
 \text{s.a} \\
 s_{t-1}^i - r_{t-1}^i + x_t^i &= d_t^i + s_t^i - r_t^i, \quad \forall i, t \\
 x_t^i &\leq C_t^i y_t^i, \quad \forall i, t \\
 \sum_i y_t^i &\leq 1, \quad \forall t \\
 s &\in \mathbb{R}_+^{m(n+1)} \\
 r, x &\in \mathbb{R}_+^{mn} \\
 y &\in \{0,1\}^{mn}
 \end{aligned}$$

Datos del modelo:

$$\begin{aligned}
 \text{Cantidad de variables} &= 4it + i \\
 \text{Cantidad de restricciones} &= 3it + t
 \end{aligned}$$

MODELO IV

Título: Secuenciación de trabajos, (Pinedo, 2005)

Objetivo: Minimizar el tiempo que toma la producción de una secuencia de trabajos.

Comentarios: El modelo determina *en qué tiempo* se debe comenzar la producción de un trabajo, de manera que se sea factible con respecto a los tiempos que consume cada operación, que no sobrepase un tiempo máximo y que las operaciones se realicen siguiendo una secuencia.

Se utiliza un conjunto de variables continuas y se asegura que la diferencia entre los tiempos de cada par (máquina, trabajo) sean del tamaño suficiente para la realización de la orden de trabajo.

Variables y parámetros:

Notación	Representa	Tipo
y_{ij}	Tiempo de inicio de la operación en la máquina i, para realizar el trabajo j.	Variable (continua)
p_{ij}	Tiempo que toma la máquina i en realizar el trabajo j.	Parámetro
C_{max}	Longitud de tiempo que toma la producción de una secuencia de trabajos.	Parámetro

Formulación:

$$\begin{aligned} & \text{Min } z = C_{max} \\ \text{s.a} & \\ & y_{hj} - y_{ij} \geq p_{ij}, \quad \forall i, j \in A \\ & C_{max} - y_{ij} \geq p_{ij}, \quad \forall i, j \in N \\ & y_{ij} - y_{ik} \geq p_{ik}, \quad \forall (i, k) \text{ y } \forall (i, j) \\ & y_{ij} \geq 0, \quad \forall i, j \in N \end{aligned}$$

Datos del modelo:

$$\begin{aligned} & \text{Cantidad de variables} = ij \\ & \text{Cantidad de restricciones} = 5ij \end{aligned}$$

2.3 COMPLEJIDAD COMPUTACIONAL

La complejidad computacional se define como una función que expresa el crecimiento en esfuerzo computacional (# operaciones elementales) que requiere un algoritmo para converger a una solución óptima del problema (Flores, 1999). Se toma a partir del peor de los casos, de manera que representa la cota máxima de esfuerzo para encontrar una solución.

En ocasiones la complejidad computacional se define a través del tiempo que requiere un algoritmo para converger al óptimo; se considera que el tiempo es una función lineal del número de operaciones elementales, es decir, que el tiempo es proporcional al número de operaciones. Por lo tanto ambas medidas se considera que son equivalentes para este propósito, aunque en rigor diferentes operaciones elementales requieren de tiempos diferentes para ser ejecutadas.

La clasificación de los problemas de acuerdo con su complejidad es la siguiente (Flores, 1999):

- ⊕ Problemas indecidibles: aquellos para los que no es posible escribir un algoritmo de solución.
- ⊕ Problemas intratables: aquellos que solo pueden ser resueltos con algoritmos que toman un tiempo acotado exponencialmente para encontrar la solución.
- ⊕ Problemas NP: son aquellos que *potencialmente* se pueden resolver en tiempo polinomial si se conoce la dirección de búsqueda que minimice las iteraciones, pero que en general los algoritmos tardan tiempos exponenciales.

- ⊕ Problemas P: son aquellos en que existe un algoritmo que tarda un tiempo polinomial en resolverlo.

Es importante mencionar que si un problema sólo puede ser resuelto por un algoritmo en tiempo exponencial, entonces no es de utilidad para la solución de problemas reales. En la formulación de un problema real la cantidad de variables puede crecer con mucha facilidad al incorporar más elementos al modelo, lo cual ocurre con frecuencia. El tiempo requerido para la solución del modelo crecería de forma exponencial haciéndolo inviable como herramienta para la toma de decisiones.

2.3.1 ALGORITMO SÍMPLEX

Conforme la programación lineal se consolidaba como una herramienta eficiente para la solución de problemas que involucran una gran cantidad de decisiones, su uso se extendió hacia problemas más diversos en cuanto a estructura, en consecuencia, se desarrollaron nuevos algoritmos de solución. De manera natural, surgió la necesidad de comparar los diversos algoritmos para determinar su eficiencia, es por ello que surge la complejidad computacional como una métrica de eficiencia de un algoritmo para localizar una solución óptima (Bazaraa, 2011).

El funcionamiento del algoritmo símplex es a través de desplazamientos entre vértices, seleccionando aquellos que son adyacentes al vértice actual. Por lo tanto se desplaza a través de las aristas del poliedro hasta que la solución encontrada cumple con el criterio de optimalidad (óptimo) y de factibilidad.

Considerando que existen m restricciones y n variables, la cantidad de vértices que tiene el poliedro generado que representa el espacio de soluciones es:

$$C_m^n = \frac{n!}{m!(n-m)!}$$

En un caso extremo, el símplex recorrerá esa cantidad de vértices, se puede demostrar que es siempre mayor que:

$$C_m^n = \frac{n!}{m!(n-m)!} > \left(\frac{n}{m}\right)^m$$

Entonces, se considera que el algoritmo símplex es de complejidad exponencial, sin embargo, la gran difusión y empleo del símplex radica en que en la práctica se comporta como un algoritmo acotado polinómicamente, esto es así debido a que el símplex difícilmente recorre todas los vértices del poliedro. Se ha observado que la complejidad del símplex en la práctica es $O\left(\frac{3}{2}mn\right)$.

En 1971 Victor Klee y George Minty construyeron una clase de problemas de programación lineal para la cual el algoritmo requiere $2^n - 1$ iteraciones, recorriendo todos los vértices del problema (Bazaraa, 2011).

El problema es el siguiente:

$$\text{Max } z = \sum_{j=1}^n y_j$$

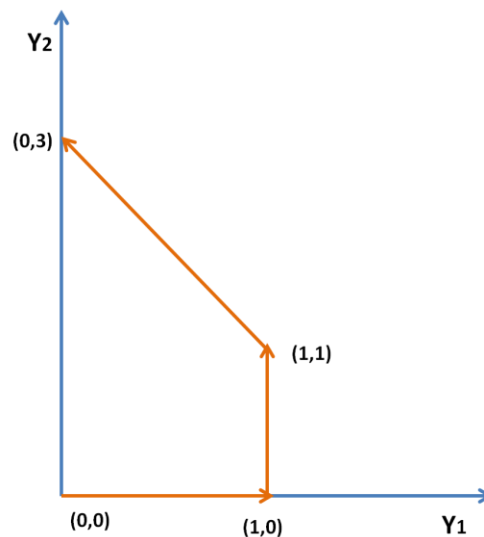
s.a

$$y_1 \leq 1$$

$$y_j + 2 \sum_{k=1}^{j-1} y_k \leq \theta^{j-1} \quad \forall j = 2, \dots, n$$

$$y_i \geq 0 \quad \theta \in (2, \infty)$$

Fig. 2.1 Ilustración para el caso de $n=2$



En la figura 2.1 se observa que el método símplex recorre todos los vértices de la región factible para llegar al punto óptimo, sin embargo es posible que en la primera iteración elija como variable de entrada y_2 y se resuelva en una sola iteración, de lo contrario requerirá tres.

El corte resultante se añadirá como una restricción adicional al programa y se regresa al paso 1.

Comentarios

Para cada nuevo corte, se tiene que resolver de nuevo el programa lineal asociado. Es decir, el problema se resuelve tantas veces como cortes se encuentren.

Si la tabla inicial no contiene todos sus coeficientes enteros, no se garantiza la convergencia del algoritmo debido a los redondeos.

Es un algoritmo de plano de corte, cuyo funcionamiento se dirige a acotar el poliedro de soluciones por medio de hiperplanos sin eliminar una solución entera.

Título

Algoritmo dual fraccionario mixto

Procedimiento

Paso 1. Se resuelve el programa entero mixto como uno lineal (solución relajada). Si la solución relajada es infactible, también lo es la solución al programa entero mixto. Si la solución relajada es entera para las variables restringidas a enteros, termina, en caso contrario pasar a 2.

Paso 2. Seleccione un renglón asociado a una variable básica entera que tenga un valor fraccionario. A partir de ella derive un corte, el cual se agregará a la tabla óptima relajada, la cual será infactible.

Paso 3. Utilice el algoritmo dual simplex lexicográfico para encontrar la nueva solución factible. Si la nueva solución es no acotada, entonces el programa entero mixto es infactible. Si la nueva solución es entera en las variables enteras, termine. En caso contrario regrese a 2.

Comentarios

La forma del corte es la siguiente:

$$x_{n+m+k} = -f_{v_0} + \sum_{j=1}^n (-g_{vj})(-x_j) \geq 0$$

Donde:

$$g_{vj} = \begin{cases} a_{vj}, & \text{si } a_{vj} > 0 \text{ y } x_j \text{ continua} \\ \frac{f_{v0}}{f_{v0} - 1} a_{vj}, & \text{si } a_{vj} < 0 \text{ y } x_j \text{ continua} \\ f_{vj}, & \text{si } f_{vj} \leq f_{v0} \text{ y } x_j \text{ entera} \\ \frac{f_{v0}}{1 - f_{v0}} (1 - f_{vj}), & \text{si } f_{vj} > f_{v0} \text{ y } x_j \text{ entera} \end{cases}$$

Para cada nuevo corte, se tiene que resolver de nuevo el programa lineal asociado. Es decir, el problema se resuelve tantas veces como cortes se encuentren.

Es un algoritmo de plano de corte, cuyo funcionamiento se dirige a acotar el poliedro de soluciones por medio de hiperplanos sin eliminar una solución entera.

Título Algoritmo dual entero puro

Procedimiento

Paso 1. Se comienza con una tabla con todos los coeficientes enteros, que tenga una solución lexicográfica dual factible. Pasar a 2.

Paso 2. Seleccionar un renglón primal infactible llamado v ($a_{v0} < 0$, $v \neq 0$). Si no lo hubiera, entonces la solución es entera y óptima y termina. En caso contrario pasar a 3.

Paso 3. Designar una columna pivote α_p ($p = 1, \dots, n$) que sea la lexicográficamente menor de todas las columnas que tengan $a_{vj} < 0$. Si no lo hubiera, entonces no hay solución entera factible y termina. En caso contrario pasar a 4.

Paso 4. A partir de v , derive una nueva desigualdad que sea toda entera y que no sea factible para el problema primal. Debe tener un coeficiente -1 en la columna α_p . Agregue la nueva restricción al final de la tabla anterior y ejecute el algoritmo dual simplex, regrese a 2.

Comentarios

La forma del corte es la siguiente:

$$x_v = a_{v0} + \sum_{j=1}^n a_{vj}(-x_j)$$

$$x' = \left[\frac{a_{v0}}{\lambda} \right] + \sum_{j=1}^n \left[\frac{a_{vj}}{\lambda} \right] (-x_j) \geq 0$$

Comentarios

Con este método existe la posibilidad de ciclaje para cierto tipo de problemas.

Existe una versión llamada algoritmo primal simplificado el cual en ocasiones converge al óptimo en un menor número de iteraciones.

Título Ramificación y acotamiento

Procedimiento general

Paso 1. Resolver el problema entero como uno lineal (relajado), si la solución es entera y es la mejor obtenida hasta el momento y no existen otros nodos por explorar, termina. En caso contrario pasar a 2.

Paso 2. Ramificar la solución relajada de acuerdo con alguna regla de ramificación. Si no es posible ramificar, entonces el problema entero es infactible, en caso contrario pasar a 3.

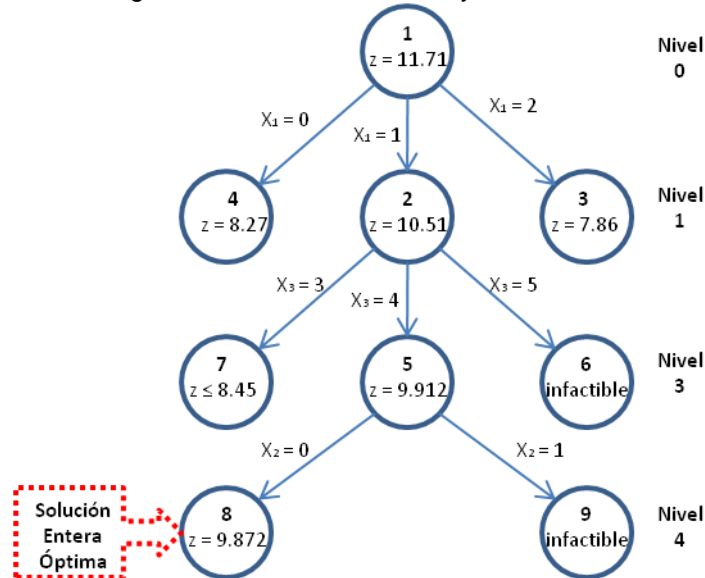
Paso 3. Para cada nuevo nodo determinar su cota inferior (*minimización*) o superior (*maximización*) sobre la función objetivo. Seleccionar un nodo no infactible y no explorado y pasar a 1.

Comentarios

El algoritmo se puede entender mejor si se representa como un árbol en el que se comienza con un problema inicial relajado, a partir del cual se derivan los subsecuentes problemas. Cada nodo representa un nuevo problema relajado que contiene una restricción adicional a las anteriores en el árbol. Cada rama representa una relación de precedencia, es decir que los nodos subsecuentes se derivan de los primeros.

En la figura 2.2 se ilustra el procedimiento del algoritmo general de ramificación y acotamiento, que consiste en derivar problemas nuevos a partir de las soluciones anteriores hasta encontrar aquella que sea entera y que garantice la optimalidad. (Salkin, 1989).

Fig. 2.2 Árbol de ramificación y acotamiento



Se observa que el crecimiento del árbol se puede describir como un problema combinatorio finito, lo cual implica que el crecimiento del problema no es infinito, pero al mismo tiempo, que la cantidad de subproblemas derivados puede ser excesivamente grande. Explorar exhaustivamente todos los nodos de un árbol es impráctico debido al tiempo y memoria que este método requiere. Por ello es que se han desarrollado estrategias para la selección y exploración de nodos.

A continuación se describe el procedimiento de dos algoritmos que utilizan la idea de ramificación y acotamiento para resolver programas enteros: algoritmo de Land y Doig y el algoritmo de Dakin.

Título Algoritmo Land y Doig (ramificación y acotamiento)

Procedimiento

Sea S_j el conjunto de nodos en la ramificación j ($j = 0, 1, \dots, n_1$).

Paso 0. El primer nodo es la solución óptima de $P(0)$, denotada por z^0 . Si esta solución satisface también a $P(n_1)$, entonces se tiene la solución óptima del programa entero y termina. En caso contrario pasar a 1.

Paso 1. Se ramifica hacia 2 nodos en S_1 (o en S^*). Se evalúa z en ellos, es decir, se resuelven los nuevos problemas lineales si están en S_1 . Si están en S^* no necesitan calcularse.

Paso 2. Si los nodos z^0, z^1, \dots, z^{k-1} ya se han etiquetado, el nodo cuya z es la más alta (excluyendo a z de S^*), se etiqueta como z^k .

Paso 3. Si la solución de z^k contiene todas sus variables enteras, entonces es la óptima para el programa entero, lo cual implica que se ha etiquetado algún nodo de S_{n1} . En caso contrario se genera un nuevo arco que parte de z^k y termina en algún elemento del conjunto S_j (como z^k) o en S^* . Cabe aclarar que si el nuevo nodo pertenece a S_j , su z asociada, debe ser menor o igual a z^k .

Paso 4. Se generan dos arcos a partir de z^k hacia dos nodos de S_{j+1} o hacia S^* . Si dichos nodos pertenecen a S_{j+1} , entonces la z asociada a ellos es menor o igual a z^k . Regresar al paso 2.

Comentarios

Los nodos etiquetados forman una sucesión de cotas superiores no crecientes en el valor de z de la solución final. Los valores de z en los nodos no etiquetados que pertenecen a S_j , no pueden ser mayores (*maximización*) o menores (*minimización*) que z^k . El algoritmo garantiza la convergencia al óptimo siempre que éste exista.

Éste algoritmo también se puede utilizar para resolver programas enteros mixtos, sin embargo es muy costoso desde el punto de vista computacional porque requiere mucha memoria para almacenar la información de cada nodo.

Título

Algoritmo de Dakin (ramificación y acotamiento)

Procedimiento

Paso 1. Resolver el programa entero como uno lineal, si la solución es entera, terminar. En caso contrario pasar a 2.

Paso 2. Se escoge arbitrariamente una variable básica cuyo resultado sea fraccionario: $x_j = k + f_j$, en donde f_j es la parte fraccionaria del resultado.

Paso 3. Se generan 2 problemas nuevos con la restricción adicional de $x_j \leq k$ el primero, y el segundo con $x_j \geq k + 1$. Se resuelven y se pasa a 4.

Paso 4. De las soluciones relajadas de los nuevos problemas, se elige aquella que no sea infactible y que tenga una función objetivo más alta (*maximización*) o más baja (*minimización*). Pasar a 1.

Comentarios

Este algoritmo genera una menor cantidad de problemas derivados a partir del original. Es aplicable a programas lineales y no lineales.

Siempre el algoritmo terminará en una de dos posibilidades mutuamente excluyentes: solución óptima entera o infactibilidad. Debido a que se selecciona arbitrariamente la variable entera que se va a acotar en cada nivel de la ramificación, es posible que exista más de un árbol asociado a un programa entero.

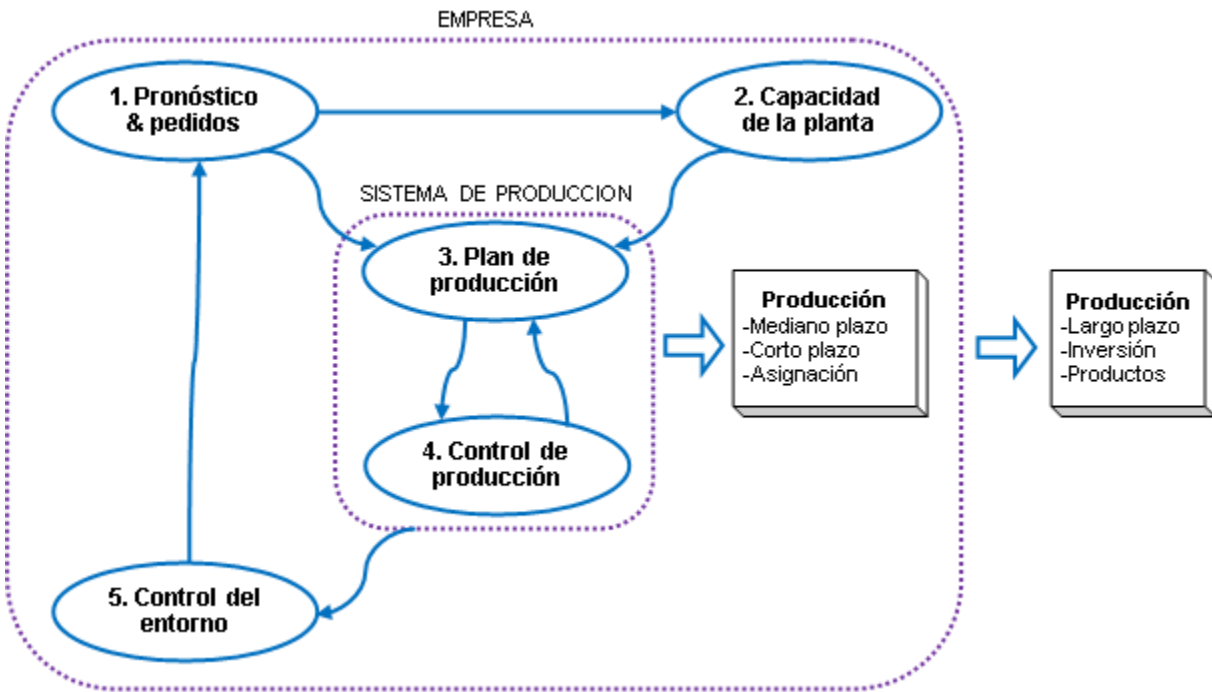
CAPÍTULO III

METODOLOGÍA PROPUESTA

CAPÍTULO III. METODOLOGÍA PROPUESTA

Con la base en la información proveniente de los dos capítulos anteriores, se formula una metodología para la planeación de la producción, la cual consta de 5 fases, a continuación se muestra un diagrama (figura 3.1) y más adelante se comenta cada una de ellas.

Fig. 3.1 Metodología propuesta de planeación de la producción



Esta metodología toma como base la revisada en el capítulo 1 y también toma en consideración algunas ideas cibernéticas sobre el control en sistemas complejos. Se inicia en: 1. Pronósticos & pedidos, aquí se determina una estimación de producción por producto para el mediano y largo plazo. La función de esta fase consiste en determinar una dirección en cuanto a la producción. 2. Capacidad de la planta, aquí se determina si existe capacidad suficiente para cumplir con el nivel de ventas estimado, así como las estrategias a implementar en caso de que no. 3. Plan de producción, en esta fase se determina un programa de producción para el mediano y corto plazo; así como la asignación de cargas de trabajo. 4. Control de producción, esta fase representa la retroalimentación que el sistema productivo tiene consigo mismo, es decir, regular su comportamiento de suerte que se cumplan los programas de producción. Y 5. Control del entorno, esta fase también es de retroalimentación pero con el entorno, para asegurar que la producción es adecuada al comportamiento que exhibe aquel, garantizando la viabilidad de todo el sistema (empresa).

3.1 PRONÓSTICO & PEDIDOS

3.1.1 OBJETIVO

Ofrecer una estimación sobre el nivel de ventas por producto en un periodo de mediano y largo plazo.

3.1.2 DESCRIPCIÓN

En esta fase se debe elegir en primer lugar el tipo de modelo de pronóstico que sea más adecuado de acuerdo con las características del producto de que se trate. Éste puede ser cualitativo, cuantitativo o una combinación de ambos.

3.1.3 HERRAMIENTA

Serie de tiempo. Es indispensable el uso de un modelo cuantitativo para el mediano plazo debido que es necesario expresar la estimación de ventas numéricamente. Para ver un listado de modelos cuantitativos, ver el capítulo 1. Para el largo plazo se recomienda una combinación entre cuantitativo y cualitativo, una manera puede ser elaborar escenarios (cualitativo) y evaluar una tendencia en cada uno de ellos (cuantitativo).

Se deberán seguir los siguientes pasos:

1. Determinar los productos a pronosticar
2. Determinar el horizonte específico de tiempo
3. Evaluar diferentes tipos de pronóstico con datos históricos
4. Determinar diferentes medidas de error
5. Seleccionar aquel con los menores errores
6. Realizar el pronóstico
7. Validar el pronóstico seleccionado

3.1.4 ENTRADAS

De acuerdo con el tipo de modelo de pronóstico, las entradas de información serán algunas de las siguientes:

- ⊕ Datos históricos
- ⊕ Opinión de expertos
- ⊕ Órdenes de compra

3.1.5 SALIDAS

Las salidas de esta fase son las siguientes:

- ⊕ Estimación de ventas por tipo de producto para el mediano plazo
- ⊕ Estimación de ventas por tipo de producto para el largo plazo

3.2 CAPACIDAD DE LA PLANTA

3.2.1 OBJETIVO

Determinar si existe capacidad suficiente para alcanzar un nivel de producción que iguale el pronóstico de ventas para el mediano y el largo plazo.

3.2.2 DESCRIPCIÓN

En primer lugar se debe conocer la capacidad de producción de la planta, o una forma de determinarla para diferentes combinaciones de productos. Comparar esta información con la estimación de ventas y determinar porcentualmente el grado de sobreutilización/subutilización de la planta por periodo.

Los posibles casos son los siguientes:

- ⊕ Ventas > Producción, todo el tiempo considerado
- ⊕ Ventas < Producción, todo el tiempo considerado
- ⊕ Ambas, presentándose alternativamente en el periodo considerado

Para cada una de ellas se comentaron algunas estrategias en el capítulo 1.

3.2.3 HERRAMIENTA

Simulación. Debido a que generalmente los tiempos de las operaciones de producción no son deterministas, a que existe una secuencia cambiante de las mismas, a que se presentan fallos en las máquinas, etc. Es recomendable el uso de simulación para entender, describir y predecir un sistema complejo como lo es una línea de producción.

Los siguientes, son los pasos utilizados construir un modelo de simulación:

1. Definición del sistema
2. Formulación del modelo
3. Recolección de datos
4. Selección del software
5. Verificación y Validación

3.2.4 ENTRADAS

Las entradas a esta fase de la metodología, son las siguientes:

- ⊕ Listado y precedencia de las operaciones
- ⊕ Tiempos de operación por producto
- ⊕ Estimación de ventas por tipo de producto para el mediano plazo
- ⊕ Estimación de ventas por tipo de producto para el largo plazo

3.2.5 SALIDAS

Las salidas de esta fase son las siguientes:

- ⊕ Capacidad de producción para la combinación de productos prevista
- ⊕ Porcentaje de utilización de la instalación y de la maquinaria
- ⊕ Necesidades de inversión para incrementar la capacidad de producción en el largo plazo

3.3 PLAN DE PRODUCCIÓN

3.3.1 OBJETIVO

Programar la producción por periodo para el horizonte de corto, mediano y largo plazo

3.3.2 DESCRIPCIÓN

Tomando como base la estimación de ventas por producto a mediano plazo y la capacidad de producción, se determina un plan o programa de producción para un periodo de mediano plazo. Dependiendo de las necesidades de la empresa, es posible desagregar el plan en otros de horizonte temporal más corto y que incorporen mayor detalle en la asignación de trabajo.

3.3.3 HERRAMIENTA

Programación Lineal/Entera. Por sus características un programa lineal o entero es adecuado para modelar un sistema en donde existen actividades con recursos compartidos, donde éstos son escasos, y se desea conocer la combinación de producción que mejor desempeño comporte de acuerdo con un criterio de bondad (menor costo, reducir tiempo ocioso, etc.).

El siguiente es el procedimiento que se deberá seguir:

1. Formulación del problema
2. Recolección de datos
3. Formulación del modelo matemático
4. Selección del software para resolverlo
5. Verificación y validación

3.3.4 ENTRADAS

Las entradas a esta fase de la metodología, son las siguientes:

- ⊕ Costo unitario de producción (tiempo regular y extra)
- ⊕ Costo unitario de almacenar y de demanda insatisfecha
- ⊕ Estimación de ventas a mediano plazo
- ⊕ Estimación de ventas a largo plazo
- ⊕ Capacidad de producción de la planta
- ⊕ Cantidad mínima a almacenar en cada periodo

3.3.5 SALIDAS

La salida de esta fase es la siguiente:

- ⊕ Programa de producción para los horizontes considerados

3.4 CONTROL DE PRODUCCIÓN

3.4.1 OBJETIVO

Asegurarse de que la producción se cumpla de acuerdo con el programa previsto.

3.4.2 DESCRIPCIÓN

Esta es una función homeostática interna, que procura mantener el nivel de producción de acuerdo con el programa determinado. En esta fase no se toma en consideración el comportamiento del entorno (pedidos de ventas, cancelaciones, etc.) porque toda la atención se dirige a que el programa se cumpla, cualquier comunicación con el entorno proviene a través de la actualización que se haga al plan de producción en el paso anterior. Aquí se deben establecer subrutinas o estrategias y los casos en que se deben ejecutar, cuando no se estén alcanzando los niveles deseados de producción. Por ejemplo: la asignación de horas extra, reprogramación de la producción, la asignación de prioridades, etc. Se asegura de que el sistema sea viable con respecto a desequilibrios endógenos.

3.4.3 HERRAMIENTA

Indicadores de producción. El control se debe ejercer a través de variables de estado que alerten oportunamente sobre las desviaciones con respecto a lo planeado. Se propone el uso de al menos un indicador de la producción que mida en qué medida la producción de la semana considerada se desvía del programa. El indicador propuesto es el siguiente:

$$I_i = \frac{\text{Producción real del producto } i.}{\text{Producción programada del producto } i.}$$

La empresa deberá determinar un parámetro α tal que el empleo de horas extra o reprogramación se activen cuando:

$$I_i > \alpha$$

Inicialmente se propone que $\alpha = 0.85$

Lo cual implica que el nivel de desviación semanal permitido, que garantiza la factibilidad del programa de producción obtenido en el paso 3, debe ser cuando mucho del 15% de la cantidad programada.

3.4.4 ENTRADAS

La entrada de esta fase es la siguiente:

- ⊕ Programa de producción

3.4.5 SALIDAS

Las salidas de esta fase son las siguientes:

- ⊕ Aviso de reprogramación
- ⊕ Maquila
- ⊕ Asignación de prioridades
- ⊕ Contratación de horas extra

3.5 CONTROL DEL ENTORNO

3.5.1 OBJETIVO

Asegurarse de que el comportamiento de las ventas se ajuste al estimado.

3.5.2 DESCRIPCIÓN

Esta es una función homeostática con relación al entorno. Se busca mantener el sistema viable con respecto a los cambios de estado del entorno. Se debe determinar un conjunto de subrutinas o estrategias que se activen cuando el entorno exhiba cierta desviación con respecto a lo esperado. No todos los atributos de aquel se tomarán en cuenta, las ventas (o el consumo) es la principal variable de estado a controlar. Esta fase tiene la función de vigilar que las ventas se comporten de

acuerdo con lo que se había estimado, con la finalidad de efectuar cambios en el pronóstico y en la producción.

3.5.3 HERRAMIENTA

Indicador de demanda. Se propone el uso de un indicador del nivel de ventas que mida en que medida éstas se están comportando de acuerdo con lo considerado en la estimación. El cual se deberá calcular semanalmente. El indicador propuesto es el siguiente:

$$Vi = \frac{\text{Ventas reales del producto } i.}{\text{Ventas estimadas del producto } i.} - 1$$

La empresa deberá determinar un parámetro β tal que el empleo de horas extra o reprogramación se activen cuando:

$$-b < Vi < b$$

Inicialmente se propone que $b = 0.15$

Lo cual implica que el intervalo de desviación permitido que asegura la factibilidad del programa de producción, debe ser +/- 15% de la cantidad programada.

3.5.4 ENTRADAS

La entrada de esta fase es la siguiente:

- ⊕ Estimación de ventas para el largo plazo

3.5.5 SALIDAS

La salida de esta fase es la siguiente:

- ⊕ Aviso de ajuste de pronóstico
- ⊕ Aviso de ajuste al programa de producción

En el siguiente capítulo se detallarán las características de la empresa seleccionada como caso de estudio para la implementación de esta metodología, así como las operaciones involucradas en el proceso productivo.

CAPÍTULO IV

CASO DE ESTUDIO

CAPÍTULO IV. CASO DE ESTUDIO

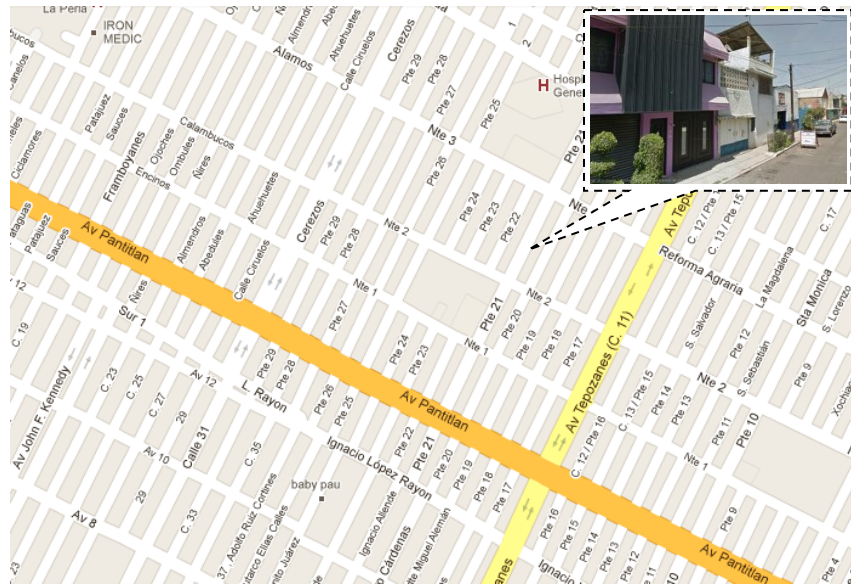
4.1 GENERALIDADES DE LA EMPRESA

La empresa seleccionada es una tenería que adicionalmente a las actividades propias de su giro, se ha dedicado a la fabricación de algunos artículos de piel. Entre ellos se encuentran cinturones, mochilas, carteras, protectores de celular, etc. El sector al que pertenece es el de *cuero y calzado*. Está considerada como una microempresa de acuerdo con la Secretaría de Economía.¹ El principal negocio de la empresa ha sido el curtido y venta de pieles y cueros, sin embargo desde hace aproximadamente un año, decidió incursionar en el mercado de zapato de descanso, es esta decisión lo que motiva la presente investigación, sin embargo, los detalles específicos de la problemática que esto le ha ocasionado se comentarán más adelante.

Se encuentra ubicada en el siguiente domicilio:

No. 14 de la calle Poniente 21, colonia La Perla Reforma, municipio Ciudad Nezahualcóyotl, Estado de México

Fig. 4.1 Domicilio de la empresa



En la figura 4.1 se muestra el domicilio de la empresa en un mapa de la zona y una fotografía de la fachada.

¹ Microempresa: aquella que tiene 10 o menos trabajadores o que tiene ventas anuales menores a 4 millones de pesos.

4.1.1 ANTECEDENTES

La empresa inició operaciones en el año 2000, el fundador se encontraba trabajando en una tenería y decidió salirse para formar su propio negocio. Con el paso de los años fue creciendo su presencia en el mercado de esa región así como la inversión en el negocio. Actualmente la empresa cuenta con un taller ubicado en el domicilio arriba señalado y con una bodega en otro municipio del mismo estado.

La fabricación de otros productos se empezó a realizar para aprovechar las pieles o fracciones de ellas que no lograban vender. De este modo se empezó a adquirir la herramienta necesaria para realizar este tipo de trabajo.

4.1.2 PRODUCTOS

Los productos que fabrica esta empresa son los siguientes:

- ⊕ Piel y cuero²
- ⊕ Zapato de descanso
- ⊕ Cinturones y correas
- ⊕ Mochilas y bolsos
- ⊕ Carteras y monederos
- ⊕ Pulseras
- ⊕ Porta celulares

De los cuales, los zapatos de descanso son el producto más importante como porcentaje de ventas (60% aproximadamente) y también el que presenta mayor crecimiento. En la figura 4.2 se observan los productos que se realizan en la empresa.

Fig. 4.2 Gama de productos



² Existe una sutil diferencia entre ambos, se llama *piel* al producto del curtido que conserva el pelaje natural del animal; se llama *cuero* cuando deliberadamente éste es removido.

4.1.3 MAQUINARIA

La empresa cuenta con la siguiente maquinaria:

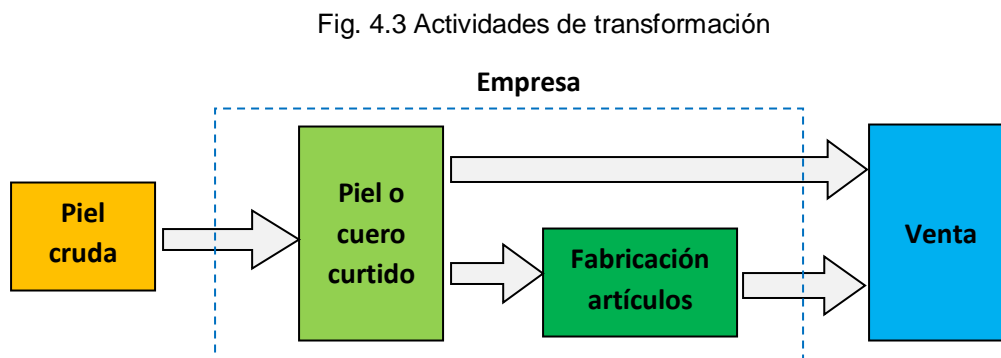
- ⊕ Máquina cortadora (1 pieza)
- ⊕ Máquina rebajadora (1 pieza)
- ⊕ Martilladora (1 pieza)
- ⊕ Máquina de coser (2 piezas)
- ⊕ Horno (1 pieza)

4.1.4 PROVEEDORES Y CLIENTES

La empresa tiene como proveedores principales de materia prima a dos negocios ubicados en el municipio de Toluca que le suministran las pieles crudas de puerco y de ternera. Existe también otro proveedor del estado de Puebla que les suministra pieles de borrego.

La empresa tiene dos tipos de clientes: empresas artesanales y usuarios finales. A las empresas artesanales les vende las pieles y cueros curtidos, la mayoría localizadas en el centro de la Ciudad de México dedicadas a la elaboración de productos artesanales. La venta al usuario final se lleva a cabo a través de una pequeña tienda localizada en el mismo taller, y a través de ferias artesanales en las cuales participan regularmente.

En el siguiente diagrama se ilustra las actividades productivas de la empresa:



La empresa ha comenzado a centrarse en productos que tengan un mayor valor agregado debido a que obtiene un mayor margen de ganancias, sin embargo, seguirá en el negocio de la tenería (figura 4.3).

4.2 PROBLEMÁTICA

Como se mencionó al inicio de este capítulo, la empresa es principalmente una tenería, dedicada al tratamiento de pieles para su posterior venta, sin embargo, a través de los años ha incursionado en la elaboración de productos con un mayor valor agregado. Por dos motivos principalmente: 1) Para aprovechar el desperdicio derivado de los cortes de pieles en la elaboración de ciertos productos. 2) Porque mientras más próximo se encuentre del consumidor final dentro de la cadena productiva, mayor es el margen de ganancia; dicho de otra forma: mientras menos intermediarios, mayor ingreso.

Dentro de la gama de productos que ofrece, la empresa ha detectado que el mercado de zapato de descanso es el más promisorio debido a los buenos resultados que ha tenido en elaboración de ésta. A principios del año 2011 comenzó a experimentar realizando los primeros zapatos: diseñando modelos, probando diferentes pieles y pegamentos, etc. A finales de ese mismo año ya tenía identificados un par de modelos que resultaban atractivos y aptos para ser fabricados con la maquinaria de que dispone, los cuales empezó a vender.

Las ventas desde entonces han observado un comportamiento creciente, de acuerdo con la empresa, aunque no es posible respaldar esta afirmación con datos debido a que no había llevado registro de las ventas sino hasta el inicio de la presente investigación. El resto de los productos tienen un nivel de ventas aproximadamente constante.

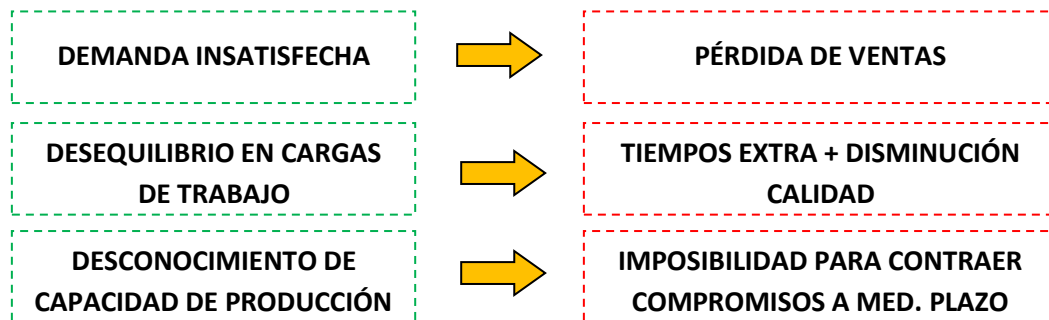
El incremento de pedidos le ha acarreado una serie de problemas. La empresa mantenía una producción intermitente, junto con los zapatos de descanso producían otros productos. La producción se realizaba ciertos días a la semana. Pero ahora es necesaria una planeación de las actividades porque se han presentado los siguientes problemas:

- 1. Demanda insatisfecha.** Es común que no tengan el modelo y/o el número del zapato que el cliente requiere en el momento. Cuando esto ocurre, se establece un tiempo de entrega de 3 días. No siempre el cliente regresa por el pedido, por lo que se pierde una venta.
- 2. Cargas de trabajo desequilibradas.** Existen días en que la producción se realiza todo el día, superando los horarios de trabajo establecidos, en cambio hay otros días en que no se produce. Esto es así porque cuando la empresa recibe un pedido grande o se conjuntan varios pedidos pequeños, la carga de trabajo se intensifica para poder entregar a tiempo. En los días que se decide no producir es debido a que se tiene un nivel de inventario aceptable.
- 3. Desconocimiento de la capacidad de producción.** Existen zapaterías que le han pedido cotizaciones para la venta de grandes volúmenes pero debido a que la empresa no

conoce su capacidad de producción, no está en condiciones de contraer compromisos de esa magnitud a futuro, por el riesgo de no cumplir.

En el siguiente diagrama se puede apreciar la problemática actual de la empresa:

Fig. 4.4 Problemática de la empresa



4.3 SOLUCIÓN PROPUESTA

Se propone la implementación de la metodología de planeación de la producción detallada en el capítulo 3. A continuación se mencionan las actividades a llevar a cabo para cada fase pero antes se comentará la justificación y el alcance de la misma.

4.3.1 JUSTIFICACIÓN

De acuerdo con la problemática exhibida por la empresa, se puede afirmar que es una buena candidata para la implementación de la metodología debido a lo siguiente:

- ⊕ La demanda insatisfecha es consecuencia de un nivel de inventarios que no es suficiente para absorber las variaciones en la misma. Un plan/programa de producción incluye niveles de inventario para los periodos considerados de modo que se considere el costo de no tener.
- ⊕ Las cargas de trabajo desequilibradas son una respuesta inmediata ante un evento no previsto. Con una planeación de la producción se puede preparar el sistema para responder a los requerimientos del entorno, distribuyendo anticipadamente las cargas de trabajo, y en su caso, preveer cuándo es necesaria la contratación de horas extra.
- ⊕ Desconocimiento de la capacidad de producción. Ésta es una consecuencia de la falta de medición de las operaciones. Con el inicio de esta investigación se han comenzado a

cuantificar los tiempos de las operaciones de producción, lo cual es un insumo necesario para cualquier toma de decisión.

4.3.2 ALCANCE

La investigación se limita a las actividades de elaboración de zapatos de descanso. Se excluye el resto de los productos, incluida la tenería por los siguientes motivos:

- ⊕ El propósito de la empresa es dedicarse en un futuro exclusivamente a la venta de zapato de descanso.
- ⊕ La tenería junto con el equipo, herramientas y personal necesario se encuentran ubicados en un espacio físico diferente, en una bodega rentada en otro municipio, por tanto, no existen recursos compartidos y cada uno se maneja de forma independiente
- ⊕ De los modelos de zapato, se elige el que ha tenido mayor éxito en ventas y del cual se tiene más experiencia en su producción. A continuación se incluye una imagen.

Fig. 4.5 Modelo de zapato de descanso seleccionado



- ⊕ El resto de los productos se seguirán produciendo en las horas en que no se produzcan zapatos para aprovechar el tiempo muerto.

4.3.3 PROPUESTA

A continuación se comenta la metodología propuesta con las actividades asociadas a cada etapa de ésta.

1. Pronóstico & pedidos

Se propone la construcción de una serie de tiempo que represente el comportamiento de las ventas. Para ello se llevarán a cabo los pasos mencionados en esta fase de la metodología (ver capítulo 3) y determinar cuál de los modelos es el más idóneo. Debido a que no existen datos históricos para la construcción de un pronóstico a largo plazo, en esta investigación sólo se realizará uno para el mediano plazo. Se dejará en manos de la empresa la construcción de un modelo a largo plazo.

2. Capacidad de la planta

Se propone la construcción de un modelo de simulación para determinar la capacidad máxima de producción del sistema así como un intervalo de producción (confianza) con un nivel de significancia menor a 10%; debido a que las operaciones de producción son estocásticas y existe un orden de precedencia que se debe respetar.

3. Plan de producción

Una vez determinada la capacidad máxima de producción, se propone la construcción de un modelo de programación entera para la determinación de las cantidades a producir y almacenar en un horizonte de 12 semanas.

4. Control de producción

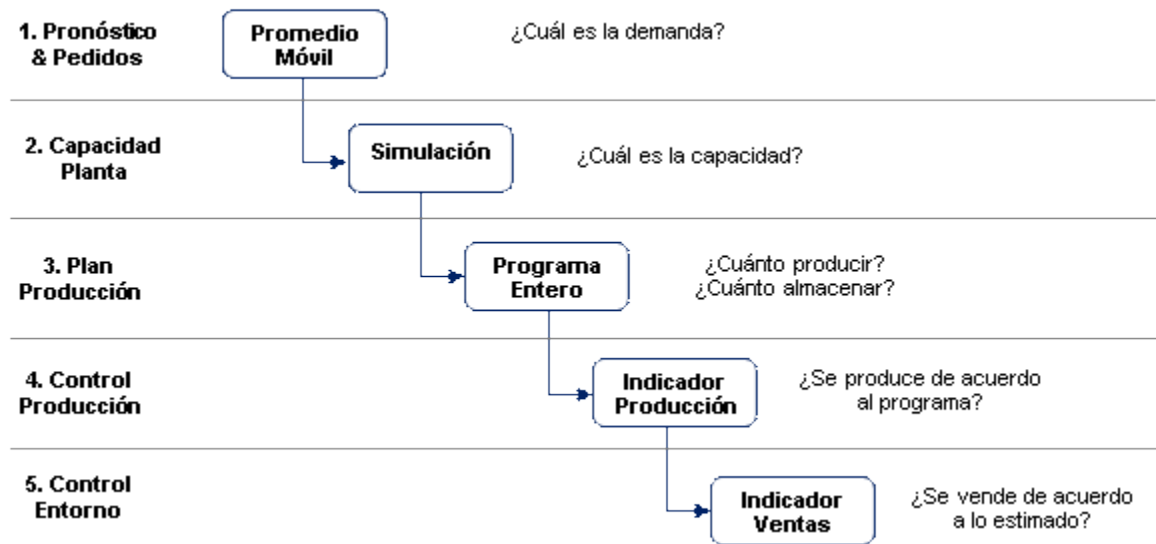
Se propone un monitoreo semanal a través del indicador de producción mencionado en el capítulo 3, para medir el desempeño del sistema como porcentaje de la producción programada. De esta forma se tendrá información oportuna para conocer el estado del sistema y en su caso, realizar reprogramaciones.

5. Control del entorno

Se propone un monitoreo semanal sobre el comportamiento de la demanda con respecto a lo estimado en el pronóstico. Se medirá con base en el indicador de demanda, el cual mide la desviación de las ventas reales como porcentaje del pronóstico de ventas. Si las desviaciones son significativas porcentualmente ($\pm 15\%$), se ajustará el pronóstico.

Se propone la siguiente metodología para la planeación de la producción (figura 4.6). Para cada fase se propone una herramienta de acuerdo con las características que presenta la empresa.

Fig. 4.6 Metodología propuesta de planeación de la producción



A continuación se detalla el proceso de producción.

4.4 PROCESO DE PRODUCCIÓN

Como se mencionó arriba, el producto elegido es un modelo de zapato de descanso que ha tenido buena aceptación en el mercado, existen otros modelos los cuales se excluyen de esta investigación debido a que su diseño todavía está en perfeccionamiento. En adelante se hará referencia al modelo seleccionado como **modelo PA/01**.

En los siguientes párrafos, se detallará lo siguiente:

1. Comportamiento observado de la demanda
2. Listado de operaciones de producción con precedencias
3. Tiempos asociados a cada operación

4.4.1 OPERACIONES DE PRODUCCIÓN

A continuación se presenta una tabla con información relativa a las operaciones de producción del modelo PA/01, la cual se recolectó durante 3 visitas que se hicieron a la empresa. El tiempo de preparación hace referencia a si la máquina utilizada requiere de un ajuste o calibración antes de ser utilizada. El tiempo de operación depende de la pericia del trabajador así como del tamaño del producto, a mayor tamaño, mayor tiempo.

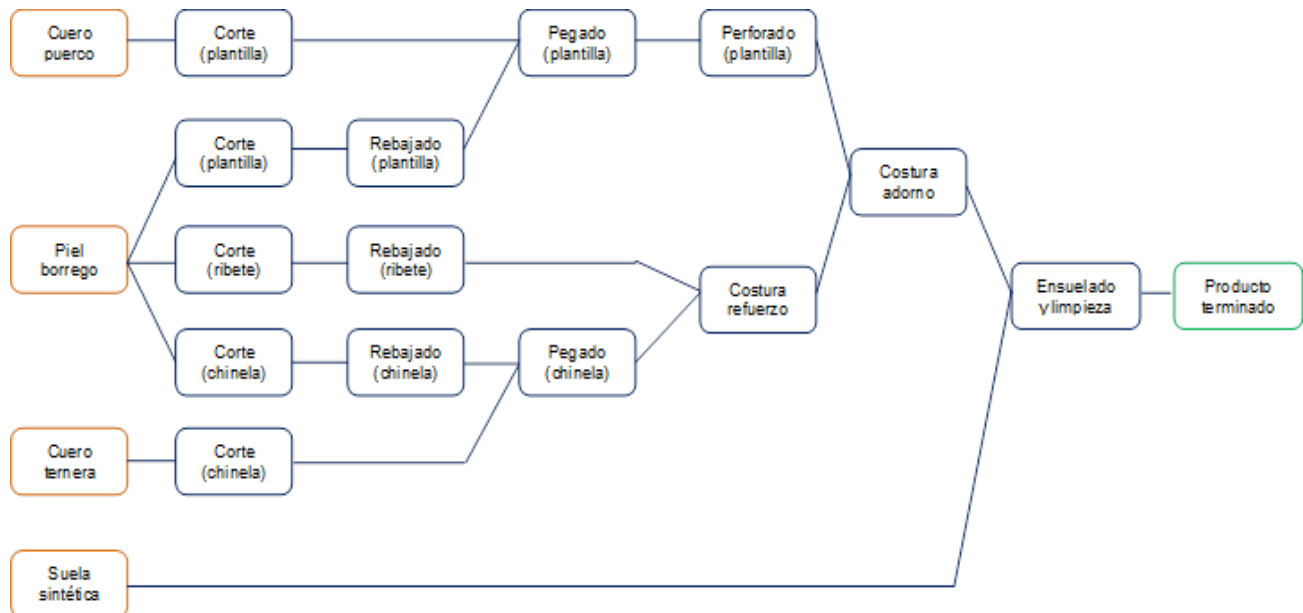
Tabla 4.1 Operaciones de producción del modelo PA/01

No	Operación	Máquina	Tiempo prep. (min)	Tiempo (minutos)		
				Min.	Regular	Max.
1	Corte de plantilla (cuero puerco).	Cortadora	15	2	2.5	4
2	Corte de plantilla (piel borrego).	Cortadora	0	2	2.5	4
3	Corte de ribete (piel borrego).	Cortadora	0	1	1	1
4	Corte de chinela (piel borrego).	Cortadora	0	2	3	4
5	Corte de chinela (cuero ternera).	Cortadora	0	2.5	3	4.5
6	Rebajado de una pieza de borrego.	Rebajadora	5	1	1.5	2
7	Pegado de las dos plantillas.	-	-	4	5.5	7
8	Pegado de las dos chinelas.	-	-	2.5	3.5	6
9	Perforado de orificios en plantilla.	Martillo	0	4	5	6
10	Costura de refuerzo (plantilla y chinela).	Máquina de coser	0	3	3.5	4
11	Costura de adorno sobre zapato.	-	-	6	7	9
12	Ensuelado y limpieza de zapato.	Horno	0	20	20	20

Fuente: Elaboración propia con datos recabados en la empresa.

En el siguiente diagrama se observa el orden de precedencia de las operaciones:

Fig. 4.7 Diagrama de las operaciones de producción



Toda la materia prima (excepto la suela sintética) pasa primero por una operación de marcado y corte de piel, utilizando la máquina cortadora. Existe un tiempo de preparación que consiste en la limpieza de la máquina y en verificar que se encuentra en condiciones de funcionar, esto se realiza únicamente al inicio de la jornada.

Rebajado

Después del corte, a las piezas de borrego se les disminuye el grosor del pelo en la máquina rebajadora. Esto con la finalidad de que presenten un aspecto homogéneo. Existe también un tiempo de preparación de la máquina en el cual se ajusta la altura de la navaja, esto se realiza únicamente al inicio de la jornada.

Pegado

Son dos operaciones, en una se juntan con pegamento la plantilla de puerco y de borrego; y en la otra la chinela de ternera y la de borrego. Este pegamento sirve para mantener unidas las piezas durante el resto del proceso y facilitar las demás operaciones que se hagan sobre ellas.

Perforado

Sobre la plantilla ensamblada de la operación anterior, se realizan orificios sobre el perímetro de la pieza con la máquina martilladora. Éstos sirven como guía para la costura de adorno.

Costura

Existen dos costuras en el producto. La primera es llamada costura de refuerzo y une el ribete con la chinela ensamblada en la operación de pegado. La segunda costura se llama de adorno y une la pieza anterior con la plantilla en una sola pieza. El resultado de la costura de adorno es la pieza terminada pero sin suela.

Ensuelado

El ensuelado consiste en pegar la suela al producto, para ello primero se aplica pegamento a cada pieza y se juntan. Después se ingresan en un horno para que el calor active el pegamento y queden unidas con mayor firmeza. En este horno, existe un espacio suficiente para introducir hasta 3 pares de producto por vez.

CAPÍTULO V

SERIE DE TIEMPO Y SIMULACIÓN

CAPÍTULO V. SERIE DE TIEMPO Y SIMULACIÓN

A continuación se detallan los supuestos, procedimiento, formulación y resultados de los modelos de serie de tiempo y simulación; el primero pronostica la demanda y el de simulación se construyó para determinar la capacidad de producción actual en tiempo normal de operación (12 horas). También se propuso una función para asociar utilidades a niveles de producción.

5.1 MODELO DE SERIE DE TIEMPO

El primer paso de la metodología consiste en realizar una estimación de ventas futuras, tomando como consideración los pedidos que se tengan levantados y el pronóstico de ventas.

Se excluye el pronóstico para el mediano y largo plazo debido a la escasez de datos con que cuenta la empresa. Como se comentó en el capítulo 4, a partir del inicio de esta investigación se comenzó a recabar datos sobre las ventas.

Debido a lo anterior, para la selección del modelo y su validación se tomó la demanda de cada semana y se obtuvo un intervalo de +/-15%. Se supuso una distribución uniforme en dichos intervalos y se generaron números aleatorios para simular demandas semanales. Se realizaron 100 corridas de simulación más la demanda real en dicho periodo para seleccionar el modelo que estadísticamente tuviera el menor nivel de error (tomando como base tres medidas de error) y para asegurar que dicho modelo es válido para diferentes comportamientos de demanda.

Entonces, se decidió realizar un modelo de pronóstico para un horizonte de corto plazo, el cual se detalla en sus aspectos generales a continuación.

5.1.1 SUPUESTOS

- ⊕ Las ventas se considerarán semanalmente
- ⊕ Se considera un único producto: PA/01

5.1.2 PROCEDIMIENTO

El procedimiento seguido es el siguiente:

- 1. Determinar los productos a pronosticar**
 - ⊕ Producto PA/01, en sus diferentes tamaños y colores
- 2. Determinar el horizonte específico de tiempo**
 - ⊕ Corto plazo, de 1 a 12 semanas
- 3. Evaluar diferentes tipos de pronóstico con datos históricos**

Se tomaron las demandas de las últimas 18 semanas. Se eligieron tres tipos de series de tiempo para ser evaluadas:

- a. Promedio móvil
- b. Promedio ponderado
- c. Suavización exponencial

Promedio móvil, se tomaron las últimas 3 demandas para realizar el pronóstico, la fórmula es la siguiente:

$$\text{Promedio móvil} = \frac{\sum \text{Demanda real últimos } n \text{ periodos}}{n}$$

Promedio ponderado, se asignaron a los últimos 3 meses las siguientes ponderaciones (0.5, 0.3, 0.2), comenzando por el mes más reciente.

$$\text{Promedio ponderado} = \sum_{i=1}^n \text{Demanda real}_i * \text{Ponderación}_i$$

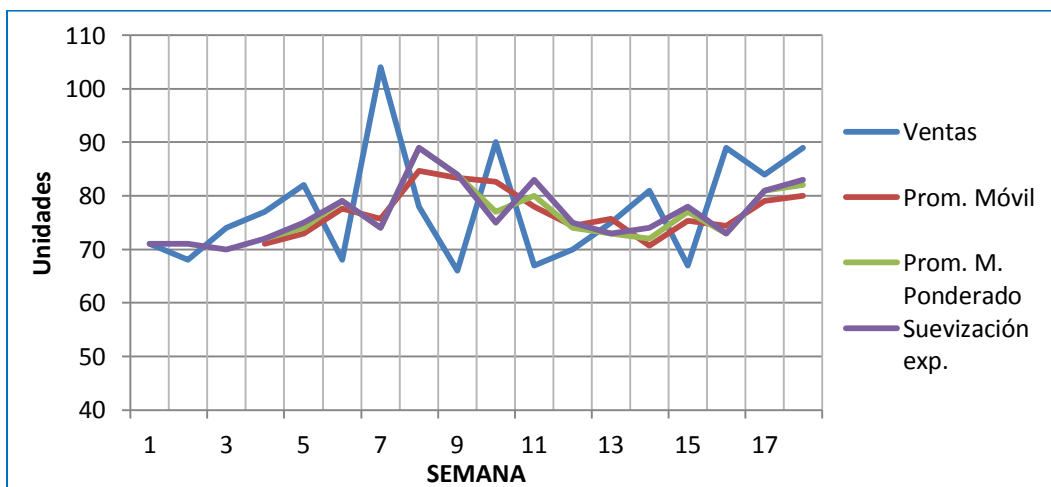
$$\sum_{i=1}^n \text{Ponderación}_i = 1$$

Suavización exponencial, se tomó como parámetro $c=0.5$, el cual fue determinado después de probar con diferentes valores y se eligió éste porque fue el que mejor representó la demanda.

$$\text{Pronóstico}_i = \text{Pronóstico}_{i-1} + c(\text{Demanda real}_{i-1} - \text{Pronóstico}_{i-1})$$

A continuación se presenta una gráfica de las ventas reales y de los diferentes pronósticos considerados: Se observa en color azul las ventas, en rojo y verde los pronósticos del promedio móvil y promedio móvil ponderado. La suavización exponencial aparece en color morado.

Gráfica 5.1 Ventas semanales y pronóstico de ventas



A simple vista no es posible determinar cuál de los modelos de serie de tiempo describe mejor el comportamiento de la demanda. Para ello se requiere el empleo de algunas medidas de error que nos proporcionen información analítica sobre la bondad de cada modelo.

4. Determinar diferentes medidas de error

1. Desviación media absoluta
2. Error cuadrático medio
3. Error porcentual absoluto medio

Desviación media absoluta, se calcula de la siguiente forma:

$$\text{Desviación media absoluta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\text{Demanda}_i - \text{Pronóstico}_i|$$

Error cuadrático medio, se calcula de la siguiente forma:

$$\text{Error cuadrático medio} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\text{Demanda}_i - \text{Pronóstico}_i)^2$$

Error porcentual absoluto medio, se calcula de la siguiente forma:

$$\text{Error porcentual absoluto medio} = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|\text{Demanda}_i - \text{Pronóstico}_i|}{\text{Demanda}_i}$$

5. Seleccionar el modelo con menor error

Una vez realizados los pronósticos con cada modelo de serie de tiempo y calculado los tres indicadores de error, se selecciona el promedio móvil por ser el que más bajo en dichas medidas de error. En la siguiente tabla se puede apreciar los indicadores de error asociados a los modelos de serie de tiempo.

Tabla 5.1 Medidas de error en los modelos de serie de tiempo

Lugar	Modelo	Desviación media absoluta	Error cuadrático medio	Error porcentual absoluto medio
1	<i>Promedio móvil</i>	9.8	134.73	12.2%
3	<i>Promedio ponderado</i>	10.6	160.53	13.3%
2	<i>Suavización exponencial</i>	10.0	149.76	12.6%

6. Validar el método de pronóstico seleccionado

Para validar el modelo y debido a la escasez de datos históricos, se decidió realizar lo siguiente, generar 100 corridas de simulación a partir de un intervalo de +/- 15% de la demanda de cada semana, suponiendo una distribución uniforme. De esta manera se asegura que el modelo seleccionado representa adecuadamente el comportamiento de la demanda en condiciones similares. A continuación se muestra una tabla con los resultados obtenidos, la simulación se realizó en Excel.

Tabla 5.2 Resultados estadísticos de las medidas de error en la simulación de 100 periodos

	Desviación absoluta media				Error cuadrático medio				Error p. absoluto medio			
	Media	Min	Max	%Menor	Media	Min	Max	%Menor	Media	Min	Max	%Menor
Promedio móvil	11.30	8.07	15.33	76%	201.55	88.87	311.60	77%	14.2%	10.0%	19.6%	79%
Error cuadrático medio	12.04	8.00	16.27	1%	225.27	103.47	353.40	1%	15.2%	10.1%	20.4%	2%
Suavización exponencial	11.69	7.18	15.59	23%	214.12	101.41	337.12	22%	14.9%	9.3%	20.5%	19%
				100%				100%				100%

Como se puede apreciar, el promedio móvil resultó menor en el 76% de las corridas de simulación en cuanto a la desviación absoluta media, 77% en el error cuadrático medio y 79% en el error absoluto medio. También es la que tiene una media de error más baja en las tres medidas consideradas y un intervalo de valores más compacto en cada una.

Por lo tanto, se puede afirmar que el promedio móvil modela, estadísticamente, de forma más adecuada el comportamiento de la demanda en el marco de trabajo establecido, con lo cual se puede afirmar que dicho modelo **es válido para describir cualquier demanda en el intervalo de valores considerado.**

En la figura 5.1 se presenta las corridas de simulación de la demanda que se realizó en Excel, por cuestiones de espacio se ocultaron algunas columnas.

Fig. 5.1 Corridas de simulación realizadas en Excel

DEMANDA REAL (semanal)	CORRIDA 1	CORRIDA 2	CORRIDA 3	CORRIDA 4	CORRIDA 10	CORRIDA 20	CORRIDA 30	CORRIDA 40	CORRIDA 50	CORRIDA 60	CORRIDA 70	CORRIDA 80	CORRIDA 90	CORRIDA 100
71	72	76	61	67	70	69	73	69	66	80	80	70	78	74
68	62	77	72	62	67	71	73	74	59	70	70	68	76	76
74	78	75	77	66	70	79	78	68	73	64	81	78	69	64
77	78	72	86	67	79	78	76	83	68	87	69	76	80	69
82	75	78	89	85	88	74	88	73	80	72	86	74	77	71
68	61	76	66	66	61	71	72	68	71	75	66	69	74	68
104	117	103	96	112	99	105	94	89	103	101	102	111	107	116
78	84	89	78	83	88	77	79	68	85	70	72	84	89	82
66	68	61	57	65	63	65	56	62	71	73	57	65	76	61
90	98	102	99	84	87	101	86	96	90	83	98	103	79	86
67	69	72	62	58	76	57	75	59	70	58	59	66	77	63
70	76	69	69	66	64	64	63	62	74	65	66	71	73	65
75	78	84	79	69	64	78	65	75	82	66	69	66	66	69
81	79	86	74	85	77	81	79	81	69	92	92	87	92	74
67	64	67	58	64	76	73	61	76	62	60	70	76	70	69
89	93	94	82	77	83	93	83	97	78	98	101	84	91	80
84	83	80	74	72	83	78	77	93	90	78	74	74	92	73
89	83	98	91	86	77	79	90	88	97	98	81	100	78	85

5.1.3 FORMULACIÓN

La formulación del modelo de pronóstico es la siguiente:

$$Pronóstico\ semanal_i = \frac{1}{3} \sum Demanda\ últimas\ 3\ semanas$$

5.1.4 RESULTADOS

El pronóstico de ventas para las siguientes 12 semanas es el siguiente:

Tabla 5.3 Pronóstico de ventas

Semana	Producto
1	78
2-12	79

A esta cantidad falta agregar los pedidos que la empresa tiene levantados para el periodo considerado, esta información se incorpora en la tabla siguiente:

Tabla 5.4 Estimación de ventas

Semana	Pronóstico	Pedidos	Total
1	78	0	78
2	79	0	79
3	79	0	79
4	79	250	329
5	79	0	79
6	79	0	79
7	79	0	79
8	79	250	329
9	79	0	79
10	79	0	79
11	79	0	79
12	79	250	329

En la última columna aparece la cantidad de ventas estimadas para las siguientes doce semanas, esta información se utilizará para realizar la planeación de la producción semanal.

5.2 MODELO DE SIMULACIÓN

El modelo de simulación fue construido con la finalidad de determinar una capacidad máxima (teórica) de producción en condiciones normales de operación. Por condiciones normales se debe entender turnos de producción de 12 horas en los cuales no se presenta ninguna falla relacionada con la maquinaria, ni ausentismo de trabajadores y existe siempre la materia prima suficiente para la producción.

El modelo de simulación considera todas las operaciones de producción del modelo PA/01, los tiempos asociados a dichas operaciones y el orden de precedencia. Es importante mencionar que los diferentes colores y tamaños del modelo PA/01 no alteran la secuencia de producción.

Los tiempos que toma realizar cada operación dependen del tamaño (número) del producto, así como de la habilidad del trabajador, es por ello que se decidió utilizar distribuciones de probabilidad para modelar las variaciones en los tiempos.

La simulación consistió en imitar o reproducir el funcionamiento del sistema de producción durante un tiempo de 12 horas. Se realizaron 36 réplicas de dicho experimento para obtener resultados susceptibles de ser estudiados estadísticamente.

A partir de información proporcionada por la empresa, se construyó una función de utilidades que tiene como argumento la producción. Con ella se pudo asociar utilidades a niveles de producción.

5.2.1 SUPUESTOS

- ⊕ Sólo se produce el modelo PA/01.
- ⊕ Las diferencias de tamaño o color en el producto, no alteran la secuencia de producción.
- ⊕ Existe siempre materia prima disponible en el taller.
- ⊕ No se presenta falla en ninguna máquina.
- ⊕ No existen tiempos de traslado entre operaciones.

5.2.2 PROCEDIMIENTO

El procedimiento seguido es el siguiente:

1. Definición del sistema

El sistema se compone de los siguientes objetos:

Fuente: la cual genera las piezas de materia prima que serán procesadas a lo largo de la línea de producción con una velocidad suficiente para que siempre exista materia prima disponible para ser procesada en la primera máquina (corte).

Entidades: son las piezas de materia prima que serán transformadas; existen 5 de ellas, las cuales son: plantilla de cuero, plantilla de borrego, ribete de borrego, chinela de borrego y chinela de ternera. Cada pieza tiene un tiempo de operación diferente en la máquina de corte y en la de rebajado.

Servidores: son las unidades de procesamiento de entidades y representan algunas de las operaciones de transformación como son: corte, rebajado, perforado y ensuelado. En cada una de ellas se utiliza una máquina específica para realizar la operación. Corte y rebajado tienen tiempos de operación que dependen del tipo de materia prima (entidad) que estén procesando. La operación de ensuelado procesa por grupos de 3 productos.

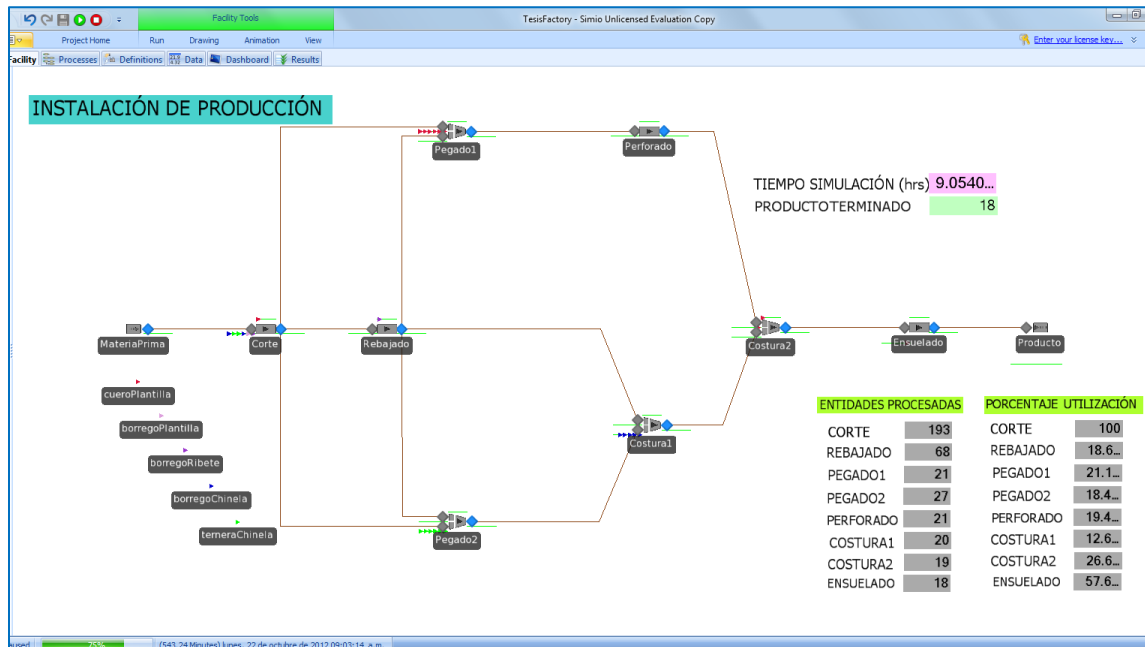
Combinador: se trata de un tipo especial de servidor en el cual se combinan dos entidades para producir un solo componente. Se utilizó para las siguientes operaciones: pegado plantilla, pegado chinela, costura de refuerzo y costura de adorno.

Sumidero: este es el objeto más importante porque representa la cantidad de productos realizados, aquí es donde se destruyen las entidades, una unidad de producto está compuesta por una pieza de cada tipo de entidad.

A continuación se presenta una imagen del modelo construido en Simio, se puede observar que la red sigue una secuencia de operaciones de izquierda a derecha en donde cada nodo representa

una operación. Los objetos que están inconexos en la parte izquierda son las entidades que genera la fuente.

Fig. 5.2 Modelo de simulación en Simio



2. Formulación del modelo

Sobre la formulación se habla más adelante en el punto 5.1.3 Formulación.

3. Recolección de datos

Se recolectaron los siguientes datos:

- ⊕ Demanda. Se llevó un registro semanal de las ventas y pedidos, en total se obtuvieron 18 datos, correspondientes a poco más de 4 meses.
- ⊕ Tiempos de operación. Se tomaron los tiempos que tardaba cada operación en ser terminada.

Los datos de demanda ya se trataron en el punto anterior para determinar un modelo de pronóstico que fuera válido. En cuanto a los tiempos de operación se tomaron datos en campo para determinar si era posible aproximar su comportamiento a un modelo de probabilidad, sin embargo, debido al importante consumo de tiempo que esto implicó, se optó por extraer las siguientes mediciones: tiempo mínimo, tiempo máximo y tiempo más frecuente.

Existen tiempos de preparación para la máquina rebajadora y la cortadora, sin embargo éstos sólo ocurren cuando se cambia la producción a otro tipo de producto como mochila o cartera. Uno de los supuestos de la investigación y del modelo es que la única producción considerada es la del producto PA/01, por lo tanto, dichos tiempos se excluyen también en la construcción del modelo. Los resultados se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 5.5 Tiempos de operación

Operación	Tiempo (minutos)		
	Mínimo	Frecuente	Máximo
Corte (cuero plantilla)	2	2.5	4
Corte (borrego plantilla)	2	2.5	4
Corte (borrego ribete)	1	1	1
Corte (borrego chinela)	2	3	4
Corte (ternera chinela)	2.5	3	4.5
Rebajado	1	1.5	2
Pegado plantilla	4	5.5	7
Pegado chinela	2.5	3.5	6
Perforado	4	5	6
Costura de refuerzo	3	3.5	4
Costura de adorno	6	7	9
Ensuelado	20	20	20

Con estos datos fue posible utilizar la distribución de probabilidad triangular para modelar el comportamiento de los tiempos de las operaciones y su posterior simulación a través de la técnica Monte Carlo. La operación de corte para obtener una pieza de ribete de borrego y el ensuelado son constantes.

4. Selección del software

Se seleccionó el programa Simio debido a que presenta gran sencillez y flexibilidad para la construcción de modelos. También porque es accesible para propósitos académicos a través de una licencia estudiantil.

5. Verificación y validación

La verificación se realizó a través de la construcción de modelos más simples en los que se aseguró el correcto funcionamiento de algunas utilidades de Simio que fueron incorporadas en el modelo final como son: tablas de secuencia, tablas de datos y procesos. Se experimentó cada uno de ellos por separado y después conjuntamente.

Modelo 1. El primer modelo se construyó un sistema compuesto por una fuente, un servidor y un sumidero. Se crearon varios tipos de entidades y se utilizaron tablas de datos para asignar a cada entidad frecuencias de generación diferentes.

Modelo 2. Al modelo 1 se incorporaron tablas de secuencias, las cuales asignan tiempos de operación diferentes para cada entidad. Se tomó nota de los errores que aparecieron y sus causas, para evitar que en el modelo final se presentaran.

Modelo 3. En un modelo nuevo, se construyó un sistema con una fuente, un servidor y un sumidero. Aquí se creó un proceso el cual consiste en retener las entidades en la última operación hasta que su número es igual a 3, y entonces procesarlas. Se vinculó dicho proceso al objeto *ensuelado*, debido a que en esa operación existe un horno que sólo se activa si hay en espera tres pares de producto.

Modelo 4. Al modelo 2 se incorporó el proceso realizado en 3 y se probó su funcionamiento. Una vez detectados y corregidos los errores que se presentaron, se construyó el modelo final.

Adicionalmente, debido a que se trata de un software gráfico, se realizó una inspección visual para asegurar que el comportamiento de las entidades fuera correcto. En particular, esto sirvió para corregir los errores de lógica relacionados con la última operación.

Para la validación se utilizaron los datos históricos de demanda semanal. La producción media obtenida por simulación (véase 5.1.4 resultados) es de 20.66 unidades por turno, es decir 124 unidades semanales. Por otro lado el comportamiento histórico de la demanda tiene una media de 78 unidades, con un mínimo de 66 y un máximo de 104. Es decir:

d_i : Demanda real en la semana i .

X : Producción semanal.

Se sabe que:

$$\frac{1}{18} \sum_{i=1}^{18} d_i = \bar{d} = 78 \text{ unidades}$$

$$\min\{d_i\} = 66 \text{ unidades}$$

$$\max\{d_i\} = 104 \text{ unidades}$$

$$E(X) = 124 \text{ unidades}$$

Se observa que:

$$\frac{\bar{d}}{E(X)} = \frac{78}{124} = 0.629 \cong 63\%$$

$$\frac{\max\{d_i\}}{E(X)} = \frac{104}{124} = 0.838 \cong 84\%$$

El promedio de las ventas constituye un 63% de la capacidad promedio de la instalación, y la semana registrada con un nivel de ventas más alta, representa un 84% de la capacidad. Se debe tomar en cuenta que en las semanas en que se obtuvieron dichas mediciones, la instalación producía otros artículos, los cuales consumían tiempo de operación.

La producción del taller se puede incrementar si se dedica exclusivamente a la fabricación de zapato de descanso. De acuerdo con el administrador, actualmente el tiempo de fabricación dedicado a este producto es del 60%, y el 40% restante se utiliza para realizar otros productos.

Utilizando un regla de tres se puede calcular la producción aproximada semanal, utilizando como datos el promedio semanal de producción real (78 unidades) y el tiempo de fabricación (60%):

$$\text{Producción semanal} = \frac{78}{60\%} * 100\% = 130 \text{ unidades}$$

Dicha cantidad difiere de la obtenida en la simulación en 6 unidades (menos del 5%), con lo cual se tiene información suficiente para afirmar que la producción determinada por la simulación corresponde a la producción esperada en la producción real si se fabricara únicamente el producto considerado, con base en los datos históricos. Por lo tanto, el modelo es válido para el objetivo que se está investigando.

Adicionalmente se realizó un muestreo para determinar con una prueba de hipótesis si existe evidencia para suponer que la media de la producción real es diferente de la obtenida por el experimento de simulación. A continuación se muestra los pasos realizados para la prueba de hipótesis:

1. Determinar la hipótesis que estará a prueba: ¿Existe evidencia para suponer que la media (semanal) de producción real es diferente de 124 unidades?
2. Plantear las hipótesis:
 - i. $H_0: \mu = 124$
 - ii. $H_1: \mu \neq 124$
3. Determinar el estadístico de la prueba:

$$z = \frac{\bar{x} - \mu}{\frac{\sigma}{\sqrt{n}}}$$

4. Determinar el nivel de significancia: $\alpha=0.05$

5. Determinar el intervalo:

$$\bar{x} - z_{\frac{\alpha}{2}} \left(\frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right) < \mu < \bar{x} + z_{\frac{\alpha}{2}} \left(\frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right)$$

6. Calcular la región de rechazo y aceptación:

$$123.14 < \mu < 124.85$$

Región de aceptación: (123.14, 124.85)

Región de rechazo: $(-\infty, 123.14] \cup [124.85, \infty)$

7. Se evalúa el estadístico con el valor de la hipótesis:

$$123.14 < 124 < 124.85$$

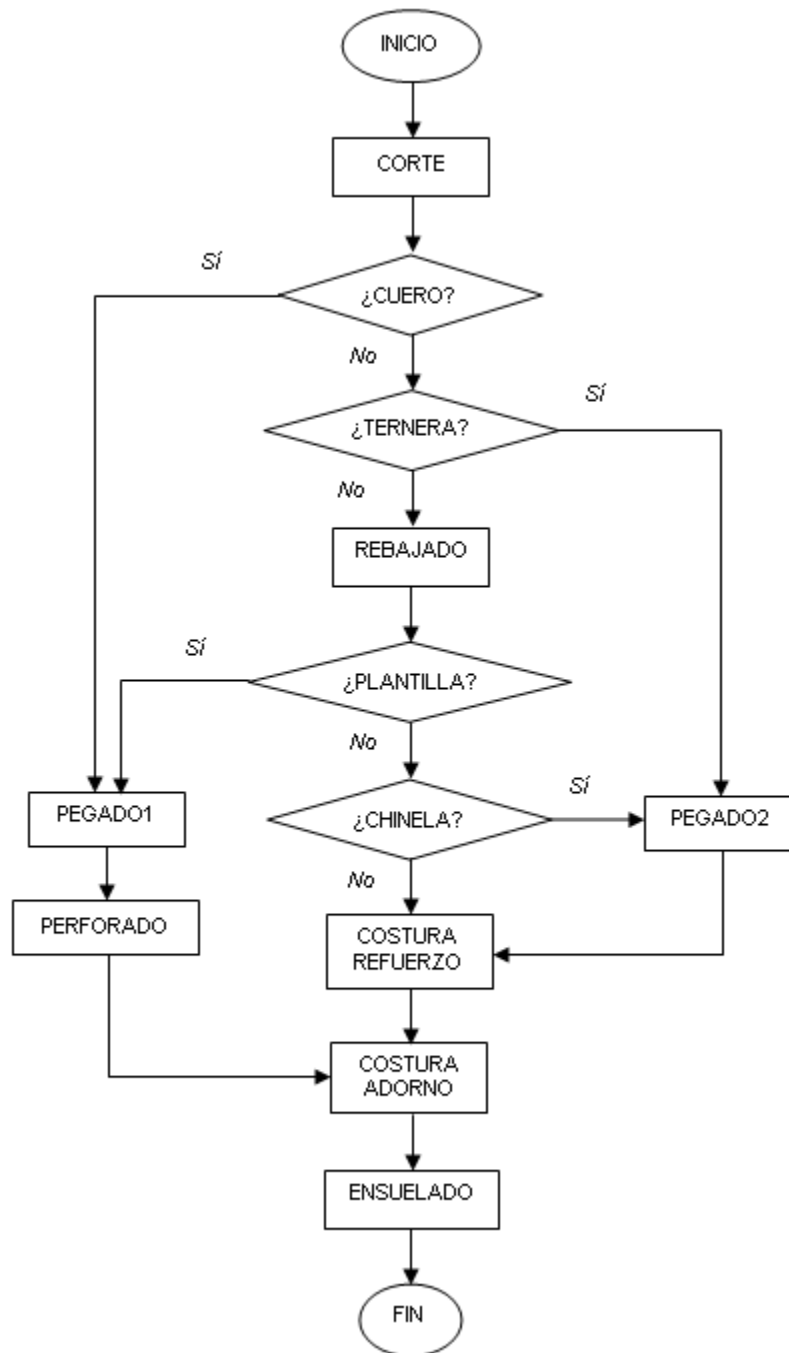
8. Se concluye que:

Debido a que la evaluación del estadístico se encuentra dentro de la región de aceptación, por lo tanto no se rechaza la hipótesis nula, lo cual implica afirmar que **no existe evidencia para suponer que la media de la producción semanal es diferente de 124.**

5.2.3 FORMULACIÓN

El diagrama de flujo del modelo de simulación es el siguiente:

Fig. 5.3 Diagrama de flujo de la simulación



5.2.4 RESULTADOS

Los resultados de la simulación se muestran a continuación en la gráfica y tabla siguiente. Debido a que la última operación sólo recibe grupos de tres productos y los procesa simultáneamente, los resultados obtenidos son múltiplos de 3. Se realizaron 36 réplicas del experimento.

Gráfica 5.2 Distribución de frecuencias de la producción

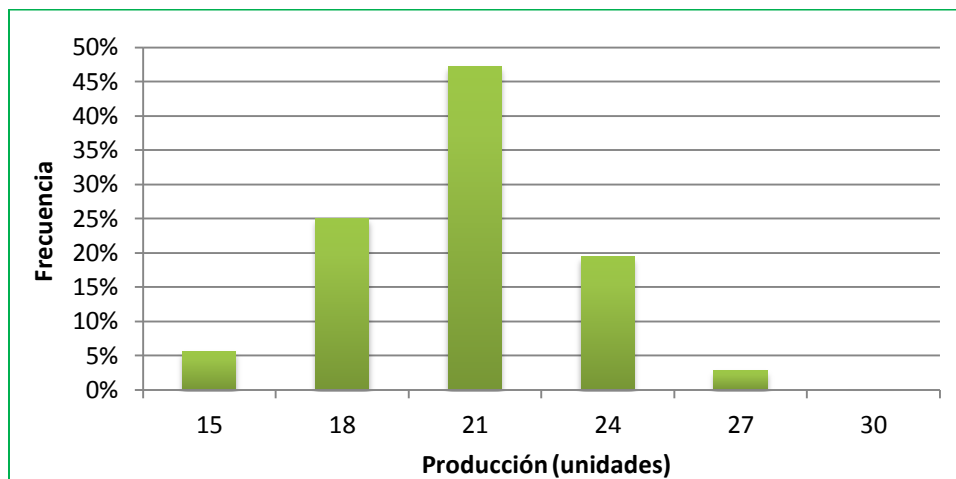


Tabla 5.6 Comportamiento estadístico de la producción en un turno

Producto	Media	Prod. Semanal	Desviación estándar	Min	Max	Intervalo al 92% de confianza
PA/01	20.66	124	2.625	15	27	[18, 24]

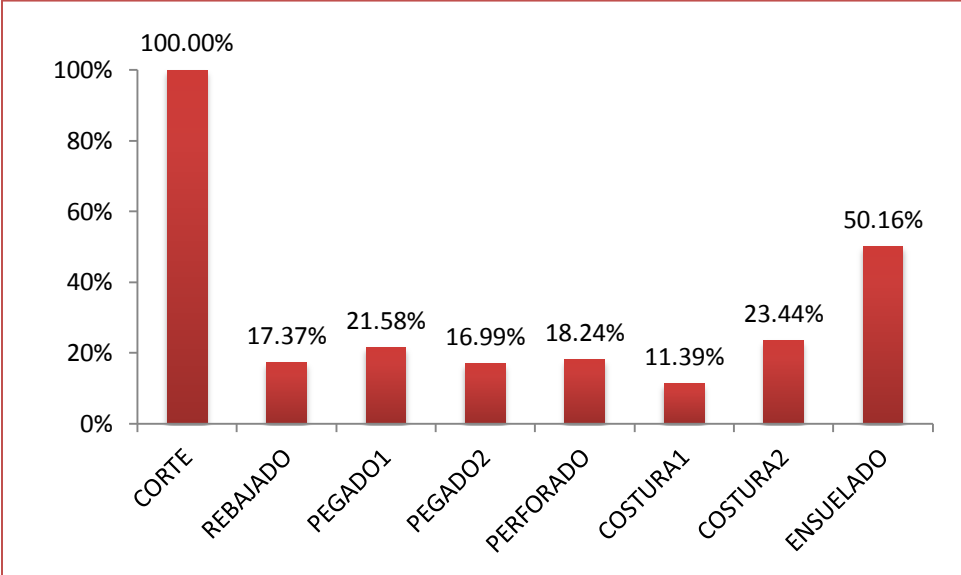
Se obtuvo una producción media de **21 unidades** en una jornada laboral de 12 horas, con una desviación estándar de aproximadamente 3 unidades. La producción mínima y máxima que se obtuvo fue de 15 y 27 unidades respectivamente.

El intervalo de confianza tiene una longitud de 6 unidades de diferencia y va de 18 a 24. Esto quiere decir que la producción de la instalación en condiciones normales de operación estará dentro de este intervalo 22 de los 24 días que trabaja mensualmente.

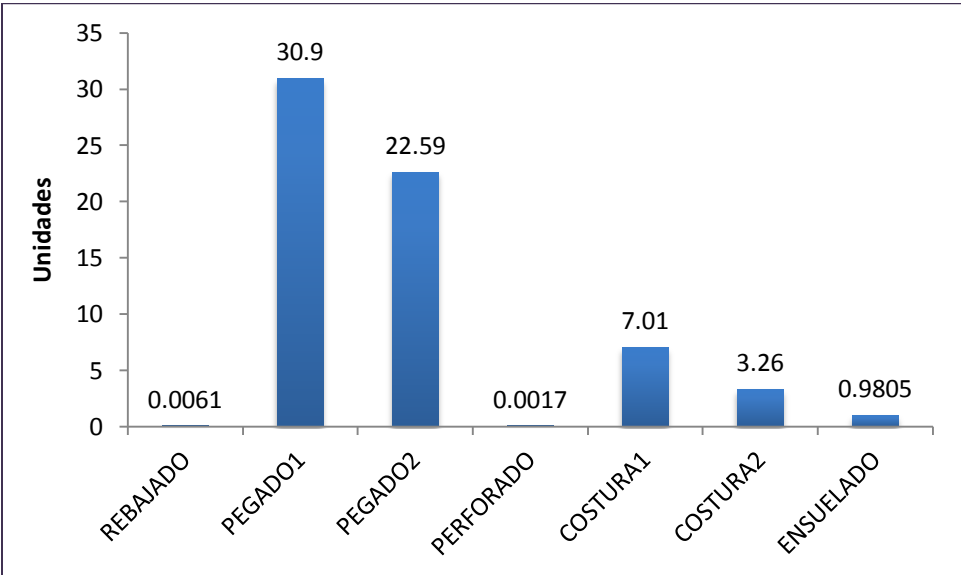
Esta información es útil porque permite determinar un parámetro de producción, el cual se utilizará en el siguiente punto para poder programar la producción a través de un programa entero.

En la siguiente gráfica se pueden apreciar los porcentajes de utilización de cada operación, es decir, el tiempo que la operación o máquina estuvo trabajando con relación al tiempo total de producción. La primer operación es utilizada al 100% debido a que uno de los supuestos es que siempre existe materia prima disponible.

Gráfica 5.3 Porcentaje de utilización promedio de cada operación/máquina



Gráfica 5.4 Cantidad promedio de materia prima en línea de espera



En la primera gráfica se puede observar que exceptuando la primer (*corte*) y última (*ensuelado*) operación, todas las demás se encuentran subutilizadas. Existen cuellos de botella que provocan que el resto de las operaciones estén inactivas.

Se observa fácilmente que la primera operación que restringe la capacidad de la planta es *corte*, dado que todas las componentes de materia prima tienen que ser procesadas ahí primero. Se puede afirmar que la capacidad de la instalación no puede ser mayor que la capacidad de procesamiento de esta operación.

Las operaciones de *pegado* (1 y 2) y *costura* (1 y 2) son de ensamble, i.e., unen dos piezas para formar una sola. Por ejemplo, la operación *pegado1* requiere de una pieza de plantilla de cuero y una plantilla de borrego, si alguna de las dos falta entonces la operación se detiene hasta que haya una pieza de cada tipo.

En la gráfica 5.4 se observa que las operaciones donde existe una mayor cantidad de piezas en línea de espera corresponden a las operaciones de ensamble. Esto quiere decir que los dos insumos necesarios para activar la operación tienen tasas de llegada diferentes, lo que crea líneas de espera en el insumo con mayor velocidad de llegada.

Dichas operaciones actúan como indicadores de dónde se crean cuellos de botella. Las operaciones *pegado1*, *pegado2* y *costura1* acumulan insumos debido a que la operación de Rebajado no suministra con la velocidad suficiente las piezas que dichas operaciones requieren. La operación de *costura2* acumula insumos debido a que *costura1* no suministra insumos con la suficiente velocidad, pero ya vimos que *costura1* depende de *rebajado*.

Un posible estudio posterior podría evaluar las necesidades de inversión en la planta con la finalidad de incrementar la capacidad instalada. Dado que ya se tienen identificadas las dos operaciones que restringen la producción total, i.e., *corte* y *rebajado*.

En cuanto a la **función de utilidades**, se determinó la siguiente expresión lineal:

$$Y = \rho\phi X - \psi$$

Donde:

Y = Utilidad mensual.

X = Cantidad de productos realizados en un día.

ρ = Precio de venta unitario – Costo unitario = Utilidad unitaria

ρ = \$261.75 – \$157.05 = \$104.7

ϕ = Cantidad de días laborados por mes = 24 días

ψ = Costo fijo mensual = \$600

La función resultante es:

$$Y = 2,512.8X - 600$$

En dicha función se calculó el valor esperado, varianza, desviación estándar y un intervalo de confianza. Esta información es de utilidad para la empresa porque le permite asociar utilidades a niveles de producción. De esta manera, se está en condiciones de establecer objetivos de producción factibles y de conocer cuál es el beneficio (expresado en términos monetarios) de la cantidad producida.

Tabla 5.7 Valores estadísticos de la utilidad mensual

Medida	Formulación	Utilidad
Valor esperado	$E(Y) = 2,512.8 * E(X) - 600$	\$51,331.20
Varianza	$V(Y) = 2,512.8^2 * V(X)$	43,497,573.11
Desv. Est.	$\sigma_Y = \sqrt{V(Y)}$	\$6,595.27
Intervalo de confianza (92%)	$[Y(18), Y(24)]$	[\$44,630.40, \$60,307.20]

Con esta fórmula no se pretende modelar de forma rigurosamente exacta el ingreso mensual porque no considera las economías de escala y el costo es lineal, se pretende que sirva de **base para cuantificar el beneficio esperado de diversos objetivos de producción.**

CAPÍTULO VI

PROGRAMA ENTERO E INDICADORES

CAPÍTULO VI. PROGRAMA ENTERO E INDICADORES

6.1 PROGRAMA ENTERO

Como parte de la metodología se consideró el empleo de un modelo de programación entera para la planeación de la producción semanal. El programa que se presenta a continuación fue construido y resuelto en el programa Lingo versión 13; para mayor comodidad se vinculó a hojas de cálculo en Excel para manejar los datos de entrada y de salida de forma más fácil.

El modelo formulado considera únicamente el producto PA/01, existen tiempos de producción normales y extras, si bien éstos últimos están muy penalizados (con un costo muy alto) debido a que se planea que el tiempo extra se utilice únicamente como margen para absorber las variaciones del sistema de producción.

Adicionalmente el capítulo contiene la construcción de los indicadores control de producción y de demanda.

6.1.1 SUPUESTOS

- ⊕ La capacidad de producción semanal en tiempo normal será la media obtenida por el modelo de simulación.
- ⊕ La capacidad de producción semanal en tiempo extra será proporcional en horas a la obtenida en tiempo normal.
- ⊕ La demanda semanal es la que se obtuvo en la estimación de ventas.
- ⊕ Existe una capacidad máxima de almacenamiento de producto terminado.
- ⊕ Existe una cantidad mínima de producto que se debe mantener en inventario cada semana.
- ⊕ La medida de desempeño del sistema será el costo total de las operaciones.

6.1.2 PROCEDIMIENTO

A continuación se menciona el procedimiento utilizado:

1. Formulación del problema

El problema consiste en determinar para cada semana: la cantidad a producir en tiempo normal, la cantidad a producir en tiempo extra, la cantidad a almacenar y la demanda insatisfecha del producto PA/01, de manera que se minimice el costo total para el periodo considerado.

2. Recolección de datos

Con base en la información proporcionada por la empresa se determinaron los siguientes parámetros:

Tabla 6.1 Parámetros del modelo

Costo unitario	Costo unitario (t. extra)	Costo unitario de mantener	Costo unitario de escasez	Capacidad producción	Capacidad producción (t. extra)	Capacidad máxima de almacén	Mínimo requerido en almacén
\$157.05	\$314.10	\$10	\$523.50	124 pz	42 pz	400 pz	20 pz

El costo unitario fue dado por la empresa, el costo unitario en tiempo extra se decidió considerarlo el doble del correspondiente al tiempo normal. El costo de mantener es un aproximado al costo que conlleva la limpieza y el cuidado del producto. El costo de escasez se decidió determinarlo como el doble del precio de venta del producto.

La demanda es la que aparece en la tabla 5.4 estimación de la demanda. La capacidad de producción es la producción esperada obtenida en la simulación. La correspondiente en tiempo extra se tomó como proporcional en horas a la obtenida en tiempo regular. El mínimo requerido en almacén fue fijado por el administrador para no quedarse sin existencias.

3. Modelo matemático

Las variables decisionales o endógenas son las siguientes:

x_i	= Cantidad producida en la semana i en tiempo normal.	[producto/semana]
x'_i	= Cantidad producida en la semana i en tiempo extra.	[producto/semana]
y_i	= Cantidad almacenada en la semana i .	[producto/semana]
w_i	= Cantidad de demanda insatisfecha en la semana i .	[producto/semana]

Los parámetros o variables exógenas son las siguientes:

α	= Costo unitario de producción en tiempo normal.	[\$/producto]
β	= Costo unitario de producción en tiempo extra.	[\$/producto]
γ	= Costo unitario de almacenar.	[\$/producto]
δ	= Costo unitario por no tener producto (perder una venta).	[\$/producto]
d_i	= Demanda de producto en la semana i .	[producto/semana]
ε	= Cantidad máxima de producto que es posible almacenar en una semana.	[producto/semana]
ζ	= Cantidad mínima de producto que debe haber en existencia entre semanas.	[producto/semana]

$\mu =$	Capacidad de producción en tiempo normal en una semana.	[producto/semana]
$\lambda =$	Cantidad máxima de producción en tiempo extra en una semana.	[producto/semana]

La función objetivo minimiza la suma de los costos de producción en tiempo normal y extra, el de mantener en inventario y el costo de escasez, desde el periodo uno hasta n:

$$\text{Min } z = \alpha \sum_{i=1}^n x_i + \beta \sum_{i=1}^n x'_i + \gamma \sum_{i=1}^n y_i + \delta \sum_{i=1}^n w_i$$

La siguiente restricción indica que la producción en tiempo normal y extra de la semana actual, más el inventario procedente de la semana anterior, más la cantidad insatisfecha de demanda es igual a la demanda de esa semana más la cantidad que se mantendrá en almacén para la próxima:

$$x_i + y_{i-1} + w_i = d_i + y_i \quad \forall i = 1, 2, 3, \dots, n$$

El siguiente par de restricciones establecen la cota máxima de producción semanal:

$$\begin{aligned} x_i &\leq \mu & \forall i = 1, 2, 3, \dots, n \\ x'_i &\leq \lambda & \forall i = 1, 2, 3, \dots, n \end{aligned}$$

El siguiente par de restricciones establecen la cota mínima y máxima en la cantidad almacenada de producto terminado:

$$\begin{aligned} y_i &\leq \varepsilon & \forall i = 1, 2, 3, \dots, n \\ y_i &\geq \zeta & \forall i = 1, 2, 3, \dots, n \end{aligned}$$

Adicionalmente se tiene la restricción de no negatividad y de que las variables decisionales adquieran valores enteros:

$$x_i, x'_i, y_i, w_i \in \mathbb{Z}^+$$

La cantidad de variables y restricciones generadas dependen de la cantidad de periodos considerados, de acuerdo con la siguiente expresión:

- ❖ Cantidad de variables = $4n$
- ❖ Cantidad de restricciones = $5n$

Es importante comentar que la matriz de coeficientes tecnológicos asociado al problema es unimodular, lo cual implica que la solución será entera. Si se desea conocer con detalle porqué ocurre así, se recomienda consultar a Salkin (1989).

4. Software seleccionado

Se decidió seleccionar el programa Lingo versión 13 debido a que es fácil de conseguir (versión de prueba) el autor está familiarizado con él, permite la vinculación con otro tipo de documentos para la extracción e impresión de datos (.txt, .doc, .xlsx, etc.).

Existen dos formas de construir modelos en lingo: el método algebraico y por conjuntos. El algebraico requiere que se ingrese explícitamente cada variable y restricción. Es útil para resolver problemas pequeños. El método por conjuntos genera conjuntos de variables y de restricciones a partir de sentencias cortas utilizando palabras reservadas.

A continuación se muestra el código realizado para construir el programa entero:

```
MODEL:
  SETS:
    SEMANA/1..12/: DEMANDA, PRODNORMAL, PRODEXTRA, PRODALMACEN, PERDIDADEM;
  ENDSETS

  DATA:
    DEMANDA = @OLE('tesisprogramaentero.xlsx','demandavector');
    ALFA = @OLE('tesisprogramaentero.xlsx','alfa');
    BETA = @OLE('tesisprogramaentero.xlsx','beta');
    GAMA = @OLE('tesisprogramaentero.xlsx','gama');
    DELTA = @OLE('tesisprogramaentero.xlsx','delta');
    MI = @OLE('tesisprogramaentero.xlsx','mi');
    LAMBDA = @OLE('tesisprogramaentero.xlsx','lambda');
    EPSILON = @OLE('tesisprogramaentero.xlsx','epsilon');
    ZITA = @OLE('tesisprogramaentero.xlsx','zita');
    @OLE('tesisprogramaentero.xlsx','prodvector')= PRODNORMAL;
    @OLE('tesisprogramaentero.xlsx','prodvector')= PRODEXTRA;
    @OLE('tesisprogramaentero.xlsx','almacenvector')= PRODALMACEN;
    @OLE('tesisprogramaentero.xlsx','perdidavector')= PERDIDADEM;
  ENDDATA

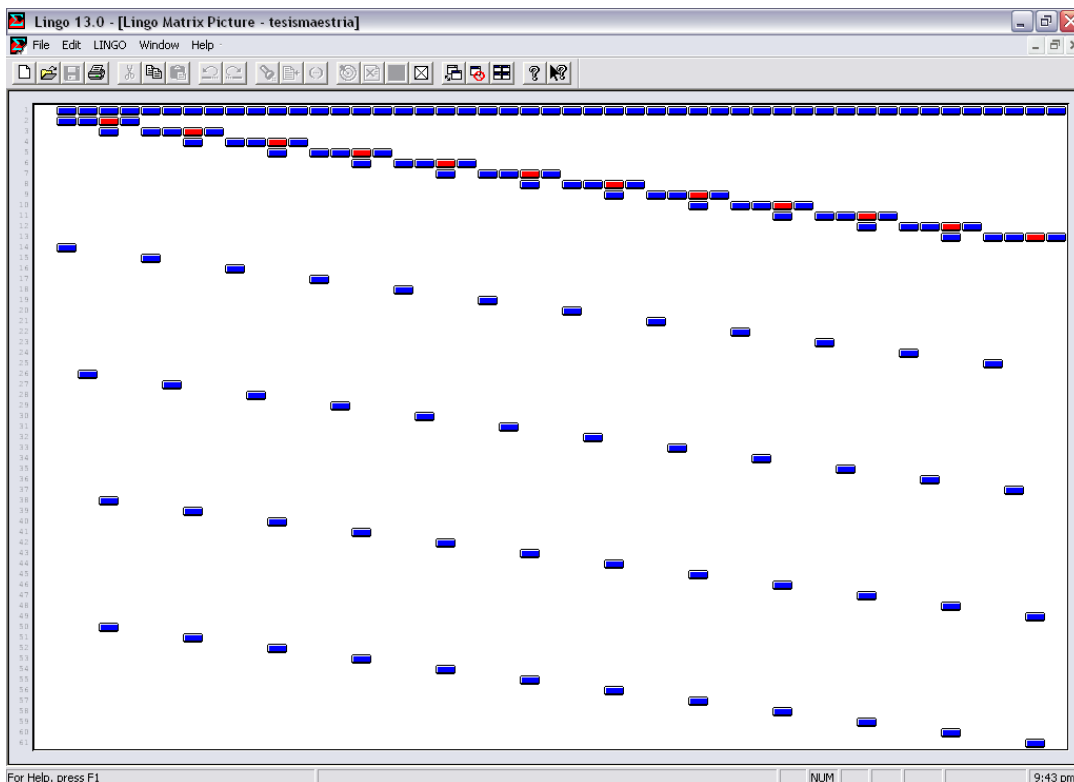
  MIN = ALFA*@SUM(SEMANA (I) :PRODNORMAL (I))+ BETA*@SUM(SEMANA (I) :PRODEXTRA (I)) +
  GAMA*@SUM(SEMANA (I) :PRODALMACEN (I))+ DELTA*@SUM(SEMANA (I) :PERDIDADEM (I));
  !SUJETA A;
  @FOR (SEMANA (I) | I#EQ#1: PRODNORMAL (I) + PRODEXTRA (I) + PERDIDADEM (I)= DEMANDA (I)+
  PRODALMACEN (I));
  @FOR (SEMANA (I) | I#GT#1: PRODNORMAL (I) + PRODEXTRA (I) + PRODALMACEN (I-1) + PERDIDADEM (I)=
  DEMANDA (I)+ PRODALMACEN (I));
  !CAPACIDAD DE PRODUCCIÓN NORMAL;
  @FOR (SEMANA (I) : PRODNORMAL (I) <= MI);
  !CAPACIDAD DE PRODUCCIÓN EXTRA;
  @FOR (SEMANA (I) : PRODEXTRA (I) <= LAMBDA);
  !CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO;
  @FOR (SEMANA (I) : PRODALMACEN (I) <= EPSILON);
  !CANTIDAD MÍNIMA ALMACENADA;
  @FOR (SEMANA (I) : PRODALMACEN (I) >= ZITA);
  !VARIABLES ENTERAS;
  @FOR (SEMANA (I) : @GIN (PRODSEMANAL));
  @FOR (SEMANA (I) : @GIN (PRODEXTRA));
  @FOR (SEMANA (I) : @GIN (PRODALMACEN));
  @FOR (SEMANA (I) : @GIN (PERDIDADEM));
  END
```


Se vinculó con Excel para que el programa obtuviera los datos de los parámetros y también para que en ese mismo archivo devolviera los resultados de las variables decisionales.

5. Verificación y validación

Para la verificación, Lingo incluye una función que detecta errores en el código, dicha función fue utilizada para corregir errores tipográficos en el modelo. También Lingo incluye la función de visualización de la matriz resultante, con la cual se pudo observar que las restricciones generadas son correctas. A continuación una imagen de la matriz, cada columna corresponde con una variable decisional, cada fila con una restricción. Los rectángulos azules contienen dentro el coeficiente de la variable, si dicho coeficiente es positivo se colorea azul, si es negativo rojo.

Fig. 6.1 Matriz asociada al programa entero



Para la validación, se realizó un análisis dimensional para comprobar que las unidades fueran consistentes en el modelo. También es importante mencionar que los parámetros del modelo provienen de la serie de tiempo y de la simulación y que dichos modelos ya fueron validados. A continuación el análisis dimensional.

Para la función objetivo: [\$/producto] * [producto/semana] = [\$/semana]

Restricción 1: [producto/semana] = [producto/semana]

Restricciones 2, 3, 4 y 5: [producto/semana] ≤ [producto/semana] ≤ [producto/semana]

6.1.3 FORMULACIÓN

El programa entero es el siguiente:

$$\text{Min } z = \alpha \sum_{i=1}^n x_i + \beta \sum_{i=1}^n x'_i + \gamma \sum_{i=1}^n y_i + \delta \sum_{i=1}^n w_i$$

Sujeto a

$$x_i + y_{i-1} + w_i = d_i + y_i \quad \forall i = 1, 2, 3, \dots, n$$

$$x_i \leq \mu \quad \forall i = 1, 2, 3, \dots, n$$

$$x'_i \leq \lambda \quad \forall i = 1, 2, 3, \dots, n$$

$$y_i \leq \varepsilon \quad \forall i = 1, 2, 3, \dots, n$$

$$y_i \geq \zeta \quad \forall i = 1, 2, 3, \dots, n$$

$$x_i, x'_i, y_i, w_i \in \mathbb{Z}^+$$

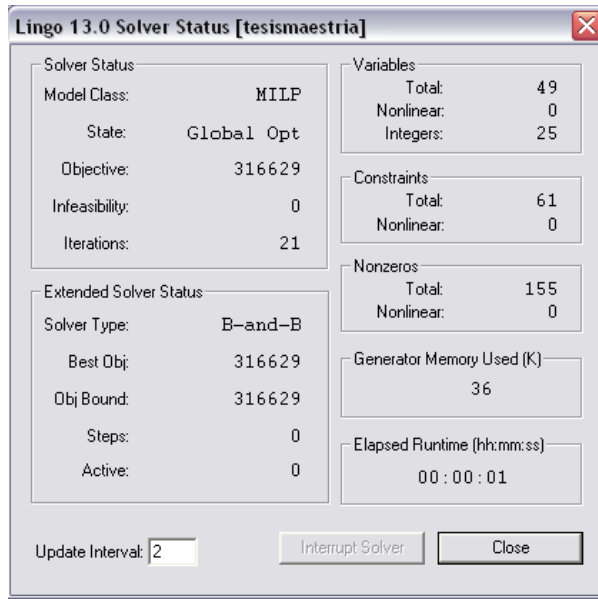
6.1.4 RESULTADOS

Una vez verificado el modelo, se procedió a resolverlo a través de Lingo. El programa tardó un segundo en resolverlo utilizando el algoritmo de Branch and Bound, realizó 21 iteraciones. A continuación se presenta una imagen del reporte sumario de la solución.

La solución óptima establece que se debe producir 124 unidades en tiempo normal en las doce semanas consideradas, se requiere producir en tiempo extra en las semanas dos, tres, cuatro, siete, ocho, once y doce. No existe demanda insatisfecha en ninguna semana. El costo total de producción es de **\$316,629.30**.

En la figura 6.2 aparece el cuadro resumen de la solución obtenida por Lingo. Utilizó el algoritmo de Branch and Bound y realizó 21 iteraciones. La cantidad total de variables es de 49 y se generaron 61 restricciones. El tiempo que tardó fue de un segundo.

Fig. 6.2 Reporte sumario de la solución obtenida



Para mayor facilidad, se presenta una tabla con los resultados de las variables decisionales y después una imagen de la hoja de Excel de donde se extrajeron los parámetros y a donde se importó la solución óptima:

Tabla 6.2 Solución óptima

Semana	Producción normal	Producción t. extra	Cantidad almacenada	Demanda insatisfecha
1	124	0	46	0
2	124	5	96	0
3	124	42	183	0
4	124	42	20	0
5	124	0	65	0
6	124	0	110	0
7	124	28	183	0
8	124	42	20	0
9	124	0	65	0
10	124	0	110	0
11	124	28	183	0
12	124	42	20	0

Fig. 6.3 Pantalla de Excel con la solución óptima

DATOS DE ENTRADA						DATOS DE SALIDA				
SEMANA	DEMANDA	COSTOS UNITARIOS		PROD. NORMAL	PROD. EXTRA	CANT. ALMACENADA	CANT. INSATISFECHA			
1	78	α	157.05	124	0	46	0			
2	79	β	314.1	124	5	96	0			
3	79	γ	10	124	42	183	0			
4	329	δ	523.5	124	42	20	0			
5	79	CAP. PROD. NORMAL		124	0	65	0			
6	79	μ	124	124	0	110	0			
7	79	CAP. PROD. EXTRA		124	28	183	0			
8	329	λ	42	124	42	20	0			
9	79	CANT. ALMACENADA		124	0	65	0			
10	79	ϵ	400	124	0	110	0			
11	79	ζ	20	124	28	183	0			
12	329			124	42	20	0			
						COSTO TOTAL = \$316,629.30				

En la figura 6.3 se tiene una imagen de la pantalla de Excel. A la izquierda aparecen los parámetros o datos de entrada. A la derecha aparecen los valores de las variables decisionales y el costo total o datos de salida del modelo

Con esta información es posible concluir que la empresa tiene la capacidad para proveer grandes pedidos de zapaterías siempre que se dedique de tiempo completo a la fabricación de zapato de descanso.

6.2 INDICADORES

6.2.1 CONTROL DE PRODUCCIÓN

Con base en la solución proporcionada por el programa entero, se calculan los intervalos inferiores de producción semanal que son aceptables, de la siguiente forma:

$$I_i = \frac{\text{Producción real en semana } i.}{\text{Producción programada en semana } i.}$$

El empleo de más horas extra o reprogramación se deben activar cuando:

$$I_i > a$$

Sustituyendo se tiene:

$$\frac{\text{Producción real en semana } i.}{\text{Producción programada en semana } i.} > a$$

Por lo tanto, el intervalo inferior se calcula de la siguiente forma:

$$\text{Producción real en semana } i > a * \text{Producción programada en semana } i$$

Inicialmente se propone que $a = 0.85$, en la siguiente tabla se muestran los resultados.

Tabla 6.3 Producción mínima semanal

Semana	Producción total	Producción mínima
1	124	105
2	129	110
3	166	141
4	166	141
5	124	105
6	124	105
7	152	129
8	166	141
9	124	105
10	124	105
11	152	129
12	166	141

La columna de *producción mínima* de la tabla, hace referencia a la cantidad de producción que al menos se debe alcanzar en esa semana para asegurar que el programa de producción sea factible para el resto del horizonte, en caso contrario, se deberá reprogramar.

6.2.2 CONTROL DEL ENTORNO

Con base en la estimación de demanda se calcula el indicador que controlará las ventas.

$$Vi = \frac{\text{Ventas reales del producto } i.}{\text{Ventas estimadas del producto } i.} - 1$$

Existe un parámetro **b** tal que active alguna subrutina de utilización de más horas extra o reprogramación, de manera que:

$$-b < Vi < b$$

Sustituyendo se tiene:

$$-b < \frac{\text{Ventas reales semana } i.}{\text{Ventas estimadas semana } i.} - 1 < b$$

El intervalo mínimo y máximo se calcula de la siguiente forma:

$$(1 - b) * \text{Ventas estimadas semana } i < \text{Ventas semana } i < (1 + b) * \text{Ventas estimadas semana } i$$

Inicialmente se propone que $\beta = 0.15$, en la siguiente tabla se presentan los resultados.

Tabla 6.4 Intervalo permitido de ventas semanales

Semana	Ventas	Mínimo	Máximo
1	78	66	90
2	79	67	91
3	79	67	91
4	329	280	378
5	79	67	91
6	79	67	91
7	79	67	91
8	329	280	378
9	79	67	91
10	79	67	91
11	79	67	91
12	329	280	378

Es importante mencionar que la determinación de puntos críticos que activen subrutinas de reprogramación sólo se pueden perfeccionar a partir de la utilización sucesiva de los indicadores en el sistema real, debido a que las variaciones específicas de la instalación de producción imposibilitan determinar *a priori* el tamaño de umbral o margen para su activación.

CONCLUSIONES

CONCLUSIONES

“La ciencia es más que un simple conjunto de conocimientos: es una manera de pensar”

Carl Sagan

La metodología propuesta está dirigida a las empresas PyME, principalmente a la mediana debido a que el tamaño le permite contar con mayores recursos técnicos y personal capacitado para efectuar tareas de planeación y control, por otro lado la complejidad de las operaciones incrementa la necesidad de contar una herramienta que facilite la toma de decisiones.

Se decidió realizar el caso de estudio en una empresa micro debido a la disponibilidad y disposición de los administradores. Los resultados logrados permiten afirmar que los beneficios de implementar la metodología en una empresa de mayor tamaño serán más notorios.

Conclusiones sobre la investigación:

- ⊕ La presente metodología constituye un intento de proporcionar a la empresa PyME un procedimiento sistemático que le permita adecuarse al entorno de una manera rápida y con un enfoque de optimización.
- ⊕ La simulación es una herramienta muy versátil y flexible para modelar sistemas que se componen de elementos con comportamiento estocástico y que interactúan de una forma determinada (conocida) o determinable (aproximable), es por ello que es pertinente su aplicación en un entorno de producción.
- ⊕ Los modelos de serie de tiempo son económicos y fáciles de utilizar, son confiables para los pronósticos de corto plazo. En la metodología propuesta, cumplen la función de estimar una posible demanda de producto, la desviación se corrige con retroalimentación.
- ⊕ El programa entero se debe construir con un nivel de detalle que permita resolverlo en un tiempo lo suficientemente rápido como para responder adecuadamente a las necesidades de la empresa, debido a que en muchos casos es más importante *optimizar* el tiempo de encontrar una buena solución que encontrar la solución óptima.
- ⊕ El proceso de planeación de la producción se tiene que abordar con un enfoque dinámico. Una planeación estática es insuficiente para considerar las variaciones que ocurren tanto en el sistema como en su entorno. La capacidad de respuesta es más importante que una planeación que por ser demasiado detallada, es demasiado frágil.
- ⊕ El uso de métodos cuantitativos e indicadores es indispensable para conocer el estado actual del sistema, a partir de ellos es posible determinar si existen avances o retrasos en

los atributos cuantificados. En los resultados de un modelo o indicador existe pérdida de información a costa de generar con ella nueva información que es relevante para la toma de decisiones. Se trata de un proceso de condensación de información, de manera que se vuelve útil.

- ⊕ La investigación de operaciones es una disciplina interdisciplinaria que se propone integrar: el método científico, enfoque de sistemas, teoría matemática, diseño de sistemas, sistemas computacionales, decisores, etc. para el control de sistemas complejos, sobre todo, organizaciones. El caso de estudio que se presentó es un ejemplo de ello, donde se integraron conocimientos de:

- ✓ Ingeniería Industrial
- ✓ Probabilidad
- ✓ Estadística
- ✓ Programación entera
- ✓ Series de tiempo
- ✓ Simulación
- ✓ Programación en un software
- ✓ Administración de Operaciones
- ✓ Cibernética

Por lo tanto, la investigación de operaciones es un intento de dotar al decisor de un procedimiento sistemático e interdisciplinario que le permita discriminar, dentro del dominio de alternativas, aquella que comporta un mayor beneficio al sistema. Dicho beneficio es medido de acuerdo con uno o más criterios.

Conclusiones sobre la empresa:

- ⊕ La demanda actual de productos presenta gran regularidad en su comportamiento, sin embargo, el incorporar clientes con pedidos más grandes (v.gr. zapaterías) incrementa notablemente la fluctuación de la demanda semanal.
- ⊕ La empresa se tiene que dedicar completamente a la producción de zapato de descanso si desea surtir a intermediarios más grandes como son las zapaterías.
- ⊕ Se identificó, a través de simulación, la operación que principalmente restringe la capacidad de producción del sistema: *rebajado*. Después de ella están *costura1* y *costura2*. Si se desea incrementar la capacidad de la instalación se debe incrementar primero la tasa de salida de *rebajado*.

- ⊕ Es posible determinar un costo asociado al incremento de capacidad de las máquinas que realizan dichas operaciones; con esa información adicional se crea un nuevo problema: dado un presupuesto de inversión, asignar recursos a los elementos de una línea de producción de suerte que se maximice la producción. Con la información obtenida, la empresa está en condiciones de llevar a cabo un estudio de optimización de la producción.
- ⊕ Es necesario que la empresa incremente su capacidad de producción debido a que en el horizonte considerado, se utilizan tiempos extra para cumplir con los pedidos de los clientes nuevos (zapaterías). El problema de utilizar los tiempos extra en la planeación inicial estriba en que se está disponiendo del margen de tiempo que podría absorber las irregularidades en la tasa de producción, e.g., paros, mantenimiento, etc.

Los productos, resultados o beneficios de esta investigación son los siguientes:

1. **Metodología de planeación de la producción.** Se ha propuesto una nueva metodología de producción, aunque en la literatura existen gran cantidad de metodologías, la propuesta en esta investigación incorpora activamente dos elementos:
 - a. Optimización
 - b. Adaptabilidad

La optimización a través de un programa entero; adicionalmente se utilizaron otras herramientas cuantitativas para la descripción y predicción del sistema estudiado.

La adaptabilidad a través de indicadores que “señalan” el momento en que se debe ajustar el sistema de producción para adecuarse a los cambios en el entorno.

Brevemente, la metodología consiste en:

- I. Estimar la demanda futura
 - II. Determinar la capacidad de producción para esa combinación de productos
 - III. Programar la producción
 - IV. Controlar la producción
 - V. Controlar las ventas
2. **Modelo de serie de tiempo.** Con base en los datos recabados se propuso un promedio móvil con un periodo de 3 semanas para pronosticar la demanda. Se eligió este modelo después de compararlo con otras series de tiempo y determinar que resultaba estadísticamente menor en las medidas de error consideradas.
 3. **Modelo de simulación.** Se construyó un modelo de simulación con la finalidad de determinar la capacidad de producción en una jornada de trabajo, así como un intervalo de

producción con un 92% de probabilidad. Adicionalmente, el modelo sirvió para identificar las operaciones que actúan como cuellos de botella, proporcionando información útil para que la empresa focalice sus esfuerzos de mejora.

4. **Función de utilidades.** Se construyó una función de utilidades con base en la información obtenida por la simulación y con datos proporcionados por la empresa. La finalidad de la función consiste en asociar utilidades a diferentes niveles de producción, de manera que sirva de base para el establecimiento y medición (en dinero) de objetivos de producción. No se intentó la construcción de una función que retratara de forma exacta las utilidades, sino lo suficiente para valorar la eficiencia de la instalación de producción.
5. **Modelo de programación entera.** Se construyó un programa entero a partir de los parámetros obtenidos en los modelos de serie de tiempo (demanda) y en la simulación (capacidad de producción semanal) y con datos obtenidos de la empresa. El modelo determina la cantidad a producir en tiempo *normal*, en tiempo *extra*, cantidad a almacenar y cantidad de demanda insatisfecha para cada semana del horizonte de planeación, de suerte que se minimice el costo total.
6. **Indicador de producción.** Se propuso inicialmente un indicador que activa una necesidad de (re)programación cuando el nivel de producción real es el 85% de lo planeado para esa semana. Dicho indicador se deberá ajustar con el tiempo dado que su función es ajustarse al desempeño *empírico* del sistema, tal que se cumpla con la producción de los pedidos.
7. **Indicador de demanda.** Se propuso la utilización de un indicador que se activa cuando el nivel de ventas real se encuentra por arriba o por debajo de un parámetro que inicialmente es el 15% de las ventas estimadas. También este indicador tendrá que afinarse para retratar adecuadamente la desviación de las ventas que obligue a una reprogramación.
8. **Generación de información sobre el proceso.** Se generó información relacionada con el sistema de producción y la demanda, y se creó un diagrama del proceso a partir de los datos recabados y de otros proporcionados por la empresa. Dicha información es de utilidad para la toma de decisiones en la empresa y representa un primer paso para llevar una administración científica en ella.

Adicionalmente, durante todo el proceso de investigación, se realizaron otras recomendaciones relacionadas con la administración de la empresa, las operaciones de producción, alternativas de financiamiento, etc. Las cuales no se mencionan puntualmente debido a que escapan al objeto de esta investigación.

BIBLIOGRAFÍA

1. Ashby, W. Ross. *Introducción a la cibernética*. Ediciones Nueva Visión, Argentina, 1977.
2. Argoneto P, y Perrone G. *Production planning in production networks. Models for medium and short-term planning*, Edit. Springer, London, 2008.
3. Ballou, Ronald. *Logística. Administración de la cadena de suministro*. 5 edición, Edt. Pearson, México, 2004.
4. Bazaraa et. al. *Programación Lineal y Flujo en Redes*, 2° edición, Edit. Limusa, México, 2011.
5. Beer, Stafford. *Cibernética y administración*, Edit. CECSA, México, 1974.
6. Beer Stafford. *The productivity index in active service*. Applied Statistics, Vol. 4, No. 1.
7. Careaga de la Garza, Carlos I. *Investigación de Operaciones*. Libro electrónico [http://148.204.211.134/polilibros/portal/Polilibros/P_Terminados/Investigacion_de_Operaciones_Careaga/index.htm] recuperado Noviembre 2012.
8. Flores de la Mota, Idalia. *Apuntes de Programación Entera*, Facultad de Ingeniería, UNAM, México.
9. Flores de la Mota, Idalia. *Apuntes de Teoría de Redes*, Facultad de Ingeniería, UNAM, México, 1999.
10. Flores de la Mota, Idalia y Elizondo Cortés, Mayra. *Apuntes de Simulación*, Facultad de Ingeniería, UNAM, México, 2006.
11. Gershenson, Carlos. *Design and Control of Self-organizing Systems*, PhD dissertation, Vrije Universiteit Brussel, Bélgica, 2007.
12. Heizer, Jay y Render, Barry *Principios de Administración de Operaciones*, 7 edición, Ed. Pearson, México, 2009.
13. Hernández Sampieri, Fernández Collado y Baptista. *Metodología de la Investigación*, 3° edición, Edit. McGraw Hill, México, 2003.
14. Hillier, Frederick S. y Lieberman, Gerald J. *Investigación de Operaciones*, 8° edición, Edit. McGraw Hill, México, 2006.
15. INEGI, *Resultados de los censos económicos 2009*, Censos económicos 2009.
16. Monks, Joseph G. *Administración de Operaciones*, 1ra edición, Shaum, México, 1991.
17. Niebel, Benjamin W. *Ingeniería Industrial. Métodos, tiempos y movimientos*, 9° edición, Edit. Alfaomega, México, 1996.
18. Oficina Internacional del Trabajo, *Introducción al estudio del trabajo*, 3° edición, Edit. OIT, Reino Unido, 1986.

19. Pinedo, M. L. *Planning and scheduling in manufacturing and services*, Edit Springer, 2005.
20. Pochet, Y. *Mathematical Programming Models and formulations for deterministic production planning problems*. Springer, 2001.
21. Prawda, Juan. *Métodos y modelos de Investigación de Operaciones Vol. II*, Edit. Limusa, México, 1993.
22. Ríos Insúa, David et. al. *Simulación. Métodos y aplicaciones*, 2° edición, Edit. Alfaomega, México, 2009.
23. Salkin, M. H. y Mathur K. *Foundations of Integer Programming*, Edit. North-Holland, USA, 1989.
24. Segura Pérez, Esther. *El problema del agente viajero*, Facultad de Ingeniería, UNAM, México, 2005.
25. Simchi-Levi, D. *The logic of logistics: Theory, algorithms and applications for logistics and supply chain management*, Springer, 2005
26. Taha, Hamdy A. *Investigación de Operaciones*, 7° edición, Edit. Pearson, México, 2004.
27. Voß, S y Woodruff, D. L. *Introduction to computational optimization models for Production Planning in a Supply Chain*, 2° edición, Edit. Springer, Alemania, 2006.
28. Wiener, Norbert. *Cibernética y Sociedad*, Edit. Conacyt, México, 1981.
29. Wiston, W. L. *Investigación de Operaciones. Aplicaciones y algoritmos*, 4° edición, Edit. Thomson, México, 2005.

APÉNDICE A

Como parte de las recomendaciones que se realizaron a la empresa, caso de estudio de la investigación, se consideró la posibilidad de incrementar la capacidad instalada del sistema de producción. Para ello se establecieron dos objetivos:

- Alcanzar un nivel de producción fijo, minimizando el costo de las inversiones
- Maximizar la producción, sin que se rebase un presupuesto de inversión

A continuación se describen los modelos propuestos.

MODELO I Minimización del costo de inversiones

En este modelo el decisor fija una tasa de producción deseada. Existe un costo asociado al incremento de capacidad en cada operación de producción, el cual se comporta de forma lineal. Dicho incremento de capacidad se considera como la compra de una o más máquinas con la misma tasa de salida que la utilizada en cada operación.

El modelo también balancea las tasas de salida de las operaciones de modo que se mantenga un porcentaje de eficiencia. El objetivo es minimizar el costo de las inversiones para alcanzar un nivel de producción determinado.

Las preguntas que responde el modelo son las siguientes:

- ¿En qué operaciones incrementar la capacidad y cuánto incrementar?
- ¿Cuál es la tasa de salida de cada operación para alcanzar un nivel de producción y eficiencia deseada?

Formulación:

Las variables decisionales o endógenas son:

$$x_i = \text{Tasa de salida de la operación } i \left[\frac{\text{producto}}{\text{unidad de tiempo}} \right]$$

$$w_i = \text{Cantidad de máquinas adicionales invertidas en la operación } i \text{ [máquina]}$$

Los parámetros del modelo o variables exógenas son:

$$a_i = \text{Capacidad máxima de salida de la operación } i \text{ por máquina} \left[\frac{\text{producto}}{\text{unidad de tiempo} * \text{máquina}} \right]$$

$$p = \text{Cantidad de producción mínima requerida} \left[\frac{\text{producto}}{\text{unidad de tiempo}} \right]$$

$c_i = \text{Costo de adquisición de una máquina extra en la operación } i \left[\frac{\text{dinero}}{\text{máquina}} \right]$

$d = \text{Desviación relativa permitida en la tasa de salida de cada operación [adimensional]}$

La formulación es la siguiente:

$$\text{Min } z = \sum_{i=1}^n c_i x_i$$

s.a

$$x_i \leq a_i(1 + w_i) \quad \forall i \quad (1)$$

$$(1 - d)x_n \leq x_i \leq (1 + d)x_n \quad \forall i \neq n \quad (2)$$

$$p \leq x_n \quad (3)$$

$$x_i \geq 0, \quad w_i \in \mathbb{Z}^+$$

La restricción (1) se refiere a la capacidad de producción actual y el posible incremento proporcional a la tasa de salida. La restricción (2) restringe la velocidad de producción de las operaciones con una cota máxima y mínima establecida como porcentaje de la última operación. La restricción (3) asegura un nivel de producción mínimo deseado.

- Cantidad de variables = $2n$
- Cantidad de restricciones = $2n - 1$

MODELO II Maximización de la producción

El decisor establece un presupuesto de inversión, el cual se asignará para incrementar la capacidad de cada operación, de manera que se maximice la producción del artículo final.

En este segundo modelo se utilizan las mismas variables decisionales y restricciones, únicamente se introduce la función objetivo como restricción de presupuesto y la restricción de producción se establece como la nueva función objetivo a maximizar.

Se agrega el siguiente parámetro:

$b = \text{presupuesto de inversión destinado a incrementar la capacidad [dinero]}$

La formulación del modelo es la siguiente:

$$\text{Max } z = x_n$$

s.a

$$x_i \leq a_i(1 + w_i) \quad \forall i \quad (1)$$

$$(1 - d)x_n \leq x_i \leq (1 + d)x_n \quad \forall i \neq n \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^n c_i x_i \leq b \quad (3)$$

$$x_i \geq 0, \quad w_i \in \mathbb{Z}^+$$

La restricción (3) asegura que el presupuesto de inversión no se rebase con las decisiones de incrementar la capacidad de cada operación. Las restantes restricciones tienen el mismo significado que en el modelo anterior. También se genera la misma cantidad de variables y restricciones.

APÉNDICE B

Formato de recolección de datos.

F.01 FORMATO DE CAPTURA SOBRE LAS OPERACIONES DE PRODUCCIÓN

PRODUCTO: _____

Fecha: _____

MODELO: _____

OPERACIÓN	DESCRIPCIÓN	MATERIA PRIMA			MAQUINA	TIEMPO DE PREPARACIÓN	OPERADORES NECESARIOS	TIEMPO DE OPERACIÓN (MIN)		
		TIPO	CANT.	UNIDAD				CORTO	NORMAL	LARGO
1										
2										
3										
4										
5										
6										
7										
8										
9										
10										

COMENTARIOS