

# Administración de Operaciones

Autor: Rafael Tordecillas



Administración de Operaciones / Rafael Tordecillas, / Bogotá D.C.,  
Fundación Universitaria del Área Andina. 2017

978-958-5460-47-8

Catalogación en la fuente Fundación Universitaria del Área Andina (Bogotá).

© 2017. FUNDACIÓN UNIVERSITARIA DEL ÁREA ANDINA  
© 2017, PROGRAMA ADMINISTRACIÓN DE MERCADEO  
© 2017, RAFAEL TORDECILLAS

Edición:

Fondo editorial Areandino

Fundación Universitaria del Área Andina

Calle 71 11-14, Bogotá D.C., Colombia

Tel.: (57-1) 7 42 19 64 ext. 1228

E-mail: publicaciones@areandina.edu.co

<http://www.areandina.edu.co>

Primera edición: noviembre de 2017

Corrección de estilo, diagramación y edición: Dirección Nacional de Operaciones virtuales

Diseño y compilación electrónica: Dirección Nacional de Investigación

Hecho en Colombia

Made in Colombia

Todos los derechos reservados. Queda prohibida la reproducción total o parcial de esta obra y su tratamiento o transmisión por cualquier medio o método sin autorización escrita de la Fundación Universitaria del Área Andina y sus autores.



# Administración de Operaciones

Autor: Rafael Tordecillas





# Índice

## UNIDAD 1 Introducción a la administración de operaciones

Introducción	7
Metodología	8
Desarrollo temático	9

## UNIDAD 1 Planeación de la estrategia de proceso

Introducción	25
Metodología	26
Desarrollo temático	27

## UNIDAD 2

Introducción	36
Metodología	37
Desarrollo temático	38

## UNIDAD 2 Planeación agregada de operaciones

Introducción	49
Metodología	50
Desarrollo temático	51



# Índice

## UNIDAD 3 Planeación agregada de operaciones

Introducción	62
Metodología	63
Desarrollo temático	64

## UNIDAD 3 Programa maestro de producción

Introducción	79
Metodología	80
Desarrollo temático	81

## UNIDAD 4 Planeación de los requerimientos de materiales

Introducción	92
Metodología	93
Desarrollo temático	94

## UNIDAD 4 Programación de la producción a corto plazo

Introducción	109
Metodología	110
Desarrollo temático	111

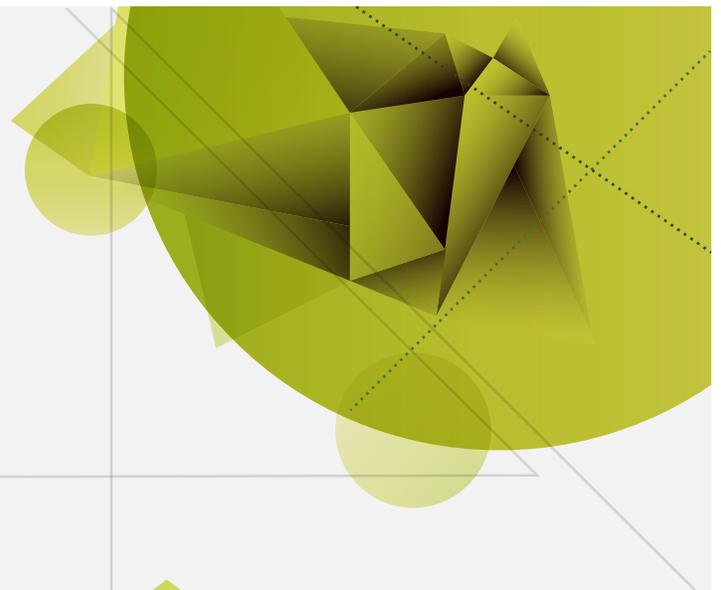
Bibliografía	121
--------------	-----



# 1

## Unidad 1

Introducción a la  
administración de  
operaciones



Administración de operaciones

Autor: Rafael Tordecillas

# Introducción

En la presente unidad, la cual abarca la semana 1, aporta una introducción al objeto de estudio de la administración de operaciones, así como también algunas herramientas y medidas básicas mediante las cuales puede gestionarse y mejorarse cualquier sistema productivo. Esta introducción permitirá comprender y dar un panorama general acerca de la administración de operaciones y de todo lo que se estudiará en las próximas semanas.

Debido a que esta cartilla corresponde a la parte introductoria del curso, inicialmente la presente cartilla tiene una fuerte parte conceptual. Posteriormente y dado que se mostrarán algunas medidas de desempeño, se tendrá también una parte de ejemplos numéricos de aplicación de estas medidas. Dadas estas consideraciones, para la parte conceptual se recomienda dar una leída rápida a la cartilla y luego leerla nuevamente de forma más pausada, haciendo hincapié en los conceptos que mayor dificultad le generaron. Para la parte numérica, cada ejemplo cuenta con su explicación, así que se recomienda inicialmente entender bien los parámetros, datos e información que se da en el ejercicio y luego procurar comprender cada uno de los pasos que se llevan a cabo en la solución del ejercicio. No olvide consultar con su tutor cualquier duda que se le presente.

## ¿Qué es la administración de operaciones?

Imaginemos un producto cualquiera que pueda ser adquirido en un supermercado o en una tienda de barrio. Una libra de queso, un jabón, un juguete, cualquier cosa. Pensemos en todo el proceso por el que tiene que pasar para poder llegar a sus manos en el momento, lugar, calidad y cantidad precisa.

Inicialmente deben ser adquiridas unas materias primas, luego estas se transportarán hasta un lugar en el cual serán procesadas, es decir, donde serán transformadas para obtener un producto terminado o semi-terminado. Una vez todo el proceso de transformación ha finalizado, el producto ha de ser distribuido hasta llegar al cliente final, usualmente pasando antes por uno o varios intermediarios cuyo objetivo debe ser facilitar su distribución.

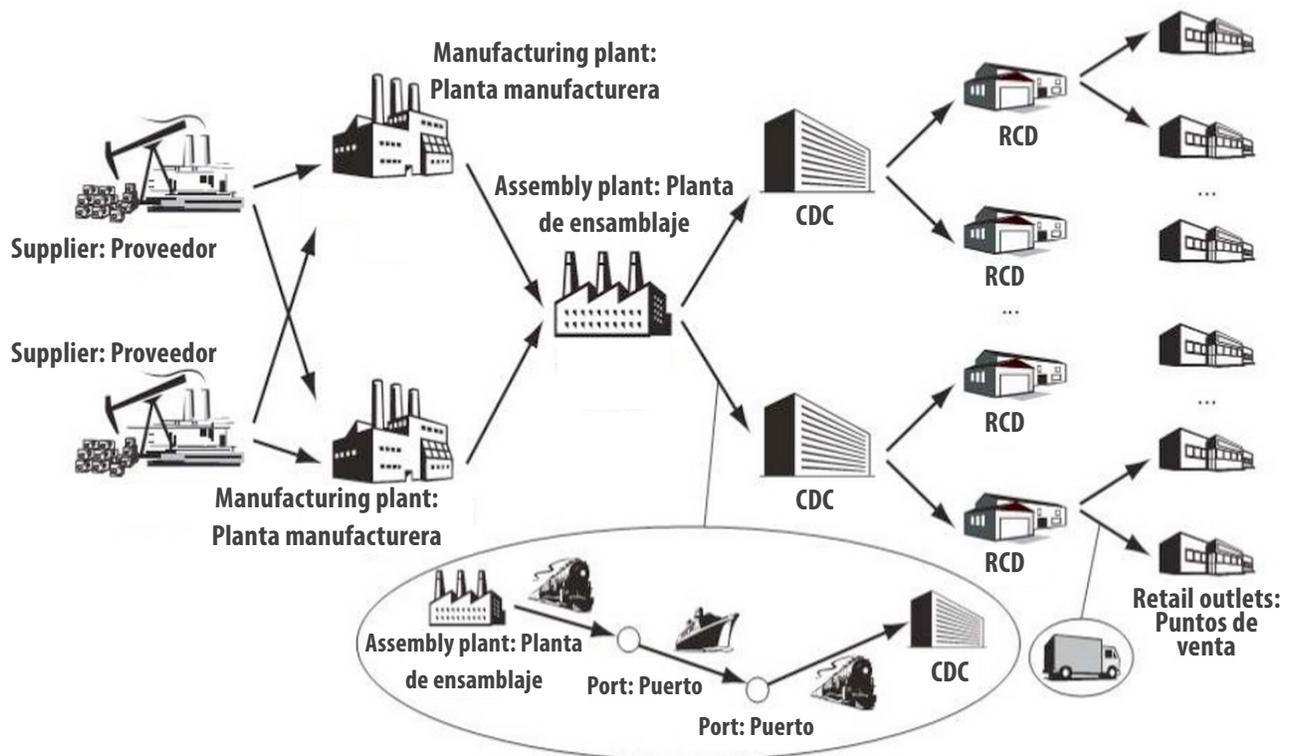


Figura 1. Esquema genérico de una cadena de suministros  
Fuente: Ghianni, Laporte, & Musmanno (2004).

Tal proceso compone un sistema llamado Cadena de suministros. Este fue descrito aquí en un solo párrafo, pero realmente es algo muy complejo cuya administración no es una tarea fácil debido a la gran diversidad de decisiones que deben ser tomadas para que el sistema se desempeñe de la mejor manera posible. En la Figura 1 puede observarse un esquema muy simplificado de una cadena de suministros. Dada entonces su complejidad, para que este sistema pueda ser estudiado desde un entorno académico suele ser dividido en diversas ramas. Por ejemplo, todo el sistema en general suele estudiarse desde la Logística o Administración de la cadena de suministros. Esta a su vez suele dividirse en Gestión del aprovisionamiento, Gestión de inventarios, Gestión de almacenes, Gestión de la distribución o transporte y Gestión de operaciones. Naturalmente, la que nos atañe en este módulo se refiere exclusivamente a esta última, pero es importante entender que ella hace parte de un todo que la reviste de un contexto sin el cual no es posible entender plenamente la gestión o administración de operaciones.

En palabras concretas, la administración de operaciones se encarga de diseñar y gestionar la parte del proceso logístico que se refiere a la transformación de la materia prima en producto terminado. Esta transformación puede incluir operaciones tan disímiles como corte, fundición, soldadura, limpieza, tratamiento térmico, ensamble, pasteurización, empaque, embalaje o un larguísimo etcétera que dependerá de lo que se quiera manufacturar y sus características particulares. Es importante entonces aclarar en este punto que la administración de operaciones no se refiere al diseño particular y detallado de cada una de esas operaciones. Por ejemplo, la administración de operaciones no se

encarga de decidir cuál es la mejor temperatura para el tratamiento térmico de una aleación (esto sería competencia de la ingeniería metalúrgica), ni tampoco se encarga de decidir cuál debe ser la cantidad de agua que debe extraerse a la leche para producir leche condensada (esto sería competencia de la ingeniería de alimentos).

Esto indica que la administración de operaciones se encarga de estudiar los procesos de manera holística y no desde sus particularidades técnicas. Para lograr esto, el administrador de operaciones debe tomar muchos tipos de decisiones que usualmente suelen dividirse en niveles. Estos niveles se refieren al tiempo en que las consecuencias de la decisión afectarán el sistema. Así pues, se tendrán tres niveles, a saber:

- Decisiones estratégicas: son decisiones a largo plazo, con un horizonte de planeación desde 1 año en adelante. Usualmente son decisiones que implican una gran inversión de dinero. Académicamente es difícil diferenciar entre las decisiones estratégicas relacionadas con la administración de operaciones y aquellas relacionadas con la administración de la cadena de suministros, debido a la fuerte interrelación entre estas. Tales decisiones incluyen: planeación de la estrategia de proceso, diseño de producto, localización de instalaciones, planeación de la capacidad, distribución en planta.
- Decisiones tácticas: son decisiones a mediano plazo, entre 3 y 12 meses, con revisión semanal, mensual o trimestral. Tales decisiones incluyen: pronóstico de la demanda, planeación agregada de operaciones (esta establece las cantidades a producir por unidad de tiempo, para familias de productos. Incluye decisio-

nes relacionadas con el nivel de la mano de obra, niveles de inventario, unidades de producto fabricadas en tiempos extra y unidades subcontratadas, teniendo como criterio principal, los costos de producción), programación maestra y planeación de los requerimientos de materiales (las cuales disgregan por producto el plan agregado y ofrecen detalles sobre las piezas requeridas en su manufactura).

- **Decisiones operativas:** son decisiones a corto plazo, entre 1 y 90 días, e incluso programación por horas. Son decisiones que pretenden controlar el tiempo de las operaciones, dadas las necesidades diarias de producción. Para esto básicamente se debe decidir cómo cargar cada centro de trabajo y cómo secuenciar los trabajos. A pesar de su aparente sencillez, las decisiones operativas son las que tienen mayor complejidad matemática en el marco de la administración de operaciones.

Además de estas decisiones, que hacen parte del núcleo de la administración de operaciones, hay otro tipo de decisiones que están relacionadas con este tipo de sistemas y que también tienen su grado de importancia para lograr los objetivos de calidad y productividad que debe tener toda compañía manufacturera. Estas son:

- **Gestión de la calidad:** parafraseando la Norma ISO 9000:2005, la gestión de la calidad se refiere a las actividades coordinadas para dirigir y controlar una organización en lo relativo a la calidad, es decir, en el grado en que un conjunto de características cumple con las necesidades o expectativas implícitas u obligatorias, ya sea de un proceso o de un producto.
- **Ingeniería de métodos:** según Niebel, & Freivalds (2009), “la ingeniería de méto-

dos incluye el diseño, la creación y la selección de los mejores métodos de fabricación, procesos, herramientas, equipos y habilidades para manufacturar un producto con base en las especificaciones desarrolladas por el área de ingeniería del producto”. En otras palabras, “se refiere a una técnica para aumentar la producción por unidad de tiempo o reducir el costo por unidad de producción: en otras palabras, a la mejora de la productividad”.

- **Gestión del mantenimiento:** según Heizer, & Render (2007), “el objetivo del mantenimiento es mantener la capacidad del sistema mientras se controlan los costos”. En otras palabras, “el mantenimiento incluye todas las actividades involucradas en mantener un equipo para que funcione correctamente”.

Una gran parte de las decisiones estratégicas, tácticas y operativas descritas anteriormente serán desarrolladas en el presente módulo. Infortunadamente no todas pueden ser abordadas debido a su extensión temática, la cual es muy amplia para un curso básico de Administración de operaciones. Debe además aclararse en este punto que esta forma de abordar la administración de operaciones hace parte de lo que académicamente se llama “Manufactura tradicional”. Sin embargo, existen otras formas o filosofías de abordar las decisiones relacionadas con la manufactura. Estas filosofías son dos: Lean Manufacturing y Teoría de restricciones. Los conceptos básicos relacionados con estas se pueden abordar en las lecturas complementarias.

El objetivo fundamental que pretende lograr un administrador de operaciones con la toma de todos estos tipos de decisiones es diseñar y gestionar un sistema cada vez

más productivo. En palabras castizas, esto significa producir más con menos. Es por esto que antes de entrar en detalle con los tipos de decisiones en la administración de operaciones, es importante estudiar cómo medir la productividad de un sistema. Además, es importante también abordar algunas herramientas básicas que permitirán analizar y diseñar cualquier proceso de manufactura a través de un mejor entendimiento de su funcionamiento, y que por tanto permitirán una mejor toma de decisiones en la mejora de dichos procesos. Estas temáticas serán desarrolladas en el resto de la presente unidad.

## Medición de la productividad

Recordemos que la administración de operaciones se encarga de diseñar y gestionar la parte del proceso logístico que se refiere a la transformación de la materia prima en producto terminado, es decir, dadas unas entradas (materia prima, mano de obra, maquinaria, energía, dinero) que se entrelazan entre sí en el proceso de transformación, se obtienen unas salidas: un producto con un valor agregado. Un esquema de este proceso puede observarse en la Figura 2.



Figura 2. Esquema genérico de un proceso productivo  
Fuente: Propia.

Estos procesos (así como cualquier otro tipo de proceso) requieren de una medida que indique si se están comportando o no de una manera adecuada. Así pues, a lo largo de todo el módulo de administración de operaciones serán estudiados diversos indi-

cadore o medidas que le ayudarán a saber al tomador de decisiones qué tan bien se está comportando el sistema. Naturalmente esto dependerá del tipo de decisión que esté tomando, de acuerdo a los distintos niveles que fueron estudiados en la sección anterior. No obstante, existe un indicador general asociado a todo sistema productivo, el cual mostrará qué tanto se está produciendo con los recursos que se consumen. A este indicador se le llamará Productividad y básicamente se trata de una relación entre las entradas y las salidas de un sistema productivo, como se observa en la ecuación 1. Esta relación indica que mientras se produzcan más salidas con menos entradas, mejor se comportará el sistema productivo.

$$Productividad = \frac{Salidas}{Entradas}$$

Sin embargo, este indicador es una medida relativa, lo que quiere decir que para que ofrezca información relevante debe ser comparado. Por ejemplo, si se calcula que se produjeron 10 litros de kumis con 12 litros de leche, o que en un restaurante se atendieron en promedio 7,5 clientes por cada hora de trabajo de un mesero, ¿representan estas medidas una gran cantidad o una poca cantidad? ¿Fueron estos sistemas muy productivos o poco productivos? Es imposible responder estas preguntas si cada una de esas cifras no es comparada. Para esto, la medida puede compararse con medidas de otras empresas del mismo sector, o con otras plantas o franquicias de la misma empresa, o con resultados de la misma empresa u operación en periodos anteriores.

La ecuación 1 muestra la relación más general para la productividad, pero ésta puede ser expresada de distintas formas, a saber:

medidas parciales, medidas multifactoriales o medidas totales. La primera calcula la productividad con relación a un solo insumo, la segunda, con respecto a varios insumos, y la última, con relación a la totalidad de los insumos.

**Ejemplo 1.** La empresa Mi sillita ha recopilado datos de su gestión en el año 2014, los cuales se muestran en las siguientes tablas. Calcule distintas medidas de la productividad (parcial, multifactorial y total).

Producto	Cantidad(\$)
Unidades terminadas	200.000.000
Trabajo en proceso (WIP)	50.000.000
Dividendos	20.000.000

Insumos	Cantidad (\$)
Humanos	30.000.000
Materiales	85.000.000
Energía	5.000.000
Otros egresos	2.000.000

Los siguientes serían ejemplos de medidas parciales:

$$\frac{\text{Total producto}}{\text{Humanos}} = \frac{\text{Unidades terminadas} + \text{WIP} + \text{Dividendos}}{\text{Humanos}} = \frac{270.000.000}{30.000.000} = 9,00$$

$$\frac{\text{Total producto}}{\text{Materiales}} = \frac{\text{Unidades terminadas} + \text{WIP} + \text{Dividendos}}{\text{Materiales}} = \frac{270.000.000}{85.000.000} = 3,18$$

$$\frac{\text{Unidades terminadas}}{\text{Energía}} = \frac{200.000.000}{5.000.000} = 40,00$$

Los siguientes serían ejemplos de medidas multifactoriales:

$$\frac{\text{Total producto}}{\text{Humanos} + \text{Material}} = \frac{\text{Unidades terminadas} + \text{WIP} + \text{Dividendos}}{\text{Humanos} + \text{Material}} = \frac{270.000.000}{115.000.000} = 2,35$$

$$\frac{\text{Unidades terminadas}}{\text{Energía} + \text{Material}} = \frac{200.000.000}{90.000.000} = 2,22$$

El siguiente sería el ejemplo de medida total:

$$\frac{\text{Total producto}}{\text{Total insumos}} = \frac{\text{Unidades terminadas} + \text{WIP} + \text{Dividendos}}{\text{Humanos} + \text{Material} + \text{Energía} + \text{Otros}} = \frac{270.000.000}{122.000.000} = 2,21$$

Para el caso del Ejemplo 1, todos los datos estaban dados en unidades económicas, pero la productividad también puede calcularse en otras unidades, tal como se verá en los Ejemplos 2 y 3. En estos casos solo pueden ser calculadas medidas parciales, pues no es posible en una suma combinar unidades disímiles como por ejemplo, kg de material y horas-hombre.

**Ejemplo 2.** En una hora de operación de la compañía Alquepina, el gerente de producción observó que para producir 100 litros de kumis se requirieron 5 kg de azúcar. A continuación se calcula la productividad parcial, la cual indica que por cada kg de azúcar utilizado se han producido 20 litros de kumis.

$$\frac{100 \text{ litros}}{5 \text{ kg}} = 20 \text{ litros/kg}$$

**Ejemplo 3.** A la hora del almuerzo en un día normal en el restaurante Las delicias de mamá, se contabilizó una venta total de 85 almuerzos. El total de tiempo trabajado ese día por los 4 meseros con que se cuenta, desde que se sirvió el primer almuerzo hasta el último, fue de 2,5 horas. A continuación se calcula la productividad parcial, la cual inicialmente se hará respecto a los meseros y luego respecto a las horas trabajadas.

$$\frac{85 \text{ almuerzos}}{4 \text{ meseros}} = 21,25 \text{ almuerzos/mesero}$$

$$\frac{85 \text{ almuerzos}}{2,5 \text{ horas}} = 34,00 \text{ almuerzos/hora}$$

Sin embargo y continuando con el ejemplo, una medida de productividad más dicente se puede calcular si se tiene en cuenta lo siguiente. Como cada mesero ha trabajado 2,5 horas, el total de horas trabajadas en la totalidad del sistema es de: Dado esto, la productividad fue de 8,5 almuerzos por hora-hombre, es decir que en una hora de trabajo, cada mesero atendió en promedio 8,5 clientes.

$$\frac{85 \text{ almuerzos}}{10 \text{ horas} - \text{hombre}} = 8,50 \text{ almuerzos/hora} - \text{hombre}$$

Anteriormente se comentó que la cifra de productividad que sea calculada, no da mucha información si esta no es comparada con otras empresas o con resultados de la misma empresa en otro periodo. Para aclarar esto, observe el Ejemplo 4.

**Ejemplo 4.** El restaurante Las delicias de mamá fue contratado para atender un evento especial en sus instalaciones. Para esta ocasión especial contrató por horas un mesero adicional. Ese día se vendieron 118 almuerzos en un periodo de 3 horas. Calcule nuevamente la productividad del sistema y compare con el Ejemplo 3.

$$\frac{118 \text{ almuerzos}}{3 \text{ horas} * 5 \text{ hombres}} = \frac{118 \text{ almuerzos}}{15 \text{ horas} - \text{hombre}} = 7,87 \text{ almuerzos/hora} - \text{hombre}$$

El cálculo de la productividad arroja un resultado de 7,87 almuerzos por hora-hombre, lo cual indica que ese día se fue menos productivo que el día anterior. Esto da a la gerencia un indicador de que el sistema no se comportó tan bien como antes, y se debe entonces

indagar las razones. Por ejemplo: ¿el nuevo mesero no es tan ágil como los otros? ¿El aumento en el número de clientes sobrepasó la capacidad del sistema? ¿Los platos pedidos tardaban más tiempo en ser elaborados? Siempre es importante no quedarse solo con el número calculado, sino darle una interpretación profesional y preguntarse constantemente “¿por qué?”

## Análisis y diseño de procesos

Desde el inicio de la unidad se ha mencionado la palabra proceso, pero no se ha dado ninguna definición formal de ella. Según Chase, Jacobs, & Aquilano (2009), un proceso es “una parte cualquiera de una organización que toma insumos y los transforma en productos que, según espera, tendrán un valor más alto para ella que los insumos originales”. Este concepto es fácil de entender, pero en la práctica, entender un proceso requiere de ciertas herramientas que facilitarán su diseño, su gestión y la mejora de su desempeño. En esta sección se estudiarán dos formas para lograr esto: diagramas de flujo y medidas de desempeño.

## Diagramas de flujo

Un diagrama de flujo es un diagrama que muestra los elementos básicos de un proceso, como las tareas, los flujos y las zonas de almacenamiento. Es una herramienta que representa gráficamente un proceso y es útil para tener una visión general del mismo y así facilitar su entendimiento. Para esto hace uso de un conjunto de símbolos, mostrados en la Figura 3.

En la Figura 3, el cuadrado indica las tareas u operaciones que implican alguna transformación (fundición, soldadura, limpieza, ensamble, empaque, etc.). El rombo indica un punto de decisión, es decir, un punto del proceso en el cual hay varias alternativas y cada una implica en el diagrama un flujo distinto. A veces estas alternativas pueden ser un reproceso debido por ejemplo a un fallo de calidad. El triángulo indica un punto del proceso en el cual hay una espera, ya sea porque se debe almacenar o se encuentra almacenado una materia prima, un producto semi-terminado o un producto terminado, o porque alguno de estos se encuentra en una cola en espera de ser procesado. Finalmente, estos componentes son unidos por flechas que indican el flujo de material o clientes.



Figura 3. Símbolos usados en un diagrama de flujo.

Fuente: Propia.

En la Figura 4 se muestra un ejemplo simplificado de un diagrama de flujo de la elaboración de una hamburguesa en Burger King. Chase, et al. (2009) lo explican así:

*La característica singular del proceso de Burger King es una banda asadora muy especializada. Las hamburguesas crudas se colocan en una banda que pasa por un asador encendido. Las hamburguesas quedan cocidas de los dos lados exactamente en 90 segundos y tienen un sabor único a carne asada. Debido al tiempo fijo para que la hamburguesa pase por la banda asadora, el grosor de las hamburguesas debe ser el mismo para todas. El pan también se calienta en una banda. Este sistema produce un producto único y muy consistente. Las hamburguesas asadas se almacenan en un recipiente caliente. Durante periodos de gran demanda, se preparan algunas hamburguesas estándar y se guardan en el inventario para su entrega inmediata. Las hamburguesas especiales, con combinaciones únicas de condimentos, se preparan por pedido. Este proceso híbrido ofrece flexibili-*

*dad para responder a las preferencias de los clientes en razón del proceso final de armarlas por pedido; de ahí el lema "a su gusto" de Burger King.*

Estos diagramas también pueden ser usados para procesos relacionados con servicios, como se muestra en la Figura 5. Allí se observa el procedimiento formal de servicio asociado al sistema de información empleado para captar datos de los huéspedes en el hotel Ritz Carlton Huntington de Pasadena, California.

### Medición del desempeño de los procesos

Además de la productividad, que solo relaciona las salidas de un sistema productivo con sus entradas (pero no por esta sencillez es menos importante), son necesarias otro tipo de medidas que indiquen desde otros puntos de vista si un proceso se está comportando correctamente o no. Algunas de estas medidas son:

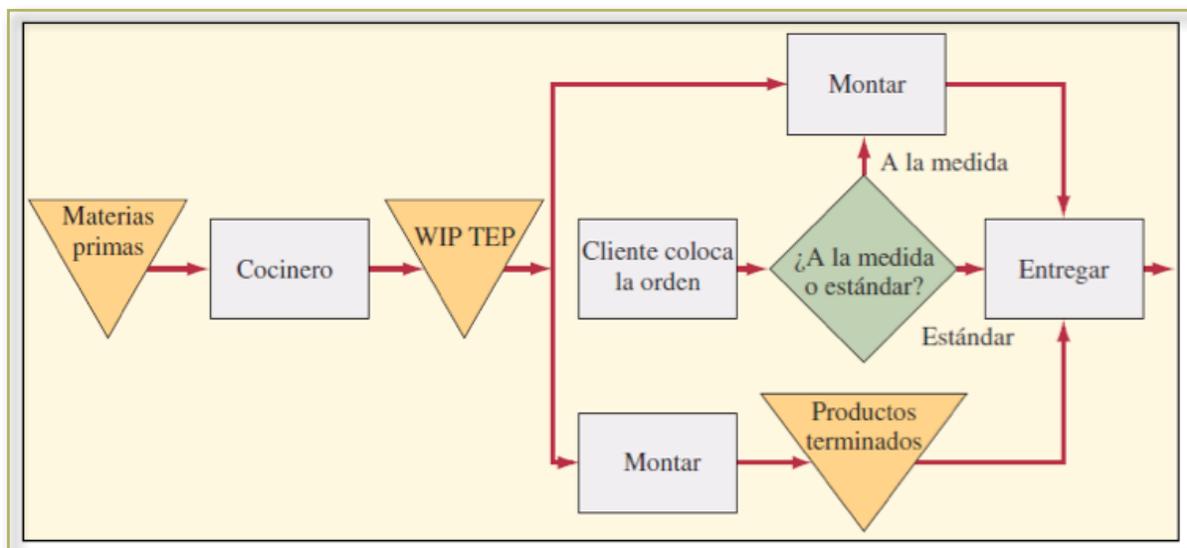


Figura 4. Diagrama de flujo para la producción de hamburguesas en Burger King Fuente: Chase, et al. (2009).

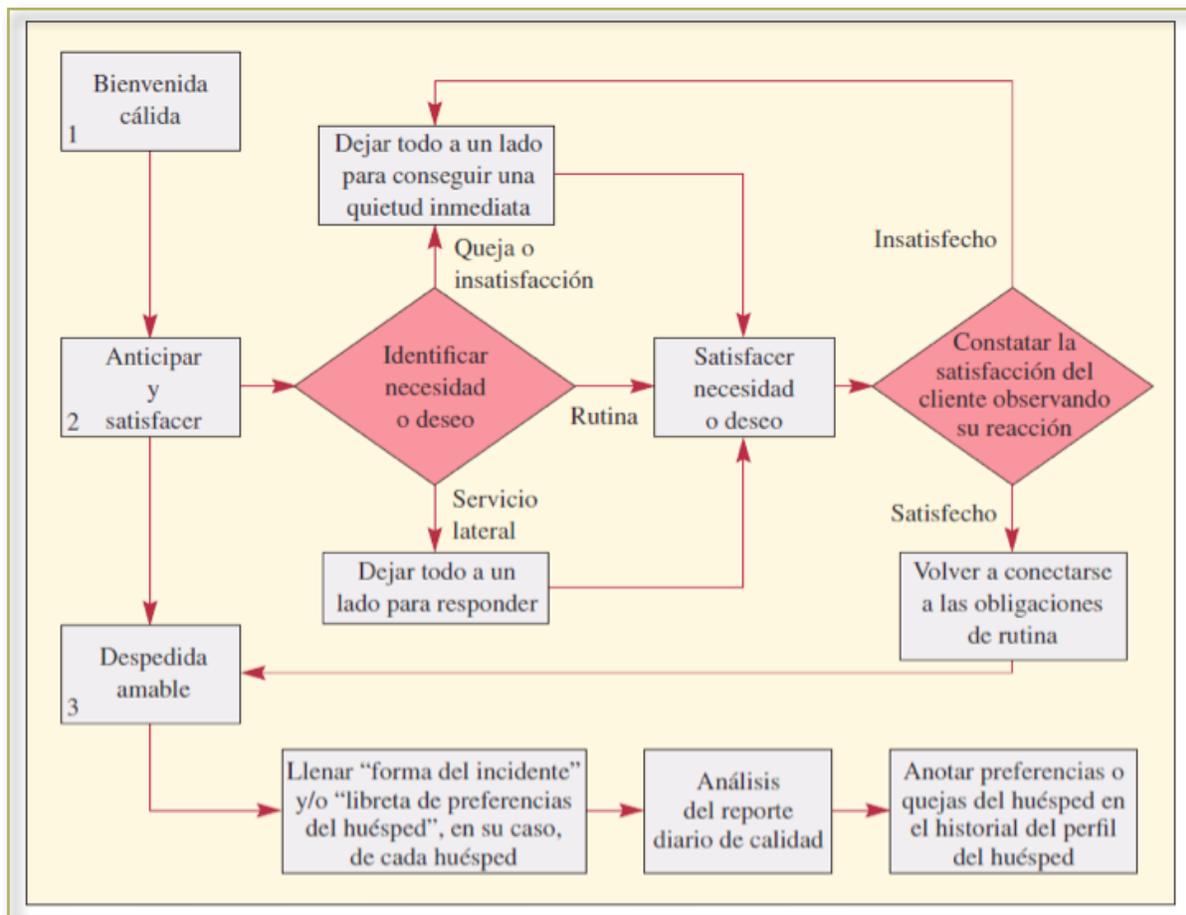


Figura 5. Diagrama de flujo del sistema de información para captar datos de los huéspedes en el hotel Ritz Carlton Huntington  
Fuente: Chase, et al. (2009).

- **Utilización:** es la proporción de tiempo durante el cual un recurso está activo de hecho en relación con el tiempo disponible para su uso (Ecuación 2). Por ejemplo, si una máquina está disponible 16 horas al día pero se utiliza durante 10 horas. La utilización es de:

$$\frac{10}{16} = 62,5\%$$

$$\text{Utilización} = \frac{\text{Tiempo activo}}{\text{Tiempo disponible}}$$

- **Eficiencia:** indica la proporción de la producción real de un proceso en relación con algún parámetro, usualmente la producción estándar (Ecuación 3), en donde esta se entiende como la cantidad nominal de unidades que puede producir un proceso por unidad de tiempo, es decir, la cantidad con la que fue diseñada para producir. Por ejemplo, si una máquina está diseñada para empacar 20 bolsas de leche por minuto pero en un día dado empacó en promedio 25 bolsas por minuto, su eficiencia fue de:

$$\frac{25}{20} = 125\%$$

$$\text{Eficiencia} = \frac{\text{Producción real}}{\text{Producción estándar}}$$

- Tiempo de corrida: tiempo que se requiere para producir un lote de piezas (Ecuación 4). Por ejemplo, si se ha establecido que el tiempo de producción unitario de una máquina es de 3 segundos/unidad y se va a producir un lote de 2000 unidades, el tiempo de corrida es de:

$$3 * 2000 = 6000 \text{ segundos} = 100 \text{ minutos}$$

$$\text{Tiempo de corrida} = \left( \text{Tiempo de producción unitario} \right) * \left( \text{Tamaño del lote} \right)$$

- Tiempo de preparación (set-up): tiempo que se requiere para preparar la máquina a fin de fabricar un artículo en particular. Suponga por ejemplo que usted tiene un proceso donde hace yogures de diversos sabores. En un momento dado la producción de un sabor se termina y para poder iniciar con la producción de otro sabor en las mismas máquinas, estas deben pasar por un proceso de limpieza. El tiempo que demora esta limpieza sería el tiempo de preparación. Usualmente este tiempo es asociado a un lote de producción y no a una unidad producida.
- Tiempo de operación: es el tiempo total necesario para la producción de un lote, incluyendo los tiempos de corrida y de preparación (Ecuación 5).

$$\text{Tiempo de operación} = \left( \text{Tiempo de preparación} \right) + \left( \text{Tiempo de corrida} \right)$$

- Tiempo de ciclo (Lead time): es el tiempo promedio que una unidad tarda en pasar por el sistema, incluido el tiempo que transcurre mientras espera en una fila. Note entonces que el tiempo de ciclo no necesariamente es igual a la suma simple de la sucesión de los tiempos que tarda cada proceso, pues usualmente hay demoras producidas por tiempos que las unidades tardan en cola. Dado que los tiempos en cola son aleatorios, se habla entonces de que el tiempo de ciclo es un tiempo promedio, pues cada unidad demora un tiempo distinto en el tránsito por todo el proceso.
- Throughput: es la cantidad de productos que se espera que el proceso haga dentro de un periodo. Puede expresarse en términos de unidades/hora, kg/minuto, unidades/día, toneladas/día, etc.
- Ley de Little: es una ecuación que establece una relación entre el tiempo de ciclo, el throughput y el trabajo en proceso (Work in process: WIP), entendiendo este último como la cantidad de unidades que hay en un momento dado en el sistema productivo, ya sea siendo procesadas o en espera de ser procesadas. Esta ley es muy útil para calcular cualquiera de estos parámetros dados los otros dos (Ecuación 6).

$$\text{WIP} = \text{Lead time} * \text{Throughput}$$

**Ejemplo 5.** (Adaptado de Chase, et al., 2009)  
La Figura 6 es un diagrama simplificado del

proceso de producir pan. El primer proceso es preparar la masa y hornear las hogazas, lo que allí se conoce como la producción de pan. El segundo es empacar las hogazas. Debido al tamaño de las batidoras de la panadería, el pan es producido en lotes de 100 unidades. El departamento de producción

de pan termina un lote de 100 hogazas cada hora, mientras que el de empacado solo necesita 0,75 horas para colocar las 100 hogazas en sus bolsas (arrojando un throughput de 133,33 hogazas/hora, calculado a través de la división  $100/0,75$ ).

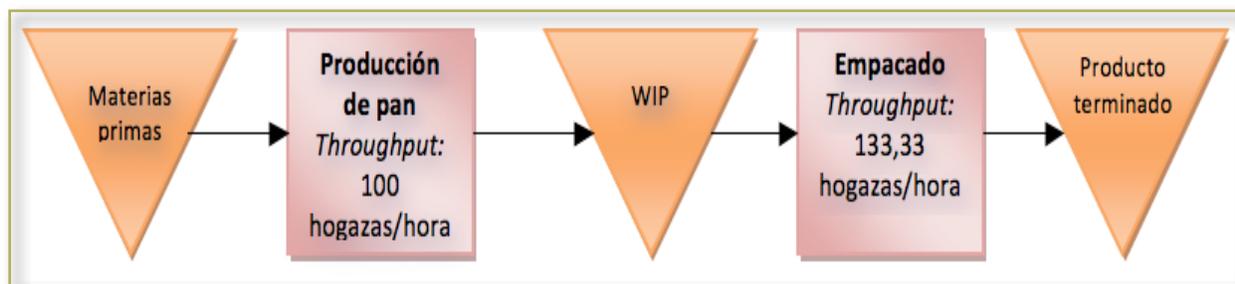


Figura 6. Diagrama de flujo para la producción de pan en una línea  
Fuente: Propia.

A partir de lo anterior, se puede ver que el departamento de producción es el cuello de botella del proceso. Un cuello de botella es la actividad de un proceso que limita la capacidad global del proceso, la cual siempre será igual a la capacidad del cuello de botella. Hay que anotar que el cuello de botella siempre será la operación más lenta del proceso. Por lo tanto, si se supone que las actividades de producción de pan y las de empaque operan la misma cantidad de tiempo cada día, entonces todo el sistema de producción de la panificadora tiene una capacidad de 100 hogazas por hora. Advierta que en el transcurso del día la operación de empacado estará inactiva durante periodos de un cuarto de hora, mientras la siguiente serie de panes se está produciendo, pero el departamento de empacado ha terminado de empacar la serie anterior.

Suponga ahora que en lugar de tener tan solo una operación para producir pan, ahora hay dos, como muestra la Figura 7. El throughput para cada operación individual productora de pan sigue siendo de 100 hogazas/hora. El throughput para las dos líneas de producción de pan operando juntas es entonces de 200 hogazas/hora. Dado que la operación de empacado puede producir 133,33 hogazas/hora, la operación de empacado ahora es el cuello de botella. Si la producción y el empacado fueran operados la misma cantidad de horas cada día, sería preciso limitar la cantidad de pan que se fabricará, porque no se cuenta con capacidad bastante para empacarlo. No obstante, si se llevara a cabo la operación de empacado durante tres turnos de ocho horas y la producción de pan durante dos turnos cada día, en tal caso la capacidad diaria de cada operación sería idéntica: 3200 hogazas al día<sup>1</sup> (se presupone que la operación de empacado inicia una hora después

<sup>1</sup> Este valor se calcula así:  $(200 \text{ hogazas/hora}) * (8 \text{ horas/turno}) * (2 \text{ turnos/día}) = 3200 \text{ hogazas/día}$   
O también:  $(133,33 \text{ hogazas/hora}) * (8 \text{ horas/turno}) * (3 \text{ turnos/día}) = 3200 \text{ hogazas/día}$

de la operación de producción de pan). Hacer esto requiere crear inventario para un turno cada día en forma de trabajo en pro-

ceso. Éste se empastraría durante el tercer turno. Dado esto, ¿cuál es el tiempo de ciclo de la panificadora?

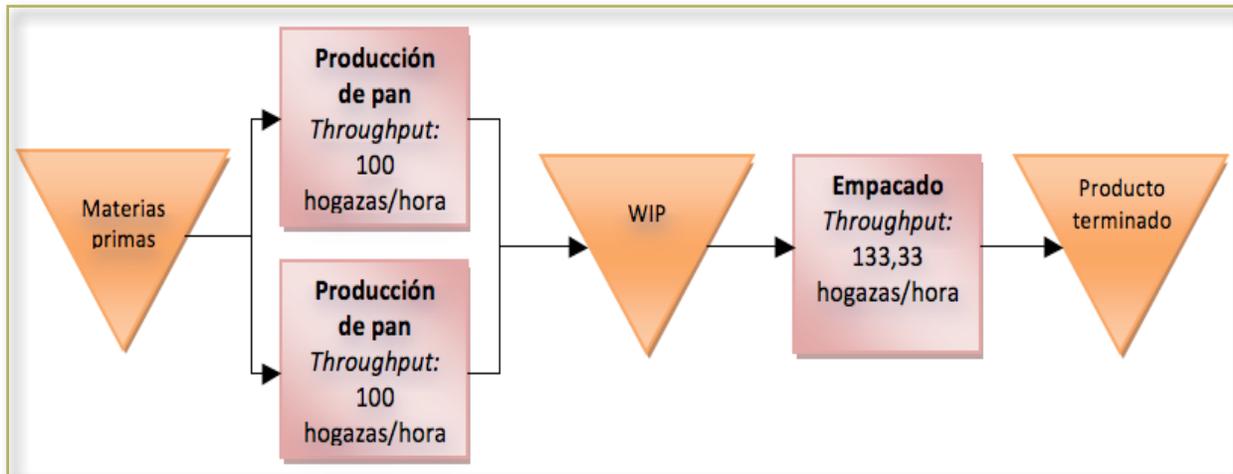


Figura 7. Diagrama de flujo para la producción de pan en dos líneas  
Fuente: Propia.

El cálculo en la operación inicial, con un solo proceso para la producción de pan, es fácil porque no se crearía inventario entre el proceso de producción de pan y el de empastrado. En este caso, el tiempo de ciclo sería de 1,75 horas. Sin embargo, cuando se maneja la operación de empastrado con tres turnos, es preciso considerar la espera promedio en el inventario de trabajo en proceso. Si las dos operaciones para producir pan empiezan al mismo tiempo, entonces al término de la primera hora las primeras 100 hogazas pasan inmediatamente a empastrado, mientras que las segundas 100 hogazas quedan en espera. El tiempo de espera para cada lote de 100 hogazas incrementa hasta que termina el horneado al final del segundo turno.

Se trata de un caso donde la ley de Little sirve para estimar el tiempo que el pan está en espera en trabajo en proceso. Para aplicar la ley de Little se necesita calcular el promedio del trabajo en proceso entre producción y empastrado. En los primeros dos turnos el inventario crece de 0 a 1200 hogazas<sup>2</sup>. Se calcula que el promedio del trabajo en proceso (WIP) para este periodo de 16 horas es de 600 hogazas (la mitad del máximo). Con el último turno de ocho horas el inventario baja del máximo de 1200 hogazas a 0. De nuevo, el promedio del trabajo en proceso es de 600 hogazas. Dado lo anterior, el promedio general del periodo de 24 horas es simplemente 600 hogazas de pan. Teniendo en cuenta que la capacidad del proceso es la del cuello de botella (proceso de empa-

<sup>2</sup> Como ya se calculó, la etapa de producción fabricará 3200 hogazas en 16 horas. Como en la primera hora la etapa de empastrado no opera, en las 15 horas restantes es capaz de procesar: La diferencia entre 3200 y 2000 arroja las 1200 hogazas que se acumulan como WIP

do en este caso: 133,33 hogazas/hora), la ley de Little calcula que el tiempo promedio que las hogazas están en trabajo en proceso es de 4,5 horas, así:

$$Lead\ time = \frac{WIP}{Throughput} = \frac{600}{133,33} = 4,5\ horas$$

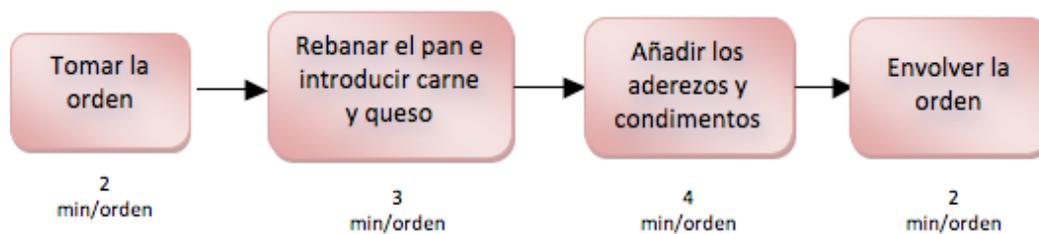
El tiempo total de ciclo es el tiempo que las hogazas están en trabajo en proceso más el tiempo de las operaciones para los procesos de producción de pan y de empackado. Luego entonces, el tiempo total de ciclo es de 6,25 horas (1 hora para producción del pan + 4,5 horas en inventario + 0,75 horas para empackado).

## Actividades auto-evaluativas

1. Usted es gerente de operaciones y le preocupa poder cumplir con los requisitos de ventas en los meses entrantes. Le acaban de presentar el informe de producción mostrado en la siguiente tabla. Encuentre la productividad mensual (unid/hora) y compare el desempeño de este sistema en los 4 meses.

	Enero	Febrero	Marzo	Abril
Unidades producidas	2300	1800	2800	3000
Horas-máquina	325	200	400	320
Número de máquinas	3	5	4	4

2. Burger Queen produce hamburguesas a pedido. Esta empresa está analizando el proceso del negocio, por lo cual a continuación se presenta el flujo general del proceso. En cada uno de los pasos del proceso trabaja una sola persona.



Burger Queen quiere conocer los siguientes datos sobre una jornada típica de 8 horas:

- a. ¿Cuál es la producción máxima actual del proceso?
- b. Si se añade una persona, ¿en qué paso se sumaría y cuál sería el beneficio?
- c. ¿Pasar un minuto de Pan y Carne a Tomar la orden traería algún beneficio? Suponga que no se ha hecho el cambio del punto b.

d. ¿Pasar un minuto de Condimentos a Envolver traería algún beneficio? Suponga que no se han hecho los cambios de los puntos b y c.

Para las siguientes preguntas suponga que la demanda es tan alta que el proceso trabaja a su máxima capacidad (de manera continua).

e. Suponga que después de transcurridas las 8 horas de haber abierto el negocio, ya no se libera más material al sistema. ¿Cuánto tiempo demoraría el proceso para consumir todo el inventario que quedó en proceso?

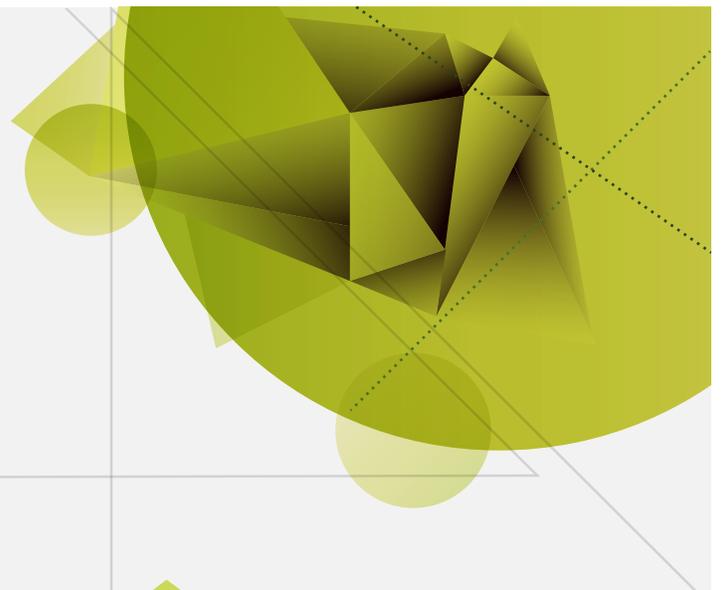
f. Haciendo uso de la ley de Little, calcule el tiempo de ciclo promedio.



# 1

## Unidad 1

Planeación de la  
estrategia de proceso



Administración de operaciones

Autor: Rafael Tordecillas

## Introducción

En la presente unidad, se estudiarán las decisiones de tipo estratégico que se deben tomar en un sistema productivo. Estas se refieren a decisiones a largo plazo, con un horizonte de planeación desde 1 año en adelante. Usualmente son decisiones que implican una gran inversión de dinero. Académicamente es difícil diferenciar entre las decisiones estratégicas relacionadas con la administración de operaciones y aquellas relacionadas con la administración de la cadena de suministros, debido a la fuerte interrelación entre estas. Tales decisiones incluyen: planeación de la estrategia de proceso, diseño de producto, localización de instalaciones, planeación de la capacidad, distribución en planta.

Dada la gran amplitud de estos temas, no se estudiarán todos estos tipos de decisiones. En la presente unidad solo se abordarán aquellas relacionadas con la planeación de la estrategia de proceso y la planeación de la capacidad. En particular para esta semana, se estudiará la planeación de la estrategia de proceso.

Debido a las características de la temática correspondiente a esta semana, en esta cartilla no se presentarán ejemplos numéricos. Dado esto, se recomienda dar una leída rápida a la cartilla y luego leerla nuevamente de forma más pausada, haciendo hincapié en los conceptos que mayor dificultad le generaron. No olvide consultar con su tutor cualquier duda que se le presente.

## Planeación de la estrategia de proceso

En un sistema productivo, la decisión más importante que debe tomarse inicialmente es la relacionada con la manera en que se va a realizar todo el proceso de manufactura, es decir, cuál es el mejor modo de producir. Básicamente esta decisión depende del tipo de producto que se vaya a manufacturar, pues no es lo mismo construir un edificio que producir miles de botellas de cerveza. Dependiendo entonces de esto, así será proyectado y diseñado el sistema productivo que sea más conveniente para la organización, con el fin de satisfacer de la mejor manera posible los requerimientos del cliente y las especificaciones del producto, y lograr a largo plazo llevar a cabo el proceso de manufactura de una forma eficiente, flexible, productiva, a bajos costos y con calidad en el proceso y en el producto.

Prácticamente todos los bienes y servicios se fabrican utilizando alguno de los siguientes cuatro sistemas de producción o estrategias de proceso (como se les puede llamar indistintamente), o alguna variante de ellos:

- Enfoque de proceso.
- Enfoque repetitivo.
- Enfoque de producto.

### ■ Personalización a gran escala.

Las diferencias básicas entre estos cuatro sistemas se diagraman en la Figura 1. Allí puede observarse que los parámetros fundamentales por los cuales se diferencian son la flexibilidad y el volumen. La primera se refiere a qué tanta capacidad tiene el sistema productivo para manufacturar productos de características diversas, es decir, a pedido del cliente. Por otra parte, el volumen se refiere a qué tanta capacidad tiene el sistema productivo para fabricar altas cantidades del mismo o los mismos tipos de productos.

Note entonces en la Figura 1 en qué lugar se ubica cada estrategia. Por un lado se tienen los dos casos extremos: el enfoque de proceso, el cual se caracteriza por tener la capacidad de producir una alta variedad pero en volúmenes bajos, y el enfoque de producto, que se caracteriza por tener la capacidad de producir un alto volumen pero con poca flexibilidad. Como caso intermedio se tiene el enfoque repetitivo, el cual en cuanto a volumen y variedad se encuentra a medio camino entre los enfoques de proceso y de producto. Finalmente y como caso casi ideal, se encuentra la personalización a gran escala, la cual combina la alta flexibilidad del enfoque de proceso con el alto volumen del enfoque de producto. A continuación se hablará un poco de cada una de estos sistemas de producción.

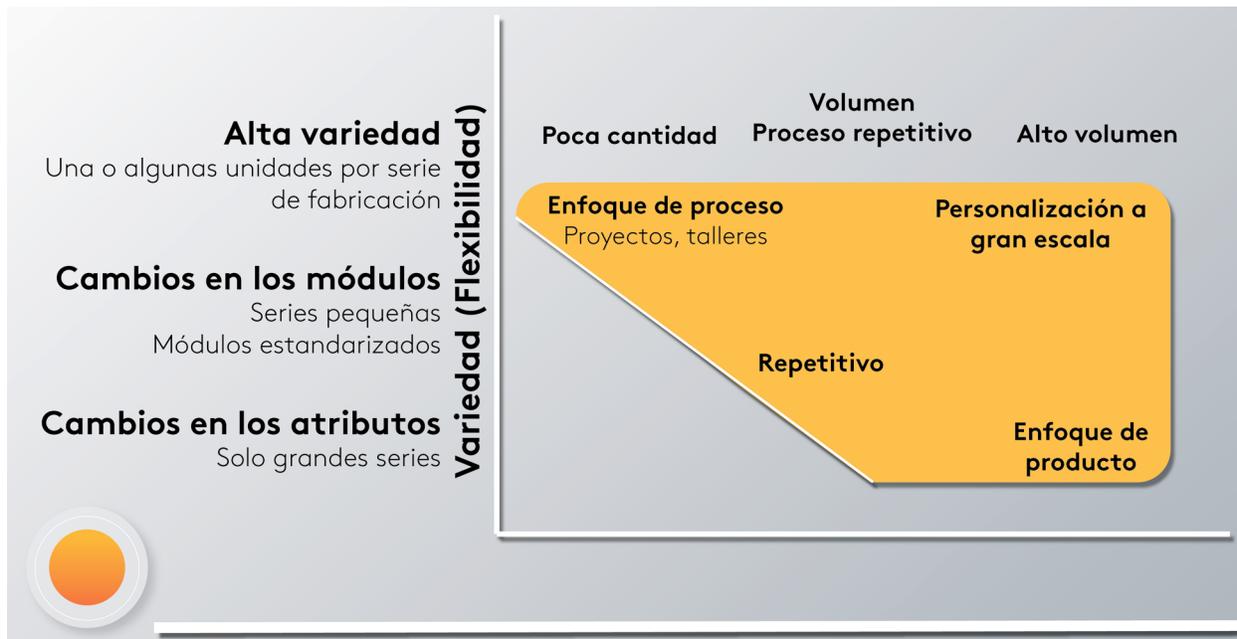


Figura 1. Estrategias de proceso  
Fuente: Propia, basado en Heizer, & Render (2007).

## Enfoque de proceso

Este sistema de producción se caracteriza principalmente porque no tiene la capacidad para producir altos volúmenes, debido a que se orienta a realizar productos a pedido del cliente. Como el cliente puede pedir productos con prácticamente cualquier característica, el sistema debe tener la flexibilidad para satisfacer al cliente en este sentido. Dentro del enfoque de proceso se encuentran 2 casos: la producción por proyecto y la producción por talleres (comúnmente llamada Job shop). Ambos casos tienen en común que pueden producir con una alta variedad, pero la diferencia estriba en la cantidad: mientras que en los proyectos la cantidad producida es una sola unidad, en job shop las cantidades pueden ser mayores.

## Producción por proyecto

De manera general, un proyecto es una sucesión de actividades que se ejecutan en un orden específico hasta que el proyecto se haya concluido. Una característica fundamental de un proyecto es que este se ejecuta solo una vez, es decir, el producto realizado es único aunque pueda ser similar a otros proyectos. Ejemplos de proyectos son: construcción de un edificio, construcción de una nueva planta de producción, investigación y desarrollo de un nuevo producto, producción de películas, construcción de un barco, relocalización de una instalación, instalación de un sistema de información, realización de una campaña publicitaria, entre otros.

Note que, si bien hay empresas que se dedican a trabajar por proyectos, ningún pro-

yecto es igual a otro. Por ejemplo, una empresa constructora que se dedica a erigir edificios, en un año puede hacer muchos de ellos pero cada uno es distinto al otro: las condiciones del terreno son distintas, el número de pisos es distinto, los clientes solicitan que sea construido con materiales y acabados distintos, etc.

Los proyectos se caracterizan porque usualmente se llevan a cabo en una posición fija y los materiales y mano de obra se distribuyen alrededor de él (como al construir un edificio o un barco). Además, como el proyecto se divide en actividades previa y exactamente definidas, es muy posible que para cada una de ellas se requieran materiales distintos, tanto en variedad como en cantidad.

El método más utilizado para la administración de proyectos es llamado Método de la ruta crítica, o como mejor se le conoce por sus siglas en inglés, CPM (Critical Path Method). Esta es una herramienta de tipo matemático que, dados los tiempos estimados para la duración de las actividades, calcula cuáles actividades son críticas y cuáles no, es decir, cuáles actividades no tienen posibilidad de tolerar retrasos y cuáles sí. Además de esto, CPM calcula qué tan amplios pueden ser los retrasos para tales actividades no críticas y, dadas las cifras de costos de ejecución de las actividades, también calcula cuál es la forma más económica para reducir los tiempos de estas y por tanto el tiempo de ejecución del proyecto<sup>1</sup>.

En la literatura que trata el tema de la administración de proyectos mediante el método

<sup>1</sup> Para ampliación del tema sobre CPM puede consultarse Hillier, F.S., & Lieberman, G.J. (2010). *Introducción a la investigación de operaciones* (9ª ed.). México D.F., McGraw-Hill.

de la ruta crítica es muy común encontrar este tema como PERT/CPM. Esto es debido a que los tiempos de duración de las actividades pueden considerarse determinísticos (perfectamente conocidos) o aleatorios (su valor exacto no se puede conocer con anticipación, pero sí la probabilidad con la que ocurre cada conjunto de valores que puede tomar el tiempo). Así pues, por un lado CPM considera que estos tiempos son determinísticos y por el otro, PERT (Project Evaluation and Review Technique: técnica de evaluación y revisión de proyectos) considera que son aleatorios. De todos modos, en la práctica esta diferencia es muy sutil, debido a que hoy en día PERT y CPM no se consideran técnicas distintas, sino que se usan como una sola herramienta: PERT/CPM.

### **Producción por talleres (Job shop)**

Según Heizer, & Render (2007), aproximadamente el 75% de la producción mundial se hace a través de talleres. Si bien el nombre por el que se conoce es "talleres", no necesariamente es nuestra acepción de "talleres" la que se ajusta a esta estrategia de proceso. Por ejemplo, una oficina o un hospital se ajustan a una producción por talleres, pues no producen nada en masa pero sí pueden manejar una gran variedad de productos (cuentas o nóminas en el caso de la oficina; pacientes con cualquier diversidad de dolencias en el caso del hospital). Esto hace que los costos variables sean altos, mientras que los costos fijos son bajos.

De todos modos, efectivamente el ejemplo más evidente de esta estrategia de proceso es un taller metalmecánico. Básicamente un taller de este tipo debe poder responder por casi cualquier tipo de trabajo que requiera el cliente. Para esto cuenta con diversidad de máquinas que son ubicadas por depar-

tamentos o ubicaciones fijas, llamadas centros de trabajo. Por ejemplo, está el centro de trabajo donde están los tornos, el centro de trabajo de las fresas, el centro de trabajo de los taladros, etc. En el caso de un hospital o de una oficina, estos se distribuyen por departamentos. Los hospitales tienen el área donde se toma radiografías, el área de cardiología, etc. La oficina de talento humano de una empresa puede contar con el área que maneja la nómina, otra que maneja la salud ocupacional, etc. En la Imagen 1 se observa un ejemplo de la distribución en planta para un taller metalmecánico, en donde se observa la ubicación por áreas de cada tipo de máquina.



Imagen 1. Distribución en planta de un taller metalmecánico.

Fuente: <http://www.panoramio.com/photo/73656755>

Una característica fundamental de un sistema de producción job shop es que la secuencia de manufactura que sigue cada producto es distinta dependiendo de sus características. Por ejemplo, en un sistema de urgencias médicas un paciente puede requerir inicialmente una valoración con médico general y luego ser canalizado, mientras que otro puede requerir inicialmente

una valoración con médico general, luego una radiografía y finalmente una revisión por parte de un ortopedista. En un taller metalmecánico una pieza puede requerir inicialmente torneado y luego fresado, pero otra pieza de características distintas puede requerir primero fresado, luego taladrado y finalmente torneado.

Note entonces que la cantidad de opciones distintas puede llegar a ser realmente muy grande, y mientras más departamentos o centros de trabajo tenga la unidad productiva, el número de opciones de secuenciación crecerá exponencialmente. Es por esto que la programación y secuenciación es un tema matemáticamente complejo, cuya completa comprensión requeriría uno o dos cursos completos. Este tema en particular se ampliará en la Unidad 4 (Decisiones operativas).

## Enfoque de producto

El enfoque de producto es una estrategia de proceso que puede producir una altísima cantidad de producto pero es muy poco flexible, es decir, no permite cambios fáciles de hacer en las características del producto. La distribución en planta es rígida y está enfocada al producto, es decir, usualmente las operaciones se ubican en el mismo orden y sentido en que lo requiere el producto manufacturado. A esta estrategia también se le conoce como Flow shop, pues al requerir producir una cantidad muy grande de unidades para que sea rentable, un aspecto muy importante es que se mantenga el flujo continuo a través de todo el sistema. Es por este motivo que también se les conoce como procesos continuos.

En general cualquier producto de consumo masivo es fabricado a través de esta estrate-

gia. Productos tales como papel, acero, ferro-níquel, cervezas, gaseosas, tornillos, embudidos, pastas, yogures, etc. se ajustan a este tipo de sistema de producción. Además, en esta estrategia los costos variables son bajos, mientras que los costos fijos son altos, debido a que son intensivos en capital. De aquí que mientras más unidades se produzcan, mejor será la utilización de los equipos, lo cual incrementa la eficiencia y por tanto reduce los costos totales de producción.

En la Imagen 2 se muestra un ejemplo de Cerro Matoso S.A., empresa productora de ferro-níquel ubicada en Montelíbano, Córdoba, Colombia. Allí se observa que el proceso está ubicado para facilitar el flujo del producto (representado con flechas), desde la mina de donde se extrae el mineral hasta el producto terminado.

### Enfoque repetitivo

Es un sistema de producción que se encuentra entre un enfoque de proceso y uno de producto. Para garantizar su funcionamiento correcto, esta estrategia usualmente hace uso de módulos, los cuales son partes o componentes preparados previamente. Por ejemplo, cuando usted va a un restaurante puede pedir cualquier cosa que esté en la carta (y no cualquier cosa que a usted se le ocurra). Es decir, el restaurante maneja una flexibilidad limitada y no amplia como en el caso del enfoque de proceso. Al mismo tiempo, el restaurante tiene la capacidad de producir muchas unidades de ese plato que usted pida, aunque nunca una cantidad como la que puede producirse desde un enfoque de producto.

Esto se logra porque ya el restaurante tiene estandarizados sus procesos para elaborar cualquiera de los platos que ofrezca en su

carta. Cada uno de los ingredientes está ubicado en módulos preparados previamente. Por ejemplo, para hacer una hamburguesa, las lechugas están en un recipiente, el pan en otro, la carne en otro, el queso en otro, y así sucesivamente, todo listo para armar en un tiempo razonablemente corto la hamburguesa que usted ha pedido.

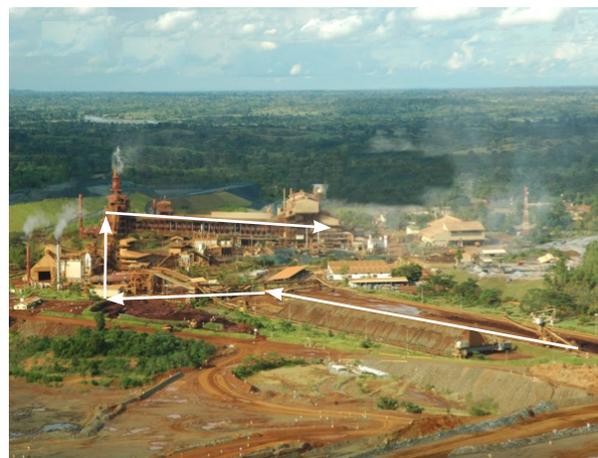


Imagen 2. a y b. Proceso flow shop en Cerro Matoso S.A.  
Fuente: <http://doralnewsonline.com/web/wp-content/uploads/2015/05/cerromatoso2.jpg>

Estos ejemplos serían desde el punto de vista del sector servicios, pero un proceso de manufactura también puede diseñarse con un enfoque repetitivo. Para lograr esto es muy común que la planta se distribuya por células de manufactura. Una célula de ma-

nufactura es una configuración en la que en una misma área se agrupan diversos tipos de máquinas, con el fin de fabricar productos que tienen operaciones similares (grupos o familias de productos). Esta configuración también es muy común encontrarla en sistemas gestionados bajo la filosofía Lean Manufacturing.

En la Figura 2 se muestra una aproximación básica a la diferencia entre un centro de trabajo (para sistemas job shop) y una célula de manufactura. Mientras en un centro de trabajo el mismo tipo de máquina se agrupa en una misma área, en una célula de manufactura se agrupan distintos tipos de máquinas en una misma área.

### Personalización a gran escala

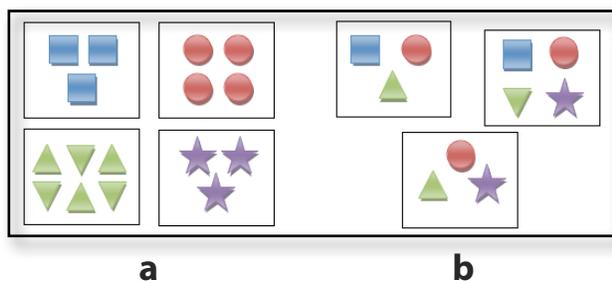


Figura 2. (a) Centros de trabajo y (b) Células de manufactura  
Fuente: Propia

Esta estrategia combina de una manera eficaz y eficiente la variedad y flexibilidad del enfoque de proceso y los bajos costos y altas cantidades del enfoque de producto. Se decía previamente que es un sistema ideal porque a través de él se pueden producir grandes cantidades ante casi cualquier pedido del cliente. Llegar a producir bajo esta estrategia no es una tarea fácil, y de ahí que los ejemplos prácticamente se limiten a grandes empresas como Dell Computer, General Motors, Toyota o en su momento, Motorola. En el Cuadro 1 se muestra el caso

exitoso de Dell Computer, tomado de Heizer, & Render (2007).

### **La personalización masiva le proporciona una ventaja competitiva a Dell Computer**

*Dell Computer comenzó con una premisa sencilla: vender una computadora personalizada directamente a los clientes finales; de este modo eliminaba los aumentos de valor en la cadena de distribución que representan un alto porcentaje del precio de las computadoras personales. El concepto y el proceso de manufactura de Dell hizo de la compañía un modelo de negocio innovador, y le permitió ganar el primer lugar en ventas alrededor del mundo.*

*Las plantas de Dell ubicadas en Austin, Texas, y Nashville, Tennessee, son modelos de manufactura personalizada eficiente. El modelo de ventas directas y las prácticas de producción esbelta de Dell proporcionan retroalimentación instantánea del cliente. Debido a esto, Dell es la primera en conocer los cambios en el mercado. Dell ha sido tan exitosa en la manufactura y en el conocimiento de sus clientes que le resulta normal tener enormes incrementos en la productividad, con el espacio de fabricación reducido de manera constante. Los robots eliminan segundos del tiempo necesario para cargar las computadoras en cajas. Se ahorran segundos adicionales al realizar la incorporación de software y las pruebas a la computadora en un solo paso. Dell mantiene el diseño del producto bajo revisión constante, simplificando componentes, acelerando el ensamble y ahorrando aún más segundos. El tiempo ahorrado mejora el rendimiento, aumenta la capacidad y contribuye a la flexibilidad. El rendimiento, la capacidad y la flexibilidad adicionales permiten a Dell responder a los súbitos y frecuentes cambios en la demanda que caracterizan al mercado de las computadoras personales.*

Tanto los proveedores de Dell como su personal de compras en la planta evalúan los inventarios cada hora a fin de mantener el producto en proceso en su nivel mínimo. A pesar de una cadena de suministro global, extensa y diversa, Dell opera con solo 4 días de inventario, mucho menos que sus competidores. Equipos de seis personas ensamblan 18 computadoras por hora, con partes que llegan mediante un sistema de transporte elevado. Cuando una célula de trabajo tiene algún problema, las partes se desvían de manera instantánea hacia otra célula, con lo cual se evitan demoras que son comunes en las líneas de ensamble tradicionales.

El modelo de ventas directas de Dell involucra a Internet. Pocas compañías han sido tan exitosas al convertir a Internet en una herramienta diaria para mejorar la productividad. Dell ha integrado Internet en todos los aspectos de su negocio diseño, producción, ventas y

servicio; y ha establecido el estándar de entrega rápida y personalización. Este proceso ha resuelto el importante problema de inventario anticuado y computadoras personales obsoletas. Dell recorta el inventario al recibir los componentes apenas unos minutos antes de necesitarlos.

Una de las razones por las que la personalización masiva funciona en Dell es porque en lugar de invertir recursos para desarrollar componentes de computadora (como lo hacen muchos competidores), ha enfocado la mayor parte de sus esfuerzos de investigación y desarrollo en el diseño de software que facilite y acelere la instalación y configuración de sus computadoras. El desempeño de Dell impresiona a muchas organizaciones grandes que la han adoptado como su proveedor. La reputación de la compañía es tal que su director general, Michael Dell, ahora es consultor en personalización masiva para otras empresas.

Caso de Dell Computer y su estrategia de personalización a gran escala  
Fuente: Heizer, & Render (2007).

Las características de la personalización a gran escala, así como las de las otras estrategias, son comparadas en la Tabla 1.

Enfoque de proceso	Proceso repetitivo	Enfoque de producto	Personalización a gran escala
Se producen pequeñas cantidades y gran variedad de productos.	Se producen grandes tandas, normalmente de un producto estandarizado con opciones a partir de módulos.	Se produce una gran cantidad y poca variedad de productos.	Se produce gran cantidad y gran variedad de productos.
El equipo utilizado es de propósito general.	Equipos especiales ayudan en la utilización de una cadena de montaje.	El equipo utilizado es especializado.	Cambio rápido en el equipo adaptable.
Los operarios están altamente cualificados.	Los empleados están relativamente entrenados.	Los empleados están muy poco formados.	Los operarios están entrenados para adaptarse a la necesaria personalización

Hay muchas instrucciones de trabajo, porque cada trabajo es diferente.	Las operaciones repetitivas reducen el entrenamiento y los cambios en las instrucciones de trabajo.	Las órdenes e instrucciones de trabajo son pocas, debido a que están estandarizadas.	Las peticiones del cliente requieren muchas instrucciones de trabajo.
Los inventarios de materias primas son relativamente altos para el valor del producto.	Se utilizan técnicas de "justo a tiempo" en el aprovisionamiento.	Los inventarios de materias primas son relativamente bajos para el valor del producto.	Los inventarios de materias primas son relativamente bajos para el valor del producto.
El inventario de trabajo en proceso es alto en comparación con el output.	Se utilizan técnicas de "justo a tiempo" en la gestión de inventario.	El inventario de trabajo en proceso es bajo en comparación con el output.	El inventario de trabajo en proceso es bajo gracias al justo a tiempo.
Las unidades se mueven lentamente a través de la planta.	El movimiento se mide en horas y días.	Es típico un movimiento rápido de las unidades a través de la planta.	Es típico un movimiento rápido de las unidades a través de la planta.
Los artículos finales normalmente se hacen bajo pedido y no se almacenan.	Los artículos finales se producen según frecuentes pronósticos de demanda.	Los artículos acabados normalmente se realizan con base en técnicas de pronósticos de demanda y se almacenan.	Los artículos acabados se realizan bajo pedido.
Planificar los pedidos es complejo y exige conseguir un equilibrio entre disponibilidad de inventario, capacidad y servicio al cliente.	La planeación se basa en construir distintos modelos a partir de módulos diferentes para los que se hacen pronósticos de demanda.	La planeación es relativamente simple y busca establecer una tasa de producción suficiente para satisfacer los pronósticos de demanda.	Se requiere una sofisticada planeación para adaptarse a las peticiones del cliente.
Los costos fijos son bajos y los variables, altos.	Los costos fijos dependen de la flexibilidad de la instalación.	Los costos fijos son altos y los variables, bajos.	Los costos fijos son altos pero los costos variables deben ser bajos.
El costo se estima antes de hacer el trabajo, pero solo se conoce con certeza después del trabajo.	Los costos son normalmente conocidos debido a numerosas experiencias previas.	Puesto que los costos fijos son altos, los costos dependen mucho de la utilización de la capacidad.	Los altos costos fijos y los cambiantes costos variables hacen de la cuestión del costo un desafío.

Tabla 1. Comparación de las características de las cuatro estrategias de proceso Fuente: Heizer, & Render (2007).

2

Unidad 2



Administración de operaciones

Autor: Rafael Tordecillas

## Introducción

En la presente unidad, se estudiarán las decisiones de tipo estratégico que se deben tomar en un sistema productivo. Estas se refieren a decisiones a largo plazo, con un horizonte de planeación desde 1 año en adelante. Usualmente son decisiones que implican una gran inversión de dinero. Académicamente es difícil diferenciar entre las decisiones estratégicas relacionadas con la administración de operaciones y aquellas relacionadas con la administración de la cadena de suministros, debido a la fuerte interrelación entre estas. Tales decisiones incluyen: planeación de la estrategia de proceso, diseño de producto, localización de instalaciones, planeación de la capacidad, distribución en planta.

Dada la gran amplitud de estos temas, no se estudiarán todos estos tipos de decisiones. En la presente unidad solo se abordarán aquellas relacionadas con la planeación de la estrategia de proceso y la planeación de la capacidad. En particular para esta semana, se estudiará la planeación estratégica de la capacidad.

La parte conceptual de la presente cartilla no es tan amplia como la de las cartillas anteriores, pero aún así es importante entender muy bien los conceptos expuestos. Para esto se recomienda dar una leída rápida a la cartilla y luego leerla nuevamente de forma más pausada, haciendo hincapié en los conceptos que mayor dificultad le generaron. El resto de la cartilla está compuesto por ejemplos numéricos que ampliarán la comprensión de los conceptos. Cada ejemplo cuenta con su explicación, así que se recomienda inicialmente entender bien los parámetros, datos e información que se da en el ejercicio y luego procurar comprender cada uno de los pasos que se llevan a cabo en la solución del ejercicio. No olvide consultar con su tutor cualquier duda que se le presente.

## Planeación estratégica de la capacidad

Una vez determinada la mejor estrategia de proceso, es necesario determinar qué capacidad debe tener el sistema productivo. La capacidad puede entenderse de manera básica como la cantidad de recursos disponibles que se requerirán para la producción dentro de un periodo concreto, en otras palabras, la capacidad es la cantidad de producción que un sistema es capaz de generar en tal periodo.

Determinar la capacidad que debe tener el sistema productivo es un aspecto fundamental en su diseño y su gestión pues por un lado, si la planta es muy grande la mayoría de los recursos estarán inactivos durante mucho tiempo o se llevará una cantidad excesiva de inventario, pero por otro lado, si la planta es muy pequeña constantemente habrá clientes insatisfechos por la falta de producto, generando pérdida de clientes y facilitando la entrada de competidores al mercado.

Esto indica que un insumo necesario para planificar la capacidad es la demanda, es decir que para llevar a cabo una correcta planeación de la capacidad, es necesario tener alguna estimación de la demanda futura, para lo cual pueden hacerse uso de estudios de mercado (principalmente para el caso en que se trate de una planta nueva) o técnicas de pronósticos (para el caso en que se trate de una planta ya en funcionamiento).

Ahora bien, el hecho de que la capacidad pueda planificarse para una planta nueva o para una ya en funcionamiento, indica que la planeación de la capacidad no es un tipo de decisión exclusivamente estratégica. Efectivamente si la capacidad será planeada para una planta nueva, es una decisión estratégica o a largo plazo, pues se debe estimar qué capacidad deben tener los equipos o maquinarias a adquirir o cuál debe ser el área construida que tendrá la planta. Como estas son decisiones que muy probablemente perdurarán por años, de allí su carácter estratégico.

No obstante, cuando la planta ya se encuentra en funcionamiento también se deben tomar decisiones sobre capacidad, pero ya desde un punto de vista táctico u operativo, es decir una planeación de la capacidad a mediano o corto plazo. Por ejemplo, cuando se toman decisiones acerca de la contratación o despido de operarios, la subcontratación o la programación de horas extras, se está decidiendo sobre la capacidad que tendrá el sistema para los

próximos meses, semanas, días u horas. Este tipo de decisiones hacen parte de lo que en la administración de operaciones se llama “planeación agregada”, la cual será estudiada en este curso en la unidad 3, correspondiente a las decisiones tácticas.

La capacidad puede expresarse en unidades de tiempo (min/día, horas/año, horas/mes, etc.), unidades naturales (m, m<sup>3</sup>, kg, ton, etc.), unidades energéticas (kwh, calorías, etc.) o unidades monetarias (\$, US\$, €, etc.). Existen diversos tipos de capacidad, cuyas definiciones se muestran a continuación:

- Capacidad proyectada o teórica: es la máxima producción teórica de un sistema en un periodo determinado.
- Capacidad instalada: es la capacidad máxima de máquinas, equipos, instalaciones, menos el tiempo necesario para mantenimiento.
- Capacidad disponible: es la capacidad instalada después de descontar tiempos como días festivos, ausentismo, turnos y otros factores.
- Capacidad necesaria: es la capacidad que se necesita para satisfacer toda la demanda.
- Capacidad utilizada: es aquella que se conoce únicamente después de efectuar el plan de producción.

Note que la capacidad disponible siempre será menor que la instalada, y a su vez estas serán menores que la proyectada. La capacidad necesaria puede ser mayor o menor que estas tres, dependiendo de las decisiones que se hayan tomado en la planeación de la capacidad, pues es posible que la capacidad que se tenga disponible no alcance a cubrir la demanda, o viceversa.

**Ejemplo 1.** El taller metalmecánico La tuerquita feliz cuenta con 2 tipos de máquinas: tornos y fresas. Exactamente, cuenta con 3 tornos y 2 fresas. La empresa labora un total de 306 días en el año (solo días hábiles) y trabaja en 2 turnos de 8 horas cada uno. A causa del mantenimiento preventivo que ha establecido la empresa y también previendo fallas inesperadas, cada torno requiere de 80 horas de mantenimiento al año, y cada fresa, 100 horas/año. Por otro lado, La tuerquita feliz prevé que se pueden perder 60 horas/año por otros motivos (ausentismo, factores organizacionales, factores externos, etc.). Calcule para este taller las capacidades teórica, instalada, disponible y necesaria.

Como este es un sistema de producción tipo job shop, se hace muy complicado calcular la capacidad en términos de unidades naturales debido a la alta variedad de productos que se pueden fabricar. Dado esto, el cálculo se facilita si se hace en unidades de tiempo. Así pues, inicialmente se calculará la capacidad teórica para cada tipo de máquina, así:

$$\text{Capacidad teórica (tornos)} = 3 * 24 * 365 = 26.280 \text{ horas/año}$$

$$\text{Capacidad teórica (fresas)} = 2 * 24 * 365 = 17.520 \text{ horas/año}$$

Note entonces que para el cálculo de la capacidad teórica solo basta saber el número de máquinas con las cuales se cuenta y multiplicarlo por el número total de horas en un día y esto a su vez por el número de días en un año (esto en caso de que se quiera expresar la capacidad en términos de ). Estos valores calculados representan la cantidad total de horas que podría trabajar la empresa si la maquinaria operara sin descanso todo el año. Naturalmente toda máquina requiere de unas horas de mantenimiento, que al ser descontadas arrojan la capacidad instalada, así:

$$\text{Capacidad instalada (tornos)} = (3 * 24 * 365) - (3 * 80) = 26280 - 240 = 26.040 \text{ horas/año}$$

$$\text{Capacidad instalada (fresas)} = (2 * 24 * 365) - (2 * 100) = 17520 - 200 = 17.320 \text{ horas/año}$$

Estos datos correspondientes a la capacidad instalada se acercan un poco más a la realidad, pues el mantenimiento es algo inevitable que debe llevarse a cabo para garantizar el buen funcionamiento del sistema productivo. No obstante, esta empresa no labora las 24 horas del día ni los 365 días del año (en teoría podría hacerlo) y por tanto debe calcularse un nuevo valor de capacidad, la capacidad disponible, que tenga en cuenta estas restricciones y también aquellas referentes a las otras pérdidas de tiempo estimadas por la empresa, así:

$$\text{Capacidad disponible (tornos)} = (3 * 8 * 2 * 306) - (3 * 80) - 60 = 14.388 \text{ horas/año}$$

$$\text{Capacidad disponible (fresas)} = (2 * 8 * 2 * 306) - (2 * 100) - 60 = 9.532 \text{ horas/año}$$

Así pues, para el cálculo de la capacidad disponible inicialmente se multiplica el número de máquinas por el número de horas por turno, por el número de turnos al día y por el número de días hábiles al año. A esto se le restan las horas totales de mantenimiento y las pérdidas generales de 60 horas/año. Note que las pérdidas por mantenimiento deben calcularse por el número de máquinas, mientras que las otras pérdidas no, pues son generales.

Finalmente, para este ejemplo no es posible calcular la capacidad necesaria, pues esta requiere conocer los valores estimados de la demanda futura. Esta demanda indicará qué capacidad debería tener el sistema productivo, lo cual puede calcularse de varias maneras. En el ejemplo 4 se amplía este tema.

**Ejemplo 2.** Suponga que la empresa Postovaria, que produce cerveza en botella, cuenta con una línea de producción (flow shop) que tiene una capacidad disponible de 20.334 horas/año. En Postovaria se ha hecho un muy detallado estudio de tiempos que ha establecido que el tiempo estándar de producción es de 0,5 minutos/unidad. ¿Cuál es la capacidad disponible de esta empresa, en unidades/año?

Para resolver este ejercicio, lo primero que debe hacerse es homogeneizar las unidades, pues los dos datos que se dan tienen unidades de tiempo distintas (uno está en horas y el otro en minutos). Será más sencillo pasar horas a minutos, pues basta multiplicar por 60, así:

$$\text{Capacidad disponible} = 20.334 \text{ horas/año} * 60 \text{ minutos/hora} = 1'220.040 \text{ minutos/año}$$

Finalmente, basta con dividir este valor entre 0,5 y el cálculo habrá finalizado. Esta última operación también puede entenderse así: si el tiempo estándar es de 0,5 minutos/unidad, quiere decir que pueden producirse 2 unidades en un minuto. Al tener ya el valor total de minutos disponibles, se multiplicará éste por 2 (que es lo mismo que dividir entre 0,5) y se tendrá la respuesta solicitada.

$$\text{Capacidad disponible} = 1'220.040 \text{ minutos/año} * \frac{1}{0,5 \text{ minutos/unidad}} = 2'440.080 \text{ unidades/año}$$

Es decir, en total este sistema productivo tiene una capacidad disponible de producción de 2'440.080 botellas de cerveza al año.

**Ejemplo 3.** La empresa Postovaria del Ejemplo 2 también produce gaseosas. Suponga que esto lo hace en otra línea de producción con la misma capacidad de la línea de cervezas (20.334 horas/año). Como esta línea es nueva no se sabe con exactitud el tiempo estándar

de producción, pero el fabricante indica que por diseño, la línea puede producir un promedio de 2,5 unidades/minuto. Calcule la capacidad disponible de esta empresa, en unidades/año.

Como la capacidad disponible en horas/año es la misma, la homogeneización preliminar de unidades es idéntica a la del Ejemplo 2, es decir, la capacidad disponible en minutos/año es de 1'220.040. Finalmente, para calcular la capacidad disponible en unidades/año basta con multiplicar este valor por la producción estándar, así:

$$\text{Capacidad disponible} = 1'220.040 \text{ min/año} * 2,5 \text{ unidades/min} = 3'050.100 \text{ unidades/año}$$

Es decir, en total este sistema productivo tiene una capacidad disponible de producción de 3'050.100 botellas de gaseosa al año.

**Ejemplo 4.** La empresa Doctor Ruperto y asociados han estimado la demanda de su producto para los próximos 5 años, tal como se muestra en la Figura 1. Allí se observa que la demanda prevista para el próximo año será de 22.000 unidades, para el segundo año, de 24.000 unidades, y así sucesivamente. El dueño de la empresa (naturalmente, el doctor Ruperto) desea saber cómo debe ampliar su capacidad para estar acorde con el aumento constante de la demanda y le pide a usted, como experto en administración de operaciones, que le ayude en esta decisión.

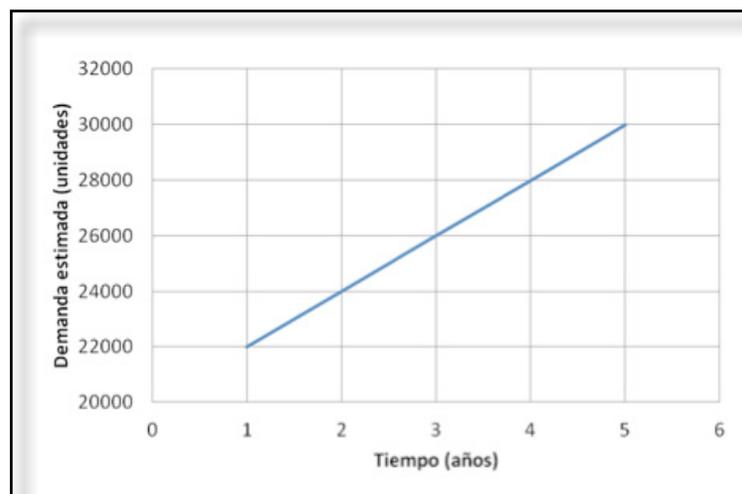


Figura 1. Pronóstico de demanda para el Ejemplo 3.  
Fuente: Propia.

Al hacer el análisis para determinar las necesidades de ampliación de capacidad, la Figura 1 no solo representaría la demanda futura, sino la capacidad necesaria con que debe contar la empresa para los próximos 5 años. En un mundo ideal, lo más apropiado sería que la ca-

pacidad creciera exactamente al mismo ritmo que la demanda, pero en el mundo real esto no es posible pues las ampliaciones de capacidad suelen requerir adquisición de maquinaria o terrenos, lo cual no es algo que pueda hacerse a diario o semanalmente, sino en plazos mucho más amplios. El objetivo es entonces idear un plan de ampliación de capacidad que de alguna forma balancee la capacidad disponible con la capacidad necesaria, teniendo en cuenta que la mayoría del tiempo (por no decir siempre), estas capacidades no serán iguales.

Esto quiere decir que básicamente los planes de ampliación de capacidad pueden ser de tres tipos: primero, que la capacidad disponible siempre sea mayor que la capacidad necesaria (capacidad por delante); segundo, que la disponible siempre sea menor que la necesaria (capacidad por detrás); y tercero, que en algunos periodos la disponible sea mayor que la necesaria y en otros, sea menor (capacidad media). En la Figura 2 se diagraman estas soluciones.

La opción (a) y la opción (b) se refieren a que la capacidad disponible vaya por delante de la necesaria, pero de forma distinta: la opción (a) es una ampliación progresiva, de tal manera que al final del año 1 la capacidad disponible sea de 24.000 unidades, al final del año 2, de 26.000 y así sucesivamente. La opción (b) es una capacidad por delante de un solo escalón, en donde desde el inicio del horizonte de planeación se cuenta con las 30.000 unidades requeridas para el año 5. En las opciones (a) y (b) se espera que no haya demanda insatisfecha, pero a cambio se debe invertir en ampliación de capacidad en periodos anteriores que en la opción (c). Además, tanto en (a) como en (b) se espera que la utilización de los equipos siempre sea inferior al 100%, pero gracias a esto el sistema podría responder de una mejor manera si hay aumentos inesperados de la demanda, lo que se traduce en más ganancias para la compañía.

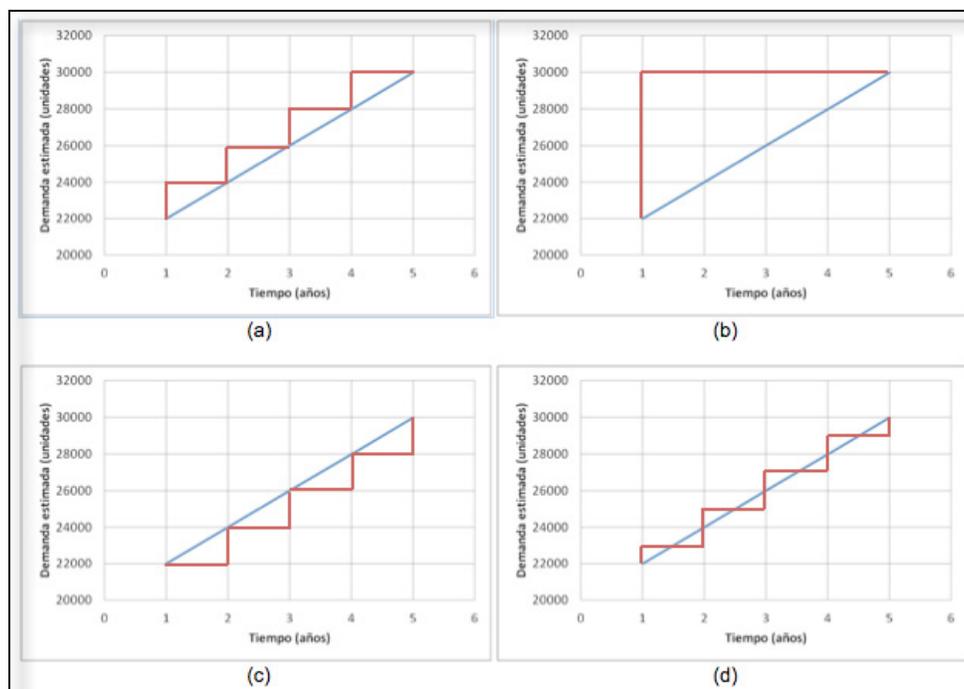


Figura 2. Opciones de ampliación de capacidad para el Ejemplo 3  
Fuente: Propia.

Ya en la práctica, elegir entre las opciones (a) y (b) requeriría de un análisis más profundo. Por ejemplo, puede esperarse que en el futuro los equipos o maquinarias necesarios aumenten mucho de precio, lo que haría más conveniente la opción (b). En este escenario también se aprovecharían las economías de escala. No obstante, estos costos deben balancearse con los costos de mantener un equipo que en su mayoría no se utilizaría, así que tanto (a) como (b) tienen sus ventajas y desventajas. Note también que los aumentos progresivos de la opción (a) se eligieron anualmente de manera arbitraria, pues también podrían hacerse de manera semestral, bienal, trienal, o en cualquier otro periodo que la empresa estime conveniente.

La opción (c) muestra aumentos de capacidad por detrás, es decir que constantemente habría demanda insatisfecha o tendría que recurrirse a horas extra o subcontratación, pero los equipos o maquinarias se mantendrían con una utilización del 100% la mayoría del tiempo. Esta opción es conveniente si se desea o es necesario retrasar el momento de aumento de la capacidad, con su consecuente inversión. Finalmente, la opción (d) es una solución intermedia que llevará al sistema productivo a unos periodos en los que la capacidad estará por delante y otros por detrás.

La escogencia de cualquiera de las opciones de aumento de capacidad dependerá básicamente de los costos que implique cada una. Se requerirá un cálculo detallado de los costos asociados a cada opción y se escogerá la que menor costo le implique a la empresa. Naturalmente, como las organizaciones son sistemas compuestos por personas, es posible que una fría cifra de costo no sea suficiente criterio de decisión, entrando también como criterio de decisión los objetivos estratégicos que tenga la empresa.

Debe aclararse en este punto que la demanda real difícilmente se comportará acorde a una línea recta. En la práctica la demanda es aleatoria, presentará picos y valles que fácilmente pueden echar a la basura cualquier cálculo o estimación que se haya hecho. Es por esto que este tipo de planes requiere una constante revisión, para ir ajustando el sistema productivo a la realidad del mercado.

## **Uso de árboles de decisión en la toma de decisiones sobre capacidad**

En aquellas ocasiones en que la demanda sea aleatoria y de alguna forma pueda estimarse la probabilidad con la que ocurren los valores posibles que la demanda puede tomar, una herramienta útil para la toma de decisiones son los llamados árboles de decisión. Estos no son más que una herramienta que pondera las posibles ganancias o pérdidas que se generan con las distintas decisiones que se pueden tomar sobre algún tópico, y teniendo en cuenta ciertos valores de probabilidad, arroja el mejor curso de acción a seguir. En general pueden ser usados como herramienta para muchos problemas que cumplan con las características descritas, pero aquí será mostrada su utilidad para la toma de decisiones asociadas a capacidad<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Para ampliación del tema sobre árboles de decisión puede consultarse la lectura complementaria y también el texto Hillier, F.S., & Lieberman, G.J. (2010). *Introducción a la investigación de operaciones* (9ª ed.). México D.F., McGraw-Hill.

**Ejemplo 5.** (Adaptado de Heizer, & Render, 2007) Southern Hospital Supplies, una compañía que fabrica batas de hospital, está considerando aumentar su capacidad. Las alternativas principales de Southern son: no hacer nada, construir una planta pequeña, construir una planta mediana, o construir una planta grande. La nueva instalación produciría un nuevo tipo de bata cuyo potencial de comercialización se desconoce. Si se construye una planta grande y existe un mercado favorable, podría obtenerse una utilidad de \$100.000. Un mercado desfavorable produciría una pérdida de \$90.000. Sin embargo, con una planta mediana y un mercado favorable las utilidades llegarían a \$60.000. El resultado de un mercado desfavorable sería una pérdida de \$10.000. Por otra parte, con una planta pequeña se tendrían utilidades por \$40.000 con condiciones de mercado favorables y se perderían solo \$5.000 en un mercado desfavorable. Por supuesto, siempre está la alternativa de no hacer nada. Una investigación de mercado reciente indica que existe una probabilidad de 0,4 de tener un mercado favorable, lo cual significa que existe una probabilidad de 0,6 de que el mercado sea desfavorable. Con esta información se selecciona la alternativa que dará como resultado el mayor valor monetario esperado (VME). Prepare un árbol de decisión y calcule el VME para cada rama.

El árbol de decisión resultante se muestra en la Figura 3. Allí se observa que cada rama representa una alternativa, y para cada una de ellas se calcula el VME. Para esto basta calcular un promedio ponderado, asociando las posibles ganancias o pérdidas con su probabilidad de ocurrencia.

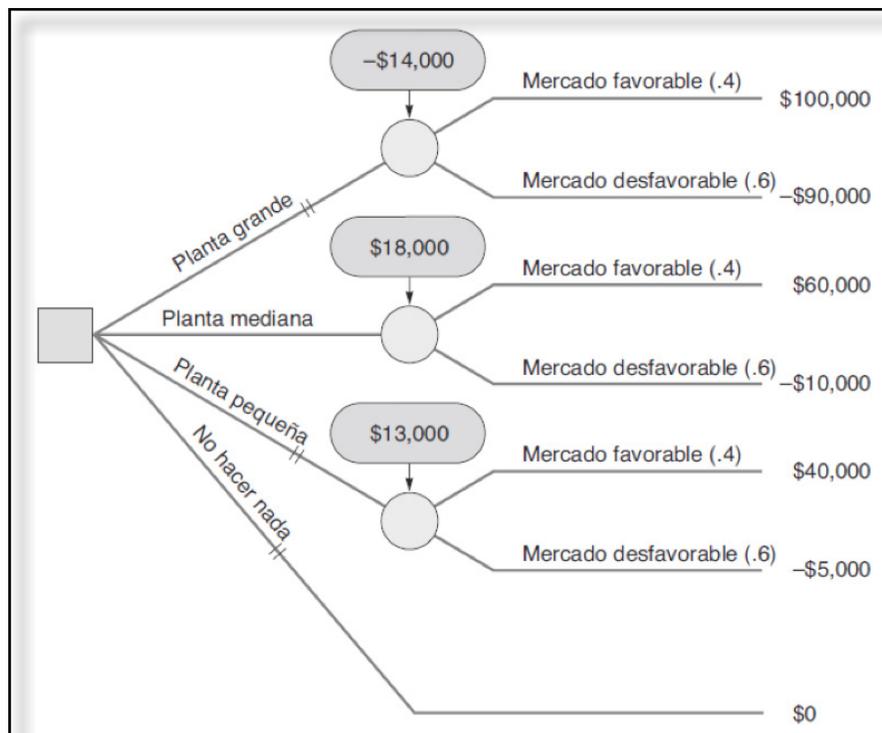


Figura 3. Árbol de decisión para el Ejemplo 4  
Fuente: Heizer, & Render (2007).

$$VME_{(planta\ grande)} = (0,4 * \$100.000) + (0,6 * -\$90.000) = -\$14.000$$

$$VME_{(planta\ mediana)} = (0,4 * \$60.000) + (0,6 * -\$10.000) = +\$18.000$$

$$VME_{(planta\ pequeña)} = (0,4 * \$40.000) + (0,6 * -\$5.000) = +\$13.000$$

$$VME_{(no\ hacer\ nada)} = \$0$$

Dados estos resultados, lo que Southern Hospital Supplies debería hacer es construir una planta mediana, pues arroja el VME más alto.

### Actividades auto-evaluativas

1. El doctor Ruperto tiene una planta que cuenta con 6 taladros, 3 tornos y 4 fresas. La empresa labora en tres turnos de 8 horas cada uno. Además, se laboran los 365 días del año exceptuando domingos y festivos (suponga 18 festivos al año). Se ha establecido un tiempo de mantenimiento para los taladros de 100 horas/año, de 120 horas/año para los tornos y de 140 horas/año para las fresas. Finalmente, esta planta prevé pérdidas de 360 horas /año por motivos diversos. Calcule para cada centro de trabajo las capacidades teórica, instalada, disponible y necesaria.
2. Al doctor Ruperto (el dueño de la planta del ejercicio anterior) le han planteado un muy jugoso negocio que consiste en proveer por todo el próximo año una pequeña pieza para una empresa manufacturera. Esta pieza requiere de taladrado, torneado y fresado. Se ha establecido que el tiempo estándar de producción de esta pieza es de 4 min/unidad en los taladros, 2 min/unidad en los tornos y 3 min/unidad en las fresas. Haciendo uso de estos datos y de los resultados obtenidos en el ejercicio anterior, calcule el número de piezas que cada centro de trabajo es capaz de producir en el año.
3. Considere nuevamente el ejemplo 5 y evalúe las siguientes alternativas.

- a. Si una nueva estimación de la pérdida resultante por la construcción de una planta mediana en un mercado desfavorable cambia a  $-\$20.000$ , evalúe nuevamente las alternativas de decisión calculando el VME.
- b. Suponga ahora que la probabilidad de tener un mercado favorable es de 0,55, mientras que la de tener un mercado desfavorable es de 0,45. Determine nuevamente cuál es el mejor curso de acción para Southern Hospital Supplies.
- c. Compare los resultados de los puntos a. y b. con los obtenidos en el Ejemplo 5.

2

## Unidad 2

Planeación agregada  
de operaciones



Administración de operaciones

Autor: Rafael Tordecillas

## Introducción

En la presente semana se estudiarán las decisiones de tipo táctico que se deben tomar en un sistema productivo. Estas se refieren a decisiones a mediano plazo, con un horizonte de planeación entre 3 y 12 meses, con revisión semanal, mensual o trimestral. Tales decisiones incluyen: planeación agregada de operaciones, programación maestra y planeación de los requerimientos de materiales.

En la presente semana se estudiará la planeación agregada de operaciones, la cual establece las cantidades a producir por unidad de tiempo, para familias de productos. Incluye decisiones relacionadas con el nivel de la mano de obra, niveles de inventario, unidades de producto fabricadas en tiempo regular y en tiempo extra y unidades subcontratadas, teniendo como criterio principal los costos de producción.

La presente cartilla está dividida en dos grandes partes: una parte conceptual y un amplio ejemplo. Para entender la primera parte, se recomienda dar una leída rápida a la cartilla y luego leerla nuevamente de forma más pausada, haciendo hincapié en los conceptos que mayor dificultad le generaron. Para la parte del ejemplo se recomienda inicialmente entender bien los parámetros, datos e información que se da en el ejercicio y luego procurar comprender cada uno de los cálculos que se llevan a cabo en la solución del ejercicio. Se recomienda además hacer uso de hoja de cálculo para llevar a cabo los cálculos correspondientes a la planeación agregada. No olvide consultar con su tutor cualquier duda que se le presente.

### Planeación agregada de operaciones

En las semanas anteriores se estudiaron las decisiones de tipo estratégico, es decir, aquellas decisiones que se toman a largo plazo. Naturalmente este tipo de decisiones deben tomarse antes de que la empresa esté en funcionamiento, y también se toman cuando la empresa ya está operando para planear los objetivos estratégicos de la compañía en el área de producción y operaciones.

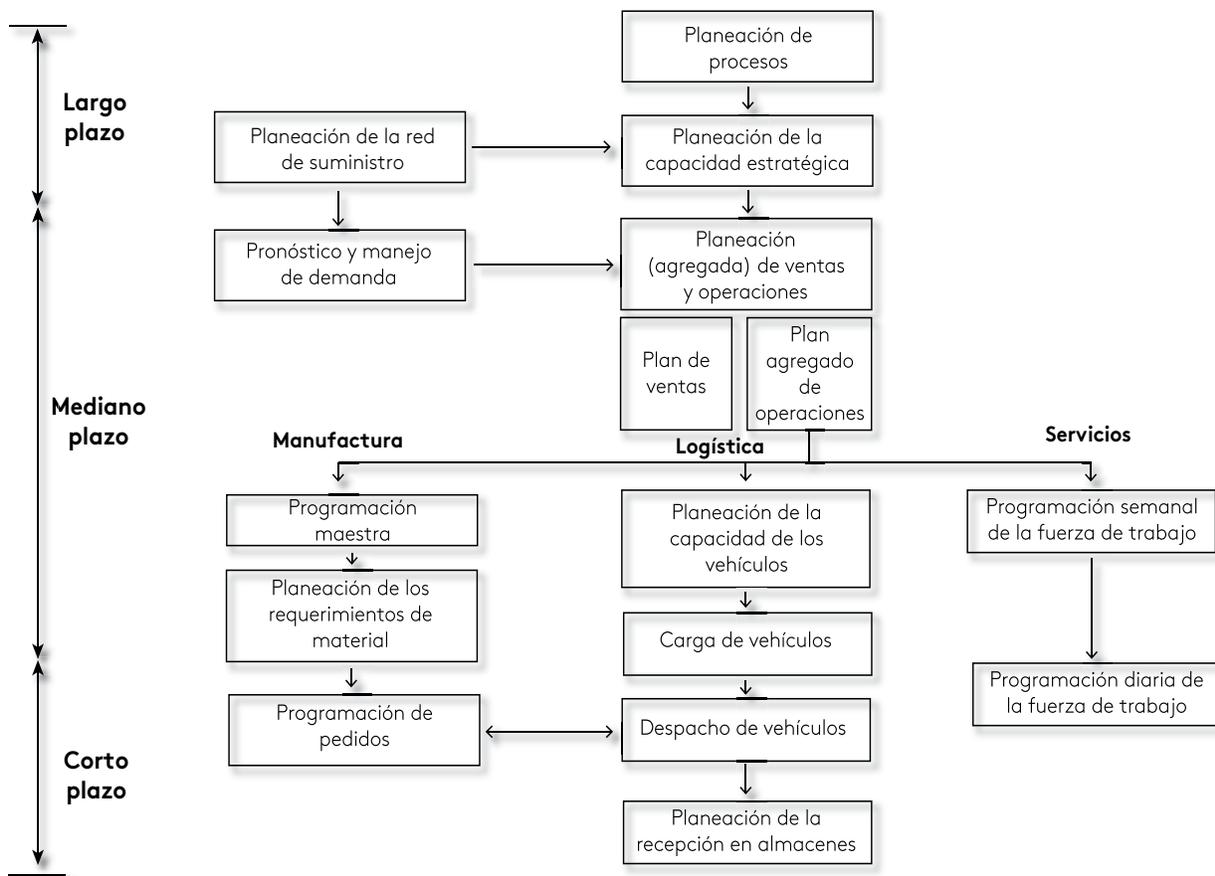


Figura 1. Planeación de operaciones y cadena de suministro  
Fuente: Chase, Jacobs, & Aquilano (2009).

Una vez esto se ha establecido, debe decidirse la forma en que a mediano plazo se cumplirá con esos objetivos. Naturalmente estas decisiones de índole táctica dependerán de qué decisiones se tomaron en el nivel estratégico. En la Figura 1 se observa de manera general cómo se relacionan todos estos tipos de decisiones, desde el largo plazo hasta el corto plazo, tanto en manufactura como en logística.

En la Figura 1 se observa que las diversas decisiones que deben ser tomadas en este tipo de sistemas son dependientes unas de otras, es decir, tienen un orden intrínseco. En particular para los objetivos de esta unidad, se tiene que la planeación agregada de ventas y operaciones tiene dos insumos fundamentales: por un lado, la planeación estratégica de la capacidad y por el otro, el pronóstico de la demanda.

Dada esta información, el departamento de mercadeo elabora un plan de ventas para los próximos meses y dado esto se establece el plan agregado de operaciones. En lo que respecta a las decisiones tácticas de manufactura, este plan será un insumo para el programa maestro de producción (mejor conocido por sus siglas en inglés, MPS: Master Production Schedule) y este a su vez lo será del plan de requerimientos de materiales (mejor conocido por sus siglas en inglés, MRP: Material Requirements Planning).

Desde el plan agregado hasta el MRP las decisiones serán cada vez más específicas. De allí el nombre de “plan agregado”, pues en este nivel no se tomarán decisiones sobre cada referencia de producto en particular, sino sobre todo el conjunto de los productos que se fabrican. Por este motivo, en este punto debe expresarse la demanda en términos de una unidad común. Por ejemplo, puede decirse que la demanda para los próximos meses será de 1.500 toneladas y esta cifra incluye o agrega todas las referencias de producto o una gran familia de referencias que fabrica la empresa.

El objetivo de un plan agregado de operaciones es minimizar el costo de los recursos necesarios para cubrir la demanda durante un periodo. De esta afirmación deben resaltarse dos aspectos: por un lado los costos y los recursos, es decir, sobre qué tipo de recursos debe decidirse y cuáles son los costos que tienen asociados. Por otro lado la estrategia, es decir, de qué forma puede la compañía lograr el objetivo de minimizar los costos.

## **Costos y recursos asociados a un plan agregado**

Existen tres variables básicas sobre las cuáles debe decidirse en la elaboración de un plan agregado:

- Cantidad de tiempo a laborar: se refiere a las horas por día o a los días por mes en que se programará la producción. Naturalmente esto se encuentra asociado a la cantidad de unidades a producir e implica decisiones sobre la cantidad de tiempo que se va a laborar en tiempo regular y en tiempo extra.
- Nivel de la fuerza de trabajo: se refiere al número de trabajadores con que se debe contar para llevar a cabo la producción.

- Nivel de inventario y faltantes: se refiere a qué cantidad de inventario debe manejarse. Por ejemplo, puede decidirse producir siempre exactamente lo necesario, producir demás y guardar para el siguiente periodo o producir demás para reponer pedidos atrasados.

Las primeras dos variables también están asociadas a la capacidad del sistema productivo, de acuerdo a lo que se estudió en la unidad anterior, pero la diferencia estriba en que en un plan agregado las decisiones son de mediano plazo, es decir, tienen una influencia de meses, mientras que lo observado en la unidad anterior tiene una influencia de años (largo plazo).

Note que estos tres tipos de variables están fuertemente interrelacionadas. Por ejemplo, una empresa puede contar con un mayor número de operarios y no programar horas extra, o contar con un menor número de operarios que estén dispuestos a trabajar horas extra. También podría suceder que se cuente con más de los operarios necesarios para satisfacer la demanda del presente mes y el exceso de producción que se genere se almacene como inventario para el siguiente mes. Así como estos ejemplos son varias las combinaciones que pueden darse. ¿Cuál opción es la mejor? Básicamente depende de los costos asociados a cada una, los cuales son:

- Costos de producción: se refieren a los costos fijos y variables en que se incurre directamente al llevar a cabo el plan de producción. De manera general, son costos que se asocian a los materiales, la energía consumida, el sueldo de la fuerza de trabajo (costos directos e indirectos) y la depreciación de los equipos. Para los fines del plan agregado, los únicos costos de producción de interés serán los asociados a la fuerza de trabajo de manera directa. Estos pueden ser incurridos tanto en tiempo regular como en tiempo extra.
- Costos asociados a cambios en el nivel de la fuerza de trabajo: son costos en los que se incurre cuando los niveles de la fuerza laboral varían y están relacionados con actividades de contratación, capacitación y despidos.
- Costos de mantenimiento de inventario: cuando se guardan unidades en inventario siempre se incurre en costos que se generan por: espacio de almacenamiento ocupado, seguros, aseo o servicios asociados al mantenimiento del inventario (por ejemplo, energía si se requiere mantener refrigerado), costos de capital y costos por obsolescencia.
- Costos por faltantes o de escasez: es un costo difícil de medir y es una penalización que se impone la misma empresa por no contar con las unidades que necesita la demanda. Algunos de estos costos son más fácilmente identificables, como aquellos asociados a costos de expedición o a pérdidas de ingresos por ventas, mientras que otros son más abstractos, como aquellos asociados a la pérdida de la buena voluntad de los clientes y a la mala imagen que se crea de la empresa.
- Costos de subcontratación: una opción con la que también cuenta el sistema productivo es subcontratar cierto número de unidades que no esté en capacidad de producir, ya sea porque no desea incurrir en horas extras, no desea contratar operarios adicionales, no cuenta con el inventario suficiente o no cuenta con los equipos suficientes (esto último ya no depende del plan agregado). Naturalmente estas acciones de subcontratación tienen un costo asociado por unidad producida, dependiendo de lo que cobre la empresa que se subcontrate para estos fines.

## Estrategias para la planeación de la producción

Existen unos lineamientos generales que le indicarán a quienes toman las decisiones de operaciones lo que deben hacer. Estos lineamientos están asociados a los costos y variables vistos anteriormente y se les llama “estrategias para la planeación de la producción”. Se les ha llamado lineamientos generales porque en la práctica difícilmente las decisiones se ajustarán estrictamente a alguna de estas estrategias, sino que normalmente el plan se lleva a cabo mezclando aspectos de unas y de otras. Estas estrategias se muestran a continuación.

- Estrategia de contratación y despido: como su nombre lo indica, se trata de ajustar el nivel de la fuerza laboral a los requerimientos exactos de la demanda en cada mes, de tal manera que si de un mes a otro se prevé que la demanda aumentará, se contratarán operarios, y se despedirán en caso contrario. Esta estrategia requiere que se tenga constante oferta de personal para contratar cuando se requiera, así como la disponibilidad de tiempo para realizar constantes capacitaciones a los nuevos empleados. Además de esto, debe tenerse en cuenta el impacto emocional que esta estrategia tendría en los empleados, tanto en los que se quedan como en los que se despiden.
- Estrategia de horas extras: en esta estrategia el nivel de la fuerza laboral se mantiene estable y la demanda fluctuante se satisface programando horas extra. Así, al variar el número de horas laboradas puede igualarse el nivel de producción con la demanda. Su principal desventaja es el agotamiento de los empleados.
- Estrategia del nivel de inventario: en esta estrategia el nivel de la fuerza laboral se mantiene estable, así como también se mantienen constantes sus horarios de trabajo. La demanda fluctuante se maneja permitiendo que en algunos meses se presenten faltantes, mientras que en otros se presentará exceso de producción que será almacenada para el siguiente periodo. Como principal desventaja se tiene que los niveles de servicio al cliente disminuyen al presentar escasez constantemente, lo que eventualmente puede afectar los niveles de ventas.
- Estrategia de subcontratación: es una estrategia similar a la de contratación y despido, solo que en vez de variar el nivel de la fuerza laboral se decide sobre si subcontratar o no, dependiendo del nivel previsto para la demanda. La principal desventaja es que, a menos que la relación con el proveedor sea muy fuerte, se pierde control sobre la programación de la producción, lo cual puede terminar afectando la calidad de los productos.

En los párrafos anteriores se han esbozado algunas de las ventajas y desventajas cualitativas de cada estrategia, pero el principal criterio que se tiene para escoger una u otra o alguna estrategia mixta, es el costo. Por ejemplo, si se adopta una estrategia de contratación y despido, se ahorrarán los costos de horas extras, de subcontratación y de mantenimiento de inventario, pero se incurrirá en costos de contratación y despido. Cualquier estrategia que se escoja permitirá el ahorro de costos en unos rubros y al mismo tiempo incurrirá en costos en otros rubros. Es por esto que ninguna estrategia es mejor que otra y la escogencia de una sobre las otras dependerá de las condiciones particulares de cada empresa. Es decir, para tomar la mejor decisión se debe hacer un detallado estudio de los costos que implicaría la

adopción de una u otra estrategia, para así escoger la que menor costo arroje. Un ejemplo de este análisis se muestra a continuación.

**Ejemplo 1.** (Adaptado de Chase, et al., 2009) La compañía El Celuchévere produce teléfonos celulares. Para efectos de realizar el plan agregado ha estimado los datos mostrados en las Tablas 1, 2 y 3. En la Tabla 1 se muestra el pronóstico de la demanda (en unidades) para los próximos 6 meses, así como el número de días laborables en cada mes. En la Tabla 2 se muestran los costos estimados y en la Tabla 3 se muestra la cantidad de horas que requiere producir un celular, la cantidad de inventario con que se cuenta al iniciar enero y el porcentaje de inventario de seguridad que por política ha establecido la compañía<sup>1</sup>. Evalúe las cuatro estrategias de planeación de producción a través del cálculo de los costos totales y determine cuál debe ser el plan agregado para El Celuchévere.

<sup>1</sup> El inventario de seguridad es una cantidad que establece la compañía para reducir la probabilidad de que se agoten las existencias, es decir, actúa como una especie de amortiguador para tratar de evitar la demanda insatisfecha

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Total
Pronóstico de la demanda	1800	1500	1100	900	1100	1600	8000
Número de días hábiles	22	19	21	21	22	20	125

Tabla 1. Pronóstico de la demanda para el Ejemplo 1.  
Fuente: Propia

	Costo
Costo de mantenimiento de inventario	\$1,50/(unidad*mes)
Costo por faltantes	\$5,00/(unidad*mes)
Costo de subcontratación	\$20,00/unidad
Costo de contratación y capacitación	\$200,00/trabajador
Costo de despido	\$250,00/trabajador
Costo de producción (tiempo regular)	\$4,00/hora
Costo de producción (tiempo extra)	\$6,00/hora

Tabla 2. Costos estimados para el Ejemplo 1  
Fuente: Propia

Horas de trabajo requeridas por unidad	5 horas/unidad
Inventario inicial	400 unidades
Inventario de seguridad	25% de la demanda

Tabla 3. Datos de inventario  
Fuente: Propia.

Antes de llevar a cabo los cálculos correspondientes a la evaluación de costos de cada estrategia, es necesario calcular cuáles son los requerimientos de producción. Inicialmente podría pensarse que estos requerimientos son iguales a las cantidades dadas por la demanda, pero esto no es cierto debido a que hay un inventario inicial y además cada mes debe dejarse un inventario de seguridad. En la Tabla 4 se muestran estos cálculos. El pronóstico de la demanda para cada mes es el dado por la Tabla 1; el inventario de seguridad se calcula como el 25% de esta, es decir,  $(0,25 * \text{pronóstico de la demanda})$ ; el requerimiento de producción será igual a:  $(\text{pronóstico de la demanda} + \text{inventario de seguridad} - \text{inventario inicial})$ ; el inventario final es igual a:  $(\text{inventario inicial} + \text{requerimiento de producción} - \text{demanda})$ , aunque esto arroja evidentemente que el inventario final es igual al inventario de seguridad. Finalmente, el inventario inicial del mes siguiente es igual al inventario final del mes anterior.

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
Inventario inicial	400	450	375	275	225	275
Pronóstico de la demanda	1800	1500	1100	900	1100	1600
Inventario de seguridad	450	375	275	225	275	400
Requerimiento de producción	1850	1425	1000	850	1150	1725
Inventario final	450	375	275	225	275	400

Tabla 4. Cálculo de los requerimientos de producción  
Fuente: Propia.

Todas estas cifras, así como las que resultarán al evaluar cada estrategia, pueden obtenerse fácilmente haciendo uso de una hoja de cálculo como Microsoft Excel. Se invita al lector a llevar a cabo este ejercicio, pues servirá para asimilar mucho mejor los conceptos expuestos y las fórmulas utilizadas.

A continuación se evaluará cada una de las estrategias expuestas en la sección 1.2. Inicialmente se mostrará la estrategia de contratación y despido. Solo se trabaja en tiempo regular en 1 turno de 8 horas y se contará únicamente con los trabajadores estrictamente necesarios para la producción requerida. En la Tabla 5 se muestran los cálculos correspondientes a esta estrategia. Recuerde que el objetivo final es determinar cuál es la estrategia menos costosa, así que los cálculos se centrarán en el cálculo de los costos asociados a las decisiones a tomar en cada estrategia. Los cálculos de la Tabla 5 se explican a continuación:

- Requerimiento de producción: dato calculado en la Tabla 4.
- Horas de producción requeridas: se multiplica el tiempo estándar de producción (Tabla 3) por el requerimiento de producción:  $(5 \text{ horas/unidad}) * (\text{Requerimiento de producción})$
- Días hábiles por mes: tomado de la Tabla 1.
- Horas al mes por trabajador: es la cantidad de horas totales que puede laborar un trabajador, así:  $(8 \text{ horas/día}) * (\text{Días Hábiles})$ .

- Trabajadores requeridos: es igual a las horas de producción requeridas divididas entre las horas al mes por trabajador.
- Trabajadores contratados: si se supone que al principio del horizonte de planeación se cuenta exactamente con los trabajadores requeridos en enero, basta con observar en qué mes se requieren más trabajadores que en el mes anterior para poder realizar la contratación de los faltantes.
- Costo de contratación: es igual a  $(\$200) * (\text{Trabajadores contratados})$ .
- Trabajadores despedidos: en aquellos meses en que se requiera menos trabajadores que en el anterior, se despedirá la diferencia.
- Costo de despido: es igual a  $(\$250) * (\text{Trabajadores despedidos})$ .
- Costo del tiempo regular: se refiere al costo de producción (Tabla 2) multiplicado por la cantidad de horas requeridas, es decir:  $(\$4/\text{hora}) * (\text{horas requeridas})$ .

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Total
Requerimiento de producción	1850	1425	1000	850	1150	1725	
Horas de producción requeridas	9250	7125	5000	4250	5750	8625	
Días hábiles por mes	22	19	21	21	22	20	
Horas al mes por trabajador	176	152	168	168	176	160	
Trabajadores requeridos	53	47	30	25	33	54	
Trabajadores contratados	0	0	0	0	8	21	
Costo de contratación	0	0	0	0	1600	4200	5800
Trabajadores despedidos	0	6	17	5	0	0	
Costo de despido	0	1500	4250	1250	0	0	7000
Costo del tiempo regular	37000	28500	20000	17000	23000	34500	160000
						Costo total	172800

Tabla 5. Cálculo de los costos para la estrategia de contratación y despido  
Fuente: Propia.

En la Tabla 6 se observan los cálculos asociados a la estrategia de horas extras. En esta no solo se permiten horas extras, sino algunos inventarios debido a las diferencias en los valores de demanda cada mes. Los cálculos de la Tabla 6 se explican a continuación:

- Inventario inicial: es igual a la cantidad de unidades que quedan disponibles antes del tiempo extra, en el mes anterior. Si tales unidades son negativas, entonces el inventario inicial es de cero.
- Horas de producción disponibles: es igual a  $(8 \text{ horas/día}) * (\text{días hábiles}) * (38 \text{ trabajadores})$ .

Se ha establecido una cantidad fija de 38 trabajadores, la cual hace que el inventario final sea lo más cercano a cero que se pueda. Tal número de trabajadores se determina mediante prueba y error. Una hoja de cálculo facilita este trabajo.

- Producción en turno regular: es igual a  $(\text{Horas de producción disponibles}) / (5 \text{ horas/unidad})$ .
- Unidades antes de tiempo extra: es igual a  $(\text{inventario inicial} + \text{producción en turno regular} - \text{pronóstico de demanda})$ .
- Unidades a producir en tiempo extra: cuando las unidades antes de tiempo extra son negativas, estas deben producirse en tiempo extra. A eso se refiere este ítem.
- Costo del tiempo extra: es igual a  $(\text{Unidades a producir en tiempo extra}) * (5 \text{ horas/unidad}) * (\$6/\text{hora})$ . Este costo se obtiene de la Tabla 2.
- Unidades en exceso: se refiere a las unidades disponibles antes de tiempo extra, descontándole el inventario de seguridad, es decir,  $(\text{Unidades antes de tiempo extra} - \text{Inventario de seguridad})$ .
- Costo de inventarios: es igual a  $(\$1,5/(\text{unidad} * \text{mes})) * (\text{Unidades en exceso})$ . Nuevamente, el costo se obtiene de la Tabla 2.

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Total
Inventario inicial	400	0	0	177	554	792	
Días hábiles por mes	22	19	21	21	22	20	
Horas de producción disponibles	6688	5776	6384	6384	6688	6080	
Producción en turno regular	1338	1155	1277	1277	1338	1216	
Pronóstico de la demanda	1800	1500	1100	900	1100	1600	
Unidades antes de tiempo extra	-62	-345	177	554	792	408	
Unidades a producir en tiempo extra	62	345	0	0	0	0	
Costo del tiempo extra	1860	10350	0	0	0	0	12210
Inventario de seguridad	450	375	275	225	275	400	
Unidades en exceso	0	0	0	329	517	8	
Costo de inventarios	0	0	0	493,5	775,5	12	1281
Costo del tiempo regular	26752	23104	25536	25536	26752	2320	152000
							Costo total 165491

Tabla 6. Cálculo de los costos para la estrategia de horas extras  
Fuente: Propia.

En la Tabla 7 se observan los cálculos asociados a la estrategia del nivel de inventario. En esta no solo se almacena inventario en aquellos meses con exceso, sino que se permite que en algunos meses se presenten faltantes. Los cálculos de la Tabla 7 se explican a continuación:

- Inventario inicial: es igual al inventario final del mes anterior.
- Horas de producción disponibles: es igual a  $(8 \text{ horas/día}) * (\text{días hábiles}) * (40 \text{ trabajadores})$ . Se ha calculado una cantidad fija de 40 trabajadores, la cual es el promedio de trabajadores requeridos para cumplir con la totalidad de la demanda de los 6 meses.

- Inventario final: es igual a  $(\text{Inventario inicial} + \text{Producción en turno regular} - \text{Pronóstico de la demanda})$ .
- Costo de escasez: se calcula únicamente cuando el inventario final es negativo, pues solo en ese caso hay faltantes. Es igual a  $(\$5 / (\text{unidad} * \text{mes}) * \text{unidades faltantes})$ .
- Unidades en exceso: se refiere a las unidades disponibles descontando el inventario de seguridad, es decir,  $(\text{Inventario final} - \text{Inventario de seguridad})$ .

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Total
Inventario inicial	400	8	-276	-32	412	720	
Días hábiles por mes	22	19	21	21	22	20	
Horas de producción disponibles	7040	6080	6720	6720	7040	6400	
Producción en turno regular	1408	1216	1344	1344	1408	1280	
Pronóstico de la demanda	1800	1500	1100	900	1100	1600	
Inventario final	8	-276	-32	412	720	400	
Costo de escasez	0	1380	160	0	0	0	1540
Inventario de seguridad	450	375	275	225	275	400	
Unidades en exceso	0	0	0	187	445	0	
Costo de inventarios	0	0	0	280,5	667,5	0	948
Costo del tiempo regular	28160	24320	26880	26880	28160	25600	160000
						Costo total	162488

Tabla 7. Cálculo de los costos para la estrategia del nivel de inventario  
Fuente: Propia.

En la Tabla 8 se observan los cálculos asociados a la estrategia de subcontratación. En esta se cuenta con cierto número de trabajadores, usualmente el mínimo necesario, y lo que no se alcance a hacer se subcontrata. Los cálculos de la Tabla 8 se explican a continuación:

- Horas de producción disponibles: es igual a  $(8 \text{ horas/día}) * (\text{días hábiles}) * (25 \text{ trabajadores})$ . Se ha calculado una cantidad fija de 25 trabajadores, la cual es el mínimo requerido. Este mínimo es el del mes de abril, que es cuando el requerimiento de producción es el más bajo.
- Unidades subcontratadas: es igual a  $(\text{Requerimientos de producción} - \text{Producción en turno regular})$ .
- Costo de la subcontratación: es igual a  $(\$20/\text{unidad}) * \text{Unidades subcontratadas}$ .

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Total
Requerimiento de producción	1850	1425	1000	850	1150	1725	
Días hábiles por mes	22	19	21	21	22	20	
Horas de producción disponibles	4400	3800	4200	4200	4400	4000	
Producción en turno regular	880	760	840	840	880	800	
Unidades subcontratadas	970	665	160	10	270	925	
Costo de la subcontratación	19400	13300	3200	200	5400	18500	60000
Costo del tiempo regular	17600	15200	16800	16800	17600	16000	100000
						Costo total	160000

Tabla 8. Cálculo de los costos para la estrategia de subcontratación  
Fuente: Propia.

Luego de haber hecho los cálculos correspondientes a las cuatro estrategias y al revisar los costos totales obtenidos en las Tablas 5, 6, 7 y 8, se concluye que la mejor estrategia es la de subcontratación, pues arroja el costo total más bajo. Esto indica que la empresa El Celuché-vere debe contar con 25 trabajadores de manera estable para los próximos 6 meses, no se requieren programar horas extras, no se requiere mantener inventario ni incurrir en escasez, y las unidades que no se alcancen a fabricar se subcontratan.

Debe tenerse en cuenta que ninguna estrategia es mejor que otra, es decir, para la misma empresa en un horizonte de planeación distinto, o para otras empresas, o en otras condiciones, o con cifras distintas de costos o demanda, la estrategia que arroje el menor costo puede ser una distinta a la de subcontratación.

## Actividades auto-evaluativas

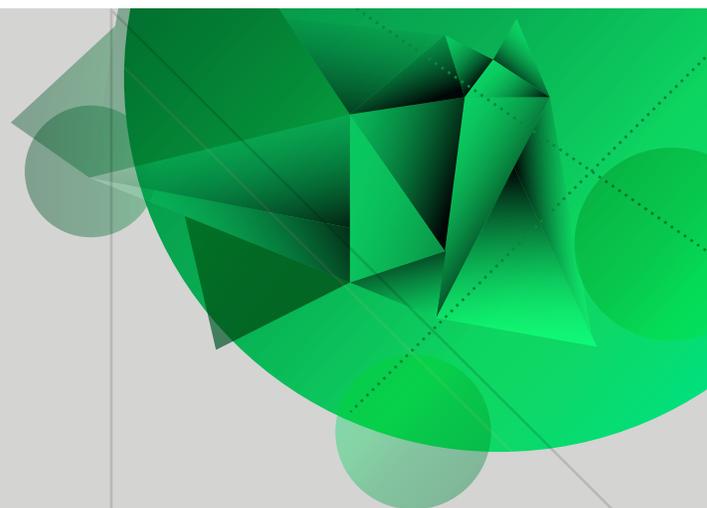
Realice de nuevo el ejemplo 1, suponiendo los siguientes datos para los costos. Ofrezca conclusiones para el ejercicio.

	Costo
Costo de mantenimiento de inventario	\$1,50/(unidad*mes)
Costo por faltantes	\$5,00/(unidad*mes)
Costo de subcontratación	\$20,00/unidad
Costo de contratación y capacitación	\$200,00/trabajador
Costo de despido	\$250,00/trabajador
Costo de producción (tiempo regular)	\$4,00/hora
Costo de producción (tiempo extra)	\$6,00/hora

# 3

## Unidad 3

Planeación agregada  
de operaciones



Administración de operaciones

Autor: Rafael Tordecillas

# Introducción

En la presente semana, se estudiarán las decisiones de tipo táctico que se deben tomar en un sistema productivo. Estas se refieren a decisiones a mediano plazo, con un horizonte de planeación entre 3 y 12 meses, con revisión semanal, mensual o trimestral. Tales decisiones incluyen: planeación agregada de operaciones, programación maestra y planeación de los requerimientos de materiales.

Estudiaremos la planeación agregada de operaciones, la cual establece las cantidades a producir por unidad de tiempo, para familias de productos. Sin embargo, a diferencia de lo estudiado la semana anterior, en esta ocasión se verá el caso en el que no se permiten cambios en los niveles de la fuerza laboral, lo cual hace que se pueda hallar el plan que arroja el costo mínimo mediante la utilización de un sencillo procedimiento en Microsoft Excel. Este procedimiento sirve entonces como herramienta de apoyo en la toma de decisiones relacionadas con los niveles de inventario y las unidades de producto fabricadas en tiempo regular y en tiempo extra.

La presente cartilla está dividida en dos grandes partes: una pequeña parte conceptual y un amplio ejemplo. Para entender la primera parte se recomienda dar una lectura rápida a la cartilla y luego leerla nuevamente de forma más pausada, haciendo hincapié en los conceptos que mayor dificultad le generaron. Para la parte del ejemplo se recomienda inicialmente entender bien los parámetros, datos e información que se da en el ejercicio y luego procurar comprender cada uno de los cálculos que se llevan a cabo en la solución del ejercicio. Luego, para la parte en la que se desarrolla el ejercicio en Microsoft Excel, debe leer detenidamente cada uno de los pasos llevados a cabo y al mismo tiempo ir desarrollándolos en una hoja de cálculo. No olvide consultar con su tutor cualquier duda que se le presente.

## Planeación agregada de operaciones

En la cartilla de la semana anterior se inició el tema de la planeación agregada. Recuerde que esta se refiere a un nivel de decisión en la administración de operaciones en la que no se toman decisiones de ningún producto en particular, sino de un conjunto o familia de ellos. La planeación agregada puede incluso hacerse para la totalidad de los productos de la empresa, sin especificar detalles para cada uno de ellos.

Se estudiaron entonces un conjunto de estrategias que se pueden implementar en un plan agregado, con el objetivo de encontrar cuál de ellas arroja el costo más pequeño. Sin embargo, el análisis a través de tablas que se estudió la semana anterior no ofrece la posibilidad de encontrar el mínimo costo posible, pues por experiencia en este campo se sabe que en la mayoría de las ocasiones este mínimo se obtiene con una estrategia mixta, mientras que las estudiadas a través de las tablas son estrategias puras.

Para encontrar tal costo mínimo no es útil el enfoque a través de tablas, sino que se debe hacer uso de un modelo de programación lineal<sup>1</sup>, el cual escapa al alcance de este módulo<sup>2</sup>. Sin embargo, si en el plan agregado no se permiten las decisiones referentes a contratación y despido de los trabajadores, el costo mínimo puede hallarse de una forma relativamente sencilla haciendo uso del método de transporte, el cual es un caso particular de la programación lineal. Para esto se hará uso de la herramienta Solver de Microsoft Excel, pues aunque se puede hacer manualmente, el proceso es un poco dispendioso.

### Planeación agregada sin cambios en los niveles de la fuerza laboral

1 La programación lineal es una herramienta matemática que es una rama de la investigación de operaciones. Para mayor claridad en el tema puede leerse la lectura complementaria "Analista de investigación de operaciones". En particular, la programación lineal es una herramienta cuantitativa que, haciendo uso de un modelo matemático, es utilizada para la toma de decisiones de programación de actividades y asignación de recursos, con la cual se busca obtener un resultado óptimo (maximización o minimización de algún parámetro, por ejemplo, utilidad o costo) entre todas las alternativas de solución. Para ampliación del tema puede consultarse Taha, H. (2011). Investigación de operaciones (9ª ed.). México D.F., Pearson Educación

2 Un modelo de programación lineal específico para este problema puede consultarse en Elsayed, E.A., & Boucher, T.O. (1994). Analysis and control of production systems (2ª ed.). New Jersey, Prentice Hall

Cuando en un plan agregado las únicas decisiones a tomar son las referentes a niveles de inventario, horas a trabajar en tiempo regular y horas a trabajar en tiempo extra (e incluso unidades de producto a subcontratar), el mejor enfoque es el que hace uso del método de transporte. Se dice que es el mejor porque este minimiza el costo total, es decir, a través de él se puede generar un plan que arroja el costo más pequeño posible, cumpliendo con la demanda pronosticada y sin violar los límites de capacidad del sistema productivo.

El método de transporte es un caso especial de la programación lineal que hace uso de un algoritmo diseñado inicialmente para minimizar el costo en problemas donde hay unos puntos que tienen la capacidad de ofrecer diversas cantidades de un producto y hay otros puntos que demandan ese mismo producto, como se muestra en la Figura 1. En esta, las flechas indican todas las rutas posibles a través de las cuales se pueden hacer envíos y cada una tendrá un costo unitario asociado pues, como su nombre lo indica, fue diseñado para problemas que implican un transporte, es decir, distribución física, sin embargo, las características particulares de este problema y de este algoritmo permiten que sea aplicado en otro tipo de problemas que no son de transporte. Un ejemplo de esto es el problema de planeación agregada en el que no se permite contratación y despido.

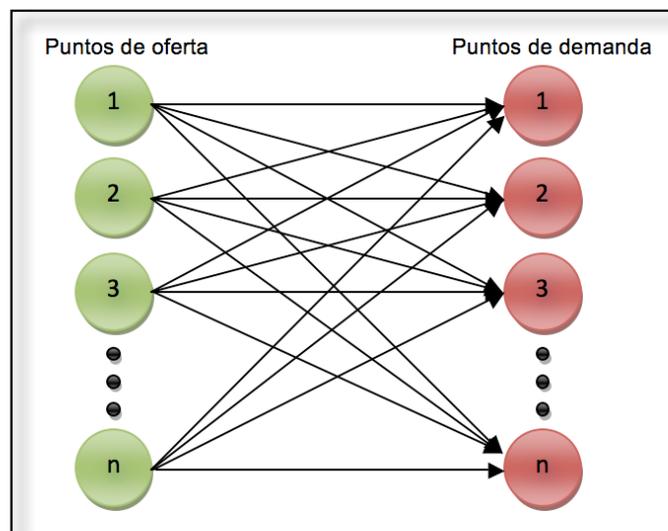


Figura 1. Esquema de un problema de transporte  
Fuente: Propia.

Para este fin se considerará que los periodos (meses, por ejemplo) en los que se realiza producción harán las veces de puntos de oferta, y los periodos en los que se realiza consumo harán las veces de puntos de demanda. Esto quiere decir que básicamente se debe decidir, por ejemplo, qué cantidad de la producción del mes 1 se consumirá en el mismo mes, qué cantidad se almacenará para consumo en el mes 2, qué cantidad se almacenará para consumo en el mes 3 y así sucesivamente. Este mismo tipo de decisiones se debe tomar con las cantidades producidas en el mes 2, con las cantidades producidas en el mes 3 y así sucesivamente.

Una pregunta común es si es posible realizar producción en un mes dado para satisfacer demandas de meses anteriores a ese. La respuesta es positiva, si se permite que el sistema productivo incurra en faltantes. Por ejemplo, es posible que la capacidad del mes 1 no sea suficiente para satisfacer la demanda de ese mismo mes, entonces quedarán unos pedidos pendientes que deben satisfacerse con unidades producidas en el mes 2, en el mes 3 o en algún mes posterior. Naturalmente estos faltantes implican un costo, tal como se vio en la cartilla de la semana 4, cuando se estudió la planeación agregada mediante tablas.

Los datos de entrada para realizar el plan agregado mediante el método de transporte básicamente son los mismos que los usados mediante tablas, exceptuando aquellos costos relacionados con contratación y despido de trabajadores. Estos datos necesarios son entonces: costos de producción unitarios en tiempo regular, costos de producción unitarios en tiempo extra, costos de mantener inventario, costos por faltantes, capacidad del sistema productivo en tiempo regular y en tiempo extra y el pronóstico agregado para la demanda.

**Ejemplo 1.** (Basado en Elsayed, & Boucher, 1994). La empresa Salsita Rica elabora sobres de salsa de dos sabores: de piña y de ciruela, ya sea en tiempo regular o en tiempo extra. La demanda estimada para los siguientes 4 meses se muestra en la Tabla 1.

Mes	Demanda (Unidades)	
	Salsa de piña	Salsa de ciruela
Mayo	100	200
Junio	90	190
Julio	110	210
Agosto	100	200

Tabla 1. Pronóstico de la demanda para el Ejemplo 1  
Fuente: Propia.

Los niveles iniciales de inventario son de 36 sobres de salsa de piña y 220 sobres de salsa de ciruela. Fabricar 1 sobre de salsa de piña toma 1 hora y 1 sobre de salsa de ciruela, 0,4 horas. Los costos asociados a la producción son:

- Costo de producción en tiempo regular, CR = \$10/hora
- Costo de producción en tiempo extra, CE = \$15/hora
- Costo de manejo de inventario, CI = \$4/(hora-mes)
- Costo por faltantes, CF = \$8/(hora-mes)

Las capacidades de producción para tiempo regular y tiempo extra son:

- Tiempo regular = 160 horas/mes
- Tiempo extra = 40 horas/mes

Además de esto, para el siguiente horizonte de planeación (que inicia en septiembre) la empresa requiere tener una cantidad equivalente a 80 horas de inventario final. Debe establecerse el plan agregado de producción para estos productos, de tal forma que los costos de producción e inventario sean minimizados.

Como hay cierta cantidad de inventario al inicio del horizonte de planeación, la demanda neta para los primeros periodos será menor a la mostrada pues puede satisfacerse con esta cantidad de inventario. Además, antes de establecer el plan agregado debe agregarse la demanda, es decir, expresar la demanda en términos de una sola unidad, para no hablar de sobres de salsa de piña y sobres de salsa de ciruela. Dado que las capacidades y los costos están en términos de horas, lo más fácil será agregar la demanda también en términos de horas. Esto se interpreta como la cantidad de horas que se requerirá del sistema productivo para satisfacer la demanda. En la Tabla 2 se muestran estos cálculos iniciales.

Mes	Demanda Neta (Unidades)		Demanda agregada (horas)
	Salsa de piña	Salsa de ciruela	
Mayo	64	0	64
Junio	90	170	158
Julio	110	210	194
Agosto	100	200	180

Tabla 2. Cálculo de la demanda neta y la demanda agregada para el Ejemplo 1  
Fuente: Propia.

Para el cálculo de la demanda neta se tiene en cuenta el inventario inicial de cada salsa. Así, para la salsa de piña se tenía una demanda de 100 sobres en mayo (Tabla 1), que al restarle los 36 sobres de inventario arrojan los 64 mostrados en la Tabla 2. Para la salsa de ciruela se tenía una demanda de 200 sobres en mayo y 190 sobres de junio y como se tienen 220 en inventario, estos alcanzan para satisfacer la totalidad de la demanda de mayo y una cantidad de 20 sobres de junio, quedando en 170 sobres la demanda neta para este mes.

Por otro lado, para el cálculo de la demanda agregada se toman los tiempos estándar dados en el enunciado del ejercicio, aplicando la siguiente fórmula:

$$Demanda\ agregada = \left( 1 \frac{hora}{sobre\ piña} \right) * \left( Demanda\ neta\ sobre\ de\ piña \right) + \left( 0,4 \frac{hora}{sobre\ ciruela} \right) * \left( Demanda\ neta\ sobre\ de\ ciruela \right)$$

Así por ejemplo, si se va a calcular la demanda agregada de julio, se tiene:

$$Demanda\ agregada = \left( 1 \frac{hora}{sobre\ piña} \right) * (110\ sobres) + \left( 0,4 \frac{hora}{sobre\ ciruela} \right) * (210\ sobres) = 194\ horas$$

- Ya teniendo la demanda agregada se procede a construir la matriz de transporte, la cual es necesaria para resolver el problema, tanto si se fuera a resolver manualmente como en Microsoft Excel. Esta matriz tiene tres datos básicos: la demanda, la capacidad y los costos. Los dos primeros ya se tienen explícitamente, pero los costos deben ser calculados pues si bien en el enunciado se dan los datos básicos referentes a estos, los costos necesarios deben estar expresados de tal forma que sea explícito lo siguiente:
- El costo de producción por hora para fabricar sobres que serán consumidos en el mismo mes en que son producidos. En este caso el costo sí es explícitamente el que se da, tanto en tiempo regular como en tiempo extra (CR y CE).
- El costo de producción por hora para fabricar sobres que serán consumidos en un mes posterior al que son producidos. En este caso se debe sumar al costo de producción el costo de mantener inventario, teniendo en cuenta si el almacenamiento se llevará a cabo por uno o más meses. Por ejemplo, ¿cuánto cuesta una hora de producción en tiempo regular en mayo para fabricar sobres que serán consumidos en julio? En este caso a CR se le debe sumar dos veces CI. Será 2 veces porque de mayo a julio hay 2 meses, es decir, el inventario queda guardado durante 2 meses. En términos matemáticos sería:

$$CR + 2CI = 10 + (2 * 4) = \$18/hora$$

- El costo de producción por hora para fabricar sobres que serán consumidos en un mes anterior al que son producidos. En este caso se debe sumar al costo de producción el costo por faltantes, teniendo en cuenta si el retraso se da por uno o más meses. Por ejemplo, ¿cuánto cuesta una hora de producción en tiempo extra en agosto para reponer sobres que se deben de mayo? En este caso a CE se le debe sumar tres veces CF. Será 3 veces porque de mayo a agosto hay 3 meses, es decir, se deben sobres de hace 3 meses. En términos matemáticos sería:

$$CE + 3CF = 15 + (3 * 8) = \$39/hora$$

Con esta información ya es posible construir la matriz de transporte, la cual se muestra en la Tabla 3. En la columna de la derecha se observan los datos de capacidad dados en el enunciado del ejercicio. En la última fila se observan los datos de demanda agregada calculados en la Tabla 2. Se ha agregado allí también la cantidad de horas de inventario que debe quedar al final del horizonte de planeación. Precisamente en la columna del inventario final se han agregado también los datos de costos correspondientes, cuyo cálculo es similar a como se explicó previamente, considerando que ese inventario es algo que queda para el mes siguiente al horizonte de planeación (septiembre en este caso). Por ejemplo, ¿cuánto cuesta una hora de producción en tiempo extra en junio para fabricar sobres que queden en tal inventario final? En este caso a CE se le debe sumar tres veces CI. Será 3 veces porque de junio a septiembre hay 3 meses, es decir, el inventario queda guardado durante 3 meses. En términos matemáticos sería:

$$CE + 3CI = 15 + (3 * 4) = \$27/hora$$

Periodo de producción		Periodo de demanda				Inventario final	Capacidad
		Mayo	Junio	Julio	Agosto		
Mayo	T. Regular	10	14	18	22	26	160
	T. Extra	15	19	23	27	31	40
Junio	T. Regular	18	10	14	18	22	160
	T. Extra	23	15	19	23	27	40
Julio	T. Regular	26	18	10	14	18	160
	T. Extra	31	23	15	19	23	40
Agosto	T. Regular	34	26	18	10	14	160
	T. Extra	39	31	23	15	19	40
Demanda agregada		64	158	194	180	80	

Tabla 3. Matriz de transporte para el Ejemplo 1  
Fuente: Propia.

Los datos mostrados en la Tabla 3 representan la información básica que debe introducirse en Excel para poder resolver el problema. A continuación se explicará paso a paso cómo debe ser el uso de esta herramienta para hallar la solución óptima de este ejercicio. Se recomienda al estudiante ir realizando estos pasos en Excel para una mejor comprensión del procedimiento.

Inicialmente debe tenerse instalada la herramienta Solver de Excel, la cual no viene instalada por defecto. Para instalarla debe abrir la pestaña Archivo y luego hacer clic en Opciones. Allí se abrirá un cuadro en el que deberá hacer clic en Complementos y luego en el botón Ir... Luego se abrirá otro cuadro en el que deberá seleccionar la opción Solver y finalmente hacer clic en Aceptar. En la Figura 2 se muestran estos pasos.

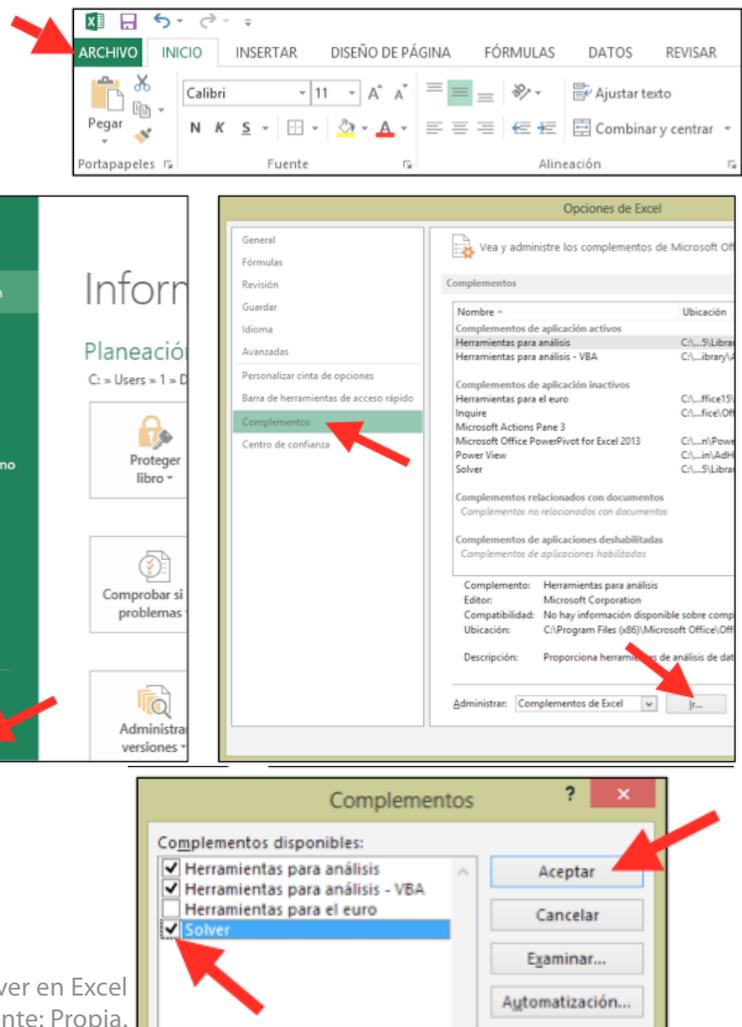


Figura 2. Pasos para instalar Solver en Excel  
Fuente: Propia.

Una vez hecho esto, introduzca en Excel los datos mostrados en la Tabla 3 y además cree una tabla adicional, tal como se muestra en la Figura 3. Ambas tablas son similares, excepto que la segunda (en color naranja) no debe contener los datos de costos y además debe tener una columna adicional que se ha nombrado como Suma de capacidad y una fila adicional se ha nombrado como Suma de demanda.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
2		<b>Periodo de producción</b>		<b>Periodo de demanda</b>				<b>Inventario final</b>	<b>Capacidad</b>		
3				<b>Mayo</b>	<b>Junio</b>	<b>Julio</b>	<b>Agosto</b>				
4		Mayo	T.Regular	10	14	18	22	26	160		
5			T.Extra	15	19	23	27	31	40		
6		Junio	T.Regular	18	10	14	18	22	160		
7			T.Extra	23	15	19	23	27	40		
8		Julio	T.Regular	26	18	10	14	18	160		
9			T.Extra	31	23	15	19	23	40		
10		Agosto	T.Regular	34	26	18	10	14	160		
11			T.Extra	39	31	23	15	19	40		
12			<b>Demanda agregada</b>	64	158	194	180	80			
14		<b>Periodo de producción</b>		<b>Periodo de demanda</b>				<b>Inventario final</b>	<b>Suma de Capacidad</b>	<b>Capacidad</b>	
15				<b>Mayo</b>	<b>Junio</b>	<b>Julio</b>	<b>Agosto</b>				
16		Mayo	T.Regular							160	
17			T.Extra							40	
18		Junio	T.Regular							160	
19			T.Extra							40	
20		Julio	T.Regular							160	
21			T.Extra							40	
22		Agosto	T.Regular							160	
23			T.Extra							40	
24		<b>Suma de demanda</b>									
25			<b>Demanda agregada</b>	64	158	194	180	80			

Figura 3. Tablas iniciales de transporte en Excel  
Fuente: Propia.

Antes de hacer uso del Solver, deben introducirse una serie de cálculos básicos en la matriz naranja. Primero, en cada celda ubicada en la columna Suma de Capacidad, debe sumar las celdas de la fila correspondiente, tal como se muestra en la Figura 4. Haga esto para cada una de las celdas de esa columna. Para esto puede arrastrar hacia abajo la fórmula que introdujo.

<b>Periodo de producción</b>		<b>Periodo de demanda</b>				<b>Inventario final</b>	<b>Suma de Capacidad</b>	<b>Capacidad</b>
		<b>Mayo</b>	<b>Junio</b>	<b>Julio</b>	<b>Agosto</b>			
Mayo	T.Regular						=SUMA(D16:H16)	
	T.Extra							40

Figura 4. Suma de capacidades  
Fuente: Propia.

De igual forma, en cada celda ubicada en la fila Suma de demanda sume las celdas de la columna correspondiente, tal como se muestra en la Figura 5. Haga esto para cada una de las celdas de esta fila. Para esto puede arrastrar hacia la derecha la fórmula que introdujo.

producción	Periodo de	
	Mayo	Junio
T.Regular		
T.Extra		
T.Regular		
T.Extra		
T.Regular		
T.Extra		
T.Regular		
T.Extra		
<b>demanda</b>	=SUMA(D16:D23)	
agregada	64	158

Figura 5. Suma de demandas  
Fuente: Propia.

Finalmente, en la celda vacía ubicada en la esquina inferior derecha, introduzca la fórmula Sumaproducto. Observe en la Figura 6, en colores azul y rojo, cómo debe quedar la selección para esta fórmula. Esta relacionará los costos de la matriz color violeta con las celdas vacías de la matriz color naranja. Note que la selección en color azul debe tener exactamente las mismas medidas que la selección en color rojo. Cuando ya haya introducido todas las fórmulas indicadas en las Figuras 4, 5 y 6, debe quedarle una serie de ceros, tal como se observa en la Figura 7.

Periodo de producción		Periodo de demanda				Inventario final	Capacidad	
		Mayo	Junio	Julio	Agosto			
Mayo	T.Regular	10	14	18	22	26	160	
	T.Extra	15	19	23	27	31	40	
Junio	T.Regular	18	10	14	18	22	160	
	T.Extra	23	15	19	23	27	40	
Julio	T.Regular	26	18	10	14	18	160	
	T.Extra	31	23	15	19	23	40	
Agosto	T.Regular	34	26	18	10	14	160	
	T.Extra	39	31	23	15	19	40	
Demanda agregada		64	158	194	180	80		
Periodo de producción		Periodo de demanda				Inventario final	Suma de Capacidad	Capacidad
		Mayo	Junio	Julio	Agosto			
Mayo	T.Regular						0	160
	T.Extra						0	40
Junio	T.Regular						0	160
	T.Extra						0	40
Julio	T.Regular						0	160
	T.Extra						0	40
Agosto	T.Regular						0	160
	T.Extra						0	40
Suma de demanda		0	0	0	0	0		
Demanda agregada		64	158	194	180	80		

Figura 6. Sumaproducto como relación entre ambas matrices  
Fuente: Propia.

Periodo de producción		Periodo de demanda				Inventario final	Suma de Capacidad	Capacidad
		Mayo	Junio	Julio	Agosto			
Mayo	T.Regular					0	160	
	T.Extra					0	40	
Junio	T.Regular					0	160	
	T.Extra					0	40	
Julio	T.Regular					0	160	
	T.Extra					0	40	
Agosto	T.Regular					0	160	
	T.Extra					0	40	
<b>Suma de demanda</b>		0	0	0	0	0		
Demanda agregada		64	158	194	180	80	0	

Figura 7. Matriz de transportes con las sumas correspondientes  
Fuente: Propia.

Cuando haya introducido correctamente todas las fórmulas, entonces es momento de hacer uso de la herramienta Solver de Excel. Para esto, vaya a la pestaña Datos y seleccione Solver, tal como se muestra en la Figura 8.

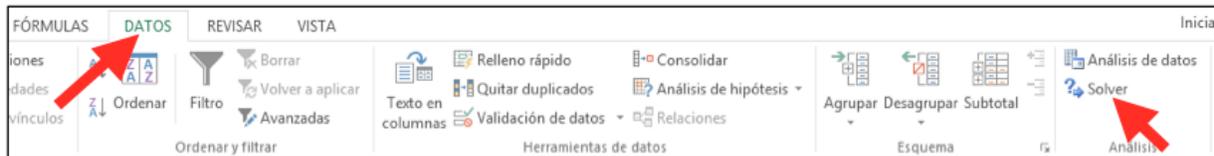


Figura 8. Pasos para abrir Solver de Excel  
Fuente: Propia.

Una vez haya hecho clic en Solver se abrirá un cuadro llamado Parámetros de Solver, como el mostrado en la Figura 9. Allí hay varios campos que deben ser diligenciados. El primero es el llamado Establecer objetivo y allí deberá seleccionar la celda que previamente diligenció con la función Sumaprodueto. En la parte inferior izquierda se observa esta celda encerrada con una línea verde punteada. Luego de esto, tal como se muestra en la misma figura, en el cuadro Parámetros de Solver deberá marcar la opción Min. El procedimiento que se ha descrito en este párrafo sirve para indicar el objetivo del ejercicio, el cual es minimizar el costo total.

Ahora deberán ser seleccionadas las variables del ejercicio, en el campo llamado Cambiando las celdas de variables. En el contexto del ejercicio que está siendo resuelto, estas se refieren a las celdas vacías de la tabla color naranja, tal como se observa en la Figura 10. Allí se observan tales celdas encerradas con una línea verde punteada. El procedimiento que se ha descrito en este párrafo sirve para indicar las variables que Solver debe modificar para minimizar el costo. Para el caso de este ejercicio las variables se refieren a las cantidades que serán producidas en tiempo regular y en tiempo extra para satisfacer la demanda de cada mes.

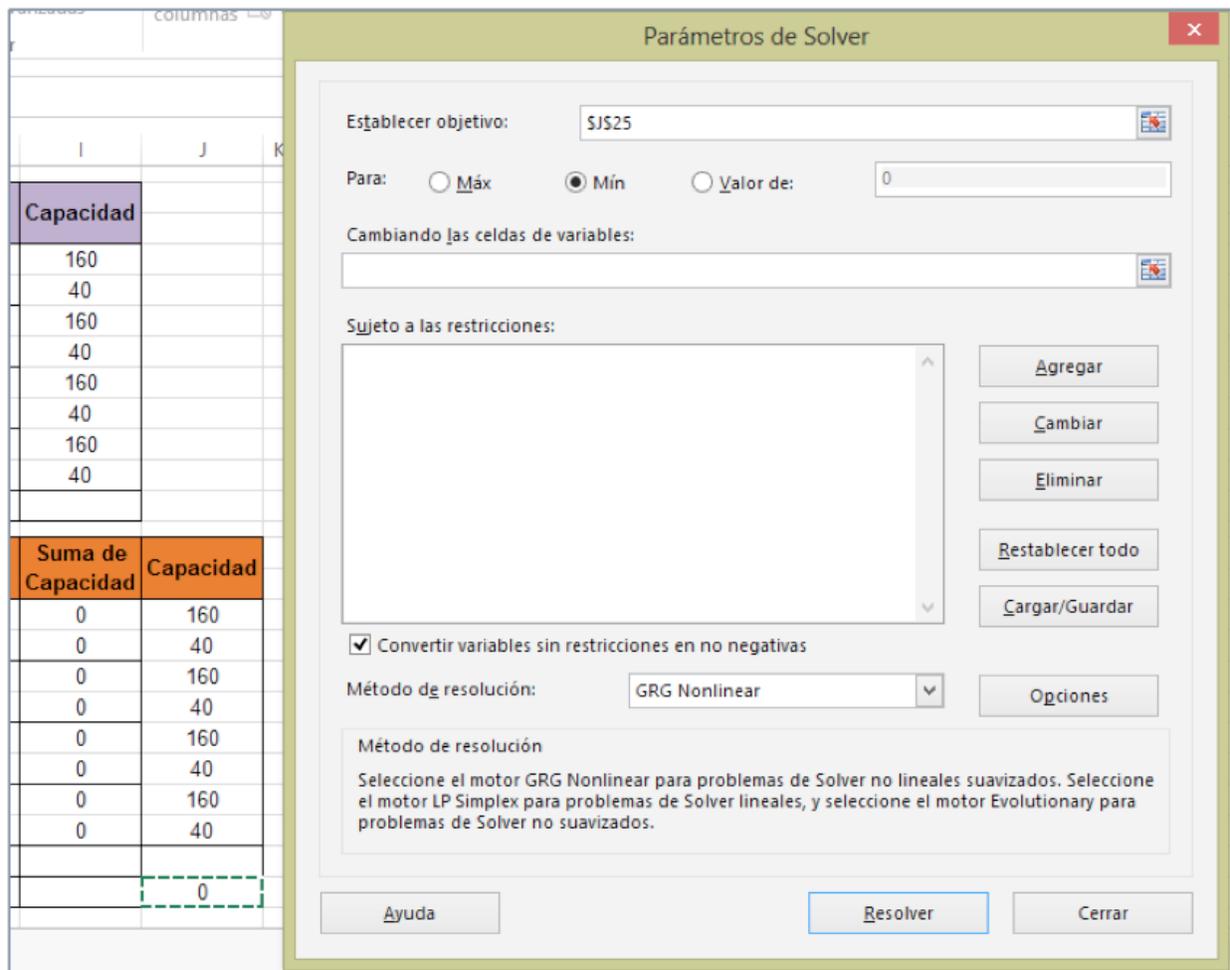


Figura 9. Selección del objetivo del problema  
Fuente: Propia.



Figura 10. Selección de las variables del problema  
Fuente: Propia.

Ahora deben agregarse las restricciones. Para esto haga clic en el botón Agregar, el cual puede observar en la Figura 9. Luego saldrá un cuadro de diálogo que se muestra en la Figura 11. Este tiene 3 campos: en el de la mitad debe aparecer el símbolo  $\leq$ ; en el de la izquierda (llamado Referencia de celda) deberá seleccionar la columna Suma de capacidad, tal como se muestra en la misma figura; en el campo de la derecha (llamado Restricción) deberá seleccionar la columna Capacidad, tal como se muestra en la Figura 12. Finalmente debe hacer clic en el botón Agregar. Esta última acción agregará la restricción introducida y borrará los campos para que pueda agregar otra restricción.

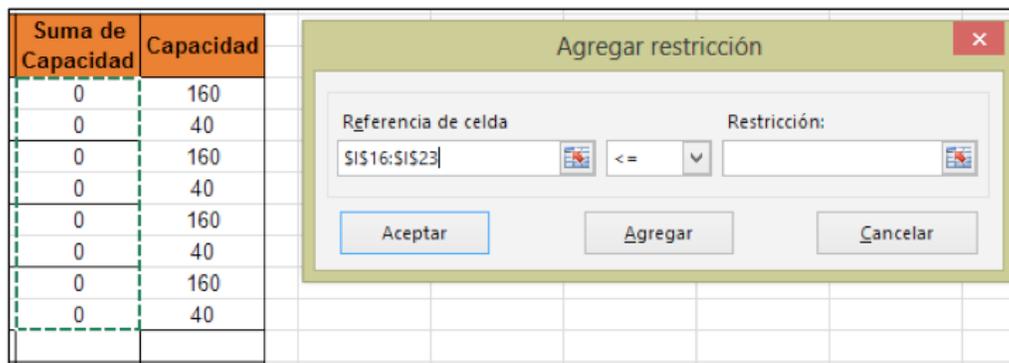


Figura 11. Selección de las restricciones del problema  
Fuente: Propia.

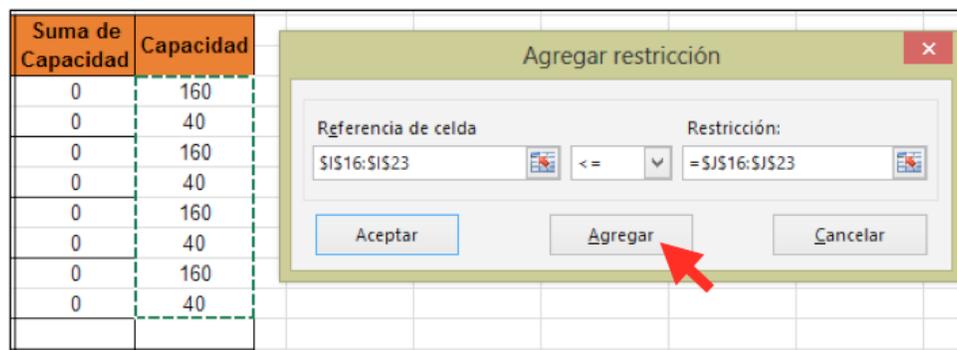


Figura 12. Selección de las restricciones del problema  
Fuente: Propia.

En total son dos restricciones para este ejercicio: una que garantice que las horas utilizadas en producción no sobrepase la cantidad disponible en tiempo regular (160 horas) y en tiempo extra (40 horas), la cual ya se ha introducido y se ha mostrado en las figuras 11 y 12. La otra restricción debe garantizar la satisfacción de la demanda. Para esto, observe las figuras 13 y 14. Ahora en el campo de la mitad debe aparecer el símbolo  $=$ ; en el de la izquierda (Referencia de celda) deberá seleccionar la fila Suma de demanda, tal como se muestra en la Figura 13; en el campo de la derecha (Restricción) deberá seleccionar la fila Demanda agregada, tal como se muestra en la Figura 14. Finalmente debe hacer clic en el botón Aceptar. Esta última acción hará que vuelva al cuadro Parámetros de Solver.

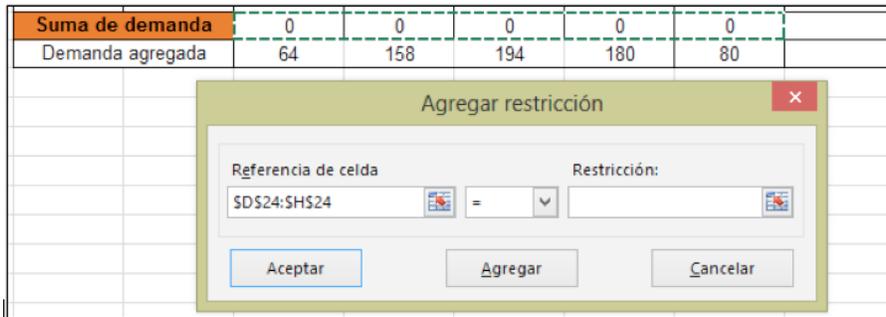


Figura 13. Selección de las restricciones del problema  
Fuente: Propia.

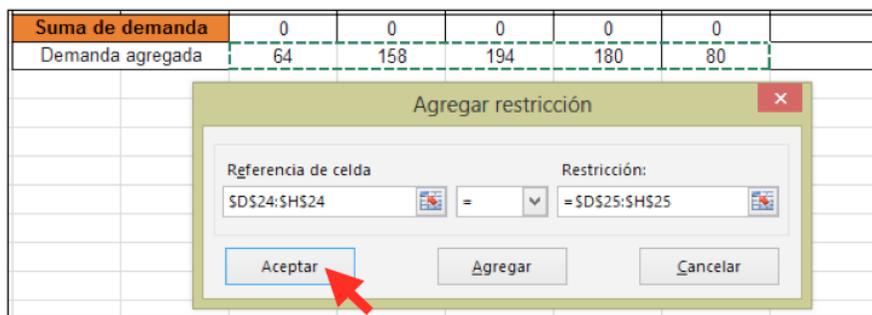


Figura 14. Selección de las restricciones del problema  
Fuente: Propia.

Antes de resolver el problema, el cuadro Parámetros de Solver debe verse como en la Figura 15. Allí se señalan dos aspectos que deben verificarse antes de resolverlo: primero, la opción Convertir variables sin restricciones en no negativas debe estar seleccionada; segundo, en la opción Método de resolución debe seleccionarse Simplex LP. Finalmente, debe hacer clic en el botón Resolver. Si todo se ha hecho correctamente, en el cuadro que sale, llamado Resultados de Solver, debe decir “Solver encontró una solución...” (Ver Figura 16). Allí deberá hacer clic en el botón Aceptar.

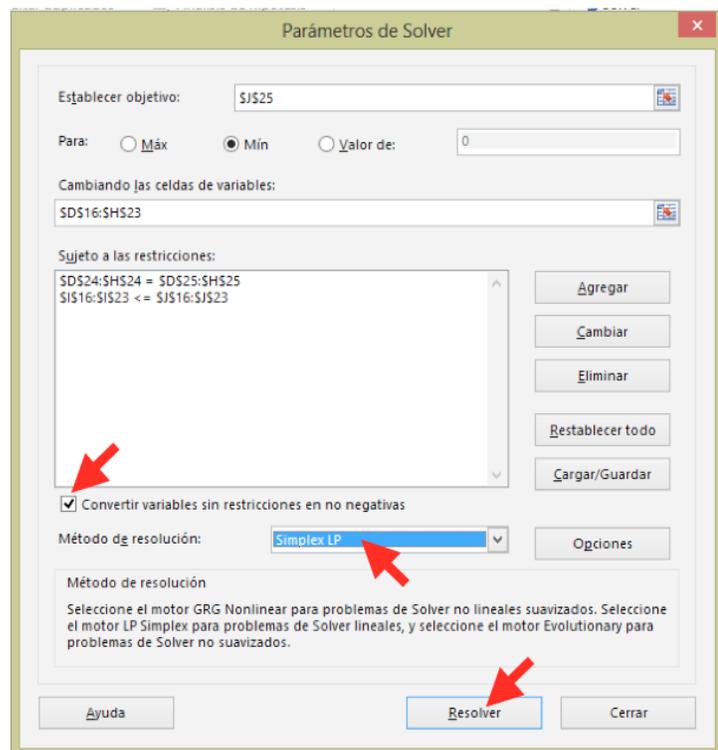


Figura 15. Aspecto final del cuadro antes de resolver el problema  
Fuente: Propia.

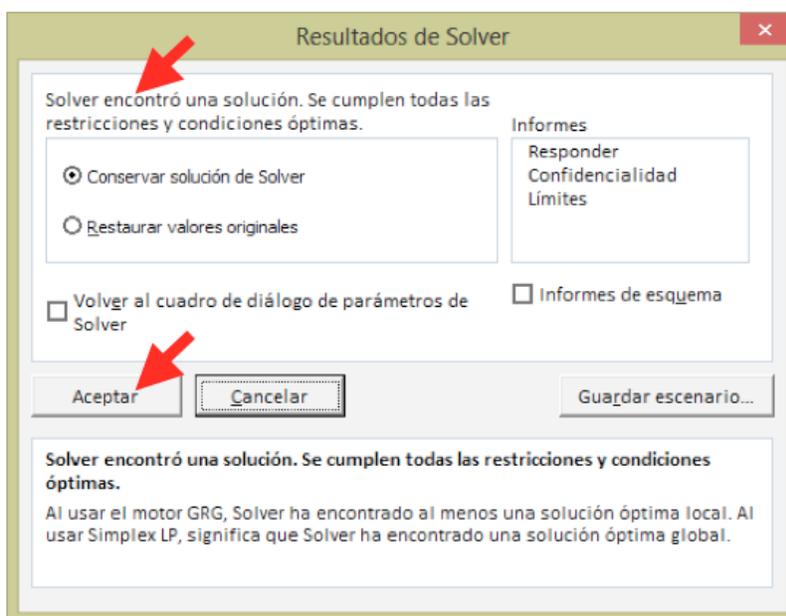


Figura 16. Cuadro de información sobre la solución  
Fuente: Propia.

La solución arrojada por Microsoft Excel se muestra en la Figura 17. En ésta se han resaltado en color verde las respuestas acerca de la forma en que debe ser planeado el sistema productivo para los próximos 4 meses. Esta solución indica que para obtener un costo mínimo de \$8.144, la empresa Salsita Rica en el mes de mayo debe hacer uso de 116 horas de tiempo regular y no programar horas extra. De éstas 116 horas, lo que se produzca en las primeras 64 será para satisfacer la demanda del mes de mayo, lo que se produzca en las siguientes 18 deberá ser almacenado para el consumo de agosto y lo que se produzca en las últimas 34 será para usarlo en el siguiente horizonte de planeación que inicia en septiembre.

Periodo de producción		Periodo de demanda				Inventario final	Suma de Capacidad	Capacidad
		Mayo	Junio	Julio	Agosto			
Mayo	T.Regular	64	0	0	18	34	116	160
	T.Extra	0	0	0	0	0	0	40
Junio	T.Regular	0	158	0	2	0	160	160
	T.Extra	0	0	0	0	0	0	40
Julio	T.Regular	0	0	154	0	6	160	160
	T.Extra	0	0	40	0	0	40	40
Agosto	T.Regular	0	0	0	160	0	160	160
	T.Extra	0	0	0	0	40	40	40
<b>Suma de demanda</b>		64	158	194	180	80		
Demanda agregada		64	158	194	180	80		<b>8144</b>

Figura 17. Solución final del ejercicio  
Fuente: Propia.

Así mismo, en el mes de junio se debe hacer uso de las 160 horas de producción en tiempo regular y ninguna de tiempo extra. De éstas, 158 son para satisfacer la demanda del mismo mes y 2 horas para almacenar lo producido y satisfacer la demanda de agosto. Por otro lado, tanto en julio como en agosto deben ser utilizadas las 160 horas de tiempo regular y deben ser programadas las 40 horas disponibles de tiempo extra. De éstas, lo producido en las últimas 6 horas de tiempo regular en julio será destinado al inventario para el siguiente horizonte de planeación y lo producido en las 40 horas de tiempo extra en agosto será para el mismo fin.

Además de esto, debe resaltarse que la solución de este ejercicio no dejó ningún pedido pendiente, es decir, en ningún momento se ha de incurrir en costos por faltantes. Naturalmente esto es válido para este ejemplo, pues es posible que en otras situaciones sí sea necesario dejar pedidos pendientes.

Debe anotarse en este punto que cuando usted resuelva el ejercicio, la distribución de las horas asignadas puede darle distinta. Esto no representa ningún problema y seguirá siendo una respuesta válida siempre y cuando le arroje exactamente el mismo valor del costo mínimo (\$8.144). Si el costo obtenido fue distinto a este valor, debe revisar nuevamente los pasos llevados a cabo.

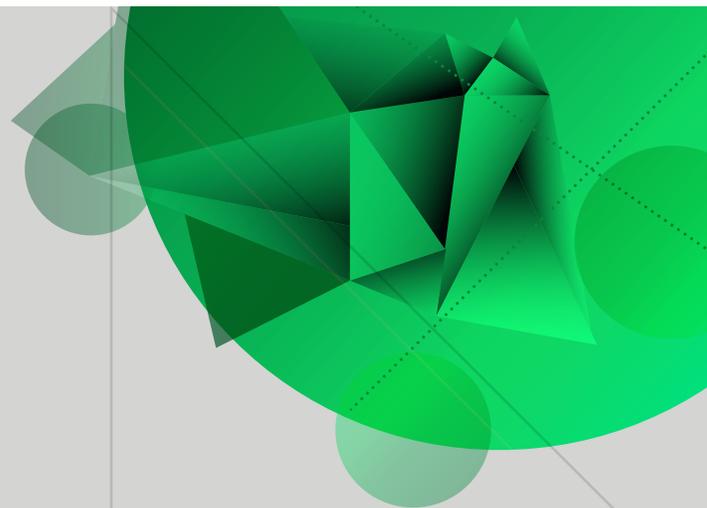
Una vez establecido el plan agregado, el paso a seguir es desagregarlo, es decir, establecer explícitamente las cantidades y la secuencia en que debe ser fabricado cada producto. Para el caso del ejemplo, sería establecer esto en detalle para la salsa de piña y la salsa de ciruela. De esto se encarga el Programa maestro de producción, el cual será estudiado en la cartilla de la siguiente semana.



# 3

## Unidad 3

Programa maestro de  
producción



Administración de operaciones

Autor: Rafael Tordecillas

# Introducción

En la presente unidad, la cual abarca las semanas 4, 5, 6 y 7, se estudiarán las decisiones de tipo táctico que se deben tomar en un sistema productivo. Estas se refieren a decisiones a mediano plazo, con un horizonte de planeación entre 3 y 12 meses, con revisión semanal, mensual o trimestral. Tales decisiones incluyen: planeación agregada de operaciones, programación maestra y planeación de los requerimientos de materiales.

A continuación se estudiará el programa maestro de producción, el cual desagrega el plan agregado y establece el detalle de lo que se debe fabricar de cada producto y en qué secuencia. Para esto se tomará como principal criterio de decisión la minimización de los costos de set-up, es decir, la minimización de la cantidad de cambios que se hagan entre productos fabricados. El procedimiento que se estudiará para esto es netamente empírico y hace uso de sencillos cálculos y gráficos para lograr tal objetivo.

La presente cartilla presenta partes conceptuales y partes con ejemplos numéricos. Para la parte conceptual se recomienda dar una leída rápida a la cartilla y luego leerla nuevamente de forma más pausada, haciendo hincapié en los conceptos que mayor dificultad le generaron. Para la parte numérica se recomienda inicialmente entender bien los parámetros, datos e información que se da en el ejercicio y luego procurar comprender cada uno de los cálculos que se llevan a cabo en la solución del ejercicio. No olvide consultar con su tutor cualquier duda que se le presente.

## Programa maestro de producción

Una pregunta común que puede llegar a hacerse es ¿qué sentido tiene agregar los productos si luego van a desagregarse? Esta pregunta tiene varias respuestas. En primera instancia la razón principal está asociada a los pronósticos de la demanda. Usualmente estos se hacen a través de modelos matemáticos que, dados unos datos históricos, intentan estimar las cantidades de la demanda futura. Naturalmente es muy difícil que la demanda que realmente ocurre sea idéntica a los pronósticos, por lo que deben buscarse formas de minimizar el error. Una de estas formas es precisamente la agregación.

Cuando se hacen pronósticos de cantidades más generales, sin detalles particulares de cada producto, el pronóstico es más acertado. Por ejemplo, será más acertado estimar cuánto arroz venderá todo el país en un año que cuánto arroz venderá una tienda en un día determinado. Esto quiere decir que al agregar la información, el pronóstico será más preciso. Y como un parámetro de entrada fundamental para llevar a cabo la planeación de la producción son los pronósticos de la demanda, mientras más preciso sea este, mejor será el plan agregado, es decir, se espera que tenga menos cambios de última hora.

Esta es la principal razón de planear la producción de manera agregada. No obstante, una segunda razón tiene que ver con la cantidad de cálculos que habría que hacer si los productos no son agregados. Por ejemplo, hacer el análisis mediante tablas como el estudiado en la cartilla de la semana 4 sería prácticamente imposible, pues debe tenerse en cuenta que los recursos son compartidos (instalaciones, maquinaria y mano de obra) y por lo tanto mediante tablas no hay una forma empírica y eficiente de llevar a cabo el plan para cada producto teniendo en cuenta este detalle.

Por otro lado, sin hacer uso de tablas es posible hacer un modelo matemático que minimice el costo total teniendo en cuenta cada producto por separado, pero tal modelo sería bastante más complejo que la aplicación vista en Microsoft Excel en la cartilla de la semana 5. Además, habría que tener en cuenta los tiempos y los costos asociados a la preparación, la cual es necesaria al cambiar de un producto a otro en el proceso de producción.

Es por estos motivos que es mucho más práctico hacer inicialmente el plan agregado y luego realizar un proceso sencillo de desagregación mediante un programa maestro de produc-

ción (conocido también como MPS por sus siglas en inglés: Master Production Schedule). Este tendrá como objetivo determinar en detalle las cantidades a fabricar de cada producto, así como los periodos de tiempo en los que se debe fabricar cada uno de ellos.

Es común que en una empresa el MPS se haga junto con el MRP (Material Requirements Planning: Planeación de los requerimientos de materiales), el cual se estudiará en la próxima sección de la presente unidad. El MRP determinará el detalle de las cantidades y los momentos en que se necesitarán los materiales o componentes de cada producto, lo cual está fuertemente asociado a las decisiones del programa maestro. Respecto a esto, Chase, Jacobs, & Aquilano (2009) comentan lo siguiente:

*Para determinar un programa maestro viablemente aceptable que se ponga en marcha en la planta se ejecutan programas de producción de prueba mediante un programa de MRP. Las expediciones de pedidos (programas de producción detallados) se verifican para asegurarse de que se tienen los recursos y que los tiempos de terminación son razonables. Un programa maestro que parece viable, puede resultar con que requiere demasiados recursos cuando se produce el auge del producto y se determinan las necesidades de materiales, piezas y componentes de niveles inferiores. En este caso (que es el caso general), el programa maestro de producción se modifica según estas limitaciones y el programa MRP vuelve a ejecutarse.*

Como el MRP será estudiado más adelante, a continuación se mostrará un ejemplo del establecimiento de un programa maestro sin tener en cuenta las decisiones asociadas a materiales o componentes. Este programa dividirá el horizonte de planeación en distintos periodos y para cada uno de ellos establecerá las cantidades a fabricar de cada producto. Esto debe hacerse de esta manera en el caso en que los recursos sean compartidos y por tanto los productos no puedan ser fabricados al mismo tiempo.

**Ejemplo 1.** (Basado en Elsayed, & Boucher, 1994) Este ejemplo continuará con el ejemplo mostrado en la cartilla de la semana 5. Recuerde que en ese momento se estableció un plan agregado que minimizará los costos de producción e inventario para una empresa fabricante de salsas, cuya demanda pronosticada, neta y agregada se muestran en la Tabla 1.

Mes	Demanda pronosticada (Unidades)		Demanda Neta (Unidades)		Demanda agregada (horas)
	Salsa de piña	Salsa de ciruela	Salsa de piña	Salsa de ciruela	
Mayo	100	200	64	0	64
Junio	90	190	90	170	90
Julio	110	210	110	210	110
Agosto	100	200	100	200	100

Tabla 1. Datos de demanda para el Ejemplo 1  
Fuente: Propia.

Recuerde que fue necesario calcular una demanda neta debido a que existen unos niveles iniciales de inventario de 36 sobres de salsa de piña y 220 sobres de salsa de ciruela. Además de esto, para este ejemplo fabricar 1 sobre de salsa de piña toma 1 hora y 1 sobre de salsa de ciruela, 0,4 horas.

El objetivo del programa maestro será entonces determinar qué cantidades de cada tipo de salsa deben producirse en cada momento del horizonte de planeación de 4 meses. Para esto, el principal criterio que se debe tener en cuenta es la minimización de los costos de set-up, lo cual se logra minimizando el número de cambios que se hacen entre la producción de una u otra salsa. Esto quiere decir que lo que se debe hacer es iniciar la producción de una de las salsas y fabricarla hasta que termine el inventario de la otra. Una vez esto suceda se inicia la producción de la otra salsa hasta que termine el inventario de la primera, y así sucesivamente se alternará la producción hasta el fin del horizonte de planeación.

Naturalmente el parámetro de entrada fundamental para establecer el programa maestro es el plan agregado. En la Tabla 2 se resumen las horas de producción que deben ser programadas para minimizar los costos totales, de acuerdo a lo arrojado como respuesta en el ejemplo de la cartilla de la semana 5.

Mes	Tiempo regular	Tiempo extra	Horas totales a programar
Mayo	116	0	116
Junio	160	0	160
Julio	160	40	200
Agosto	160	40	200

Tabla 2. Horas de producción a programar de acuerdo al plan agregado  
Fuente: Propia.

Ahora debe decidirse si será la salsa de piña o la salsa de ciruela la que se producirá inicialmente. El criterio en este caso es sencillo, pues basta mirar qué inventario inicial se acaba primero. Como al inicio se cuenta con 36 sobres de salsa de piña y 220 sobres de salsa de ciruela, es obvio que la salsa de piña se terminaría en primera instancia. Esto indica que se empezará produciendo la salsa de piña hasta que el inventario de la salsa de ciruela termine.

Para el análisis que se hará, debe calcularse para cada mes y para cada producto la tasa de producción y la tasa de demanda. Las tasas de producción ya están establecidas desde el inicio del ejercicio y son: para la salsa de piña, 1 sobre/hora; para la salsa de ciruela,  $1/0,4 = 2,5$  sobres/hora. Respecto a la tasa de demanda, esta será un promedio que se calculará de acuerdo a la cantidad de horas a programar en cada mes. Por ejemplo, para la salsa de piña se tiene una demanda pronosticada de 110 sobres en julio y para este mismo mes se tienen programadas 200 horas de producción. Esto quiere decir que la demanda promedio para este mes será de  $110/200 = 0,55$  sobres/hora. En la Tabla 3 se resumen estas tasas.

Mes	Tasa de producción (Sobres/hora)		Tasa de demanda (Sobres/hora)	
	Salsa de piña	Salsa de ciruela	Salsa de piña	Salsa de ciruela
Mayo	1,0	2,5	0,8621	1,7241
Junio	1,0	2,5	0,5625	1,1875
Julio	1,0	2,5	0,55	1,05
Agosto	1,0	2,5	0,50	1,00

Tabla 3. Tasas de producción y de demanda  
Fuente: Propia.

Ya habiendo establecido que la salsa de ciruela no se producirá inicialmente, la primera pregunta que debe responderse es: ¿en qué momento se termina el inventario de este producto? Dado esto, ¿en qué nivel queda el inventario de la salsa de piña en ese momento? A continuación se hará una serie de cálculos para todo el horizonte de planeación, cuyos resultados se muestran por adelantado en la Figura 1. Esto se hace con el fin de comprender un poco mejor los cálculos que se harán.

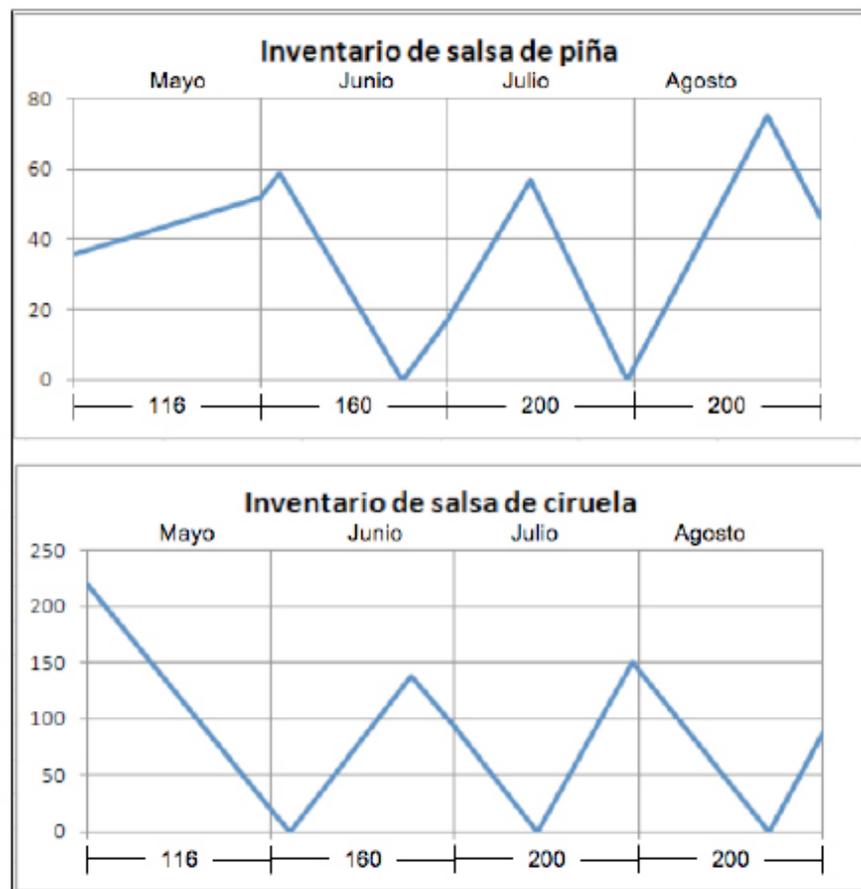


Figura 1. Niveles de inventario arrojados por el MPS  
Fuente: Propia.

El inventario inicial de la salsa de ciruela es de 220 sobres y su demanda en mayo es de 200, por tanto quedan 20 sobres al inicio de junio, que se terminan en:

$$\frac{20}{1,1875} = 16,84 \text{ horas}$$

1,1875 es la tasa de demanda de la salsa de ciruela en junio y la división arroja 16,84 horas, lo que indica que cuando ha transcurrido ese tiempo en la producción del mes de junio termina el inventario de la salsa de ciruela. La cantidad de inventario de la salsa de piña al final de este tiempo es:

$$36 + [116 * (1,0 - 0,8621)] + [16,84 * (1,0 - 0,5625)] = 59 \text{ sobres}$$

En donde 36 es el inventario inicial de salsa de piña, 116 es la cantidad de horas de producción en mayo, la resta  $(1,0 - 0,8621)$  indica la tasa a la que crece el inventario, restando la tasa de demanda a la tasa de producción, y la resta  $(1,0 - 0,5625)$  indica la tasa a la que crece el inventario en junio.

Como ya ha terminado el inventario de salsa de ciruela, es momento de iniciar la producción de este tipo de salsa y consumir lo que hay de inventario de salsa de piña. La pregunta es entonces, ¿en qué momento se termina este inventario? El cálculo es:

$$\frac{59}{0,5625} = 104,89 \text{ horas}$$

En donde 0,5625 es la tasa de demanda de la salsa de piña en junio. Es decir, en 104,89 horas del mes de junio se acabará el inventario de la salsa de piña. ¿En qué nivel queda el inventario de la salsa de ciruela en este tiempo? El cálculo es:

$$[104,89 * (2,5 - 1,1875)] = 138 \text{ sobres}$$

En donde  $(2,5 - 1,1875)$  es la tasa a la que crece el inventario de salsa de ciruela. El tiempo que falta para el fin del mes de junio es de  $(160 - 104,89 - 16,84) = 38,27$  horas. En este tiempo el inventario de salsa de ciruela cae a:

$$[138 - (38,27 * 1,1875)] = 93 \text{ sobres}$$

Estos sobres se agotan en un tiempo de:

$$\frac{93}{1,05} = 88,57 \text{ horas}$$

En donde 1,05 es la tasa de demanda de salsa de ciruela en julio. El nivel del inventario de la salsa de piña en este tiempo (38,27 horas de junio y 88,57 horas de julio) sube hasta:

$$[38,27 * (1,0 - 0,5625)] + [88,57 * (1,0 - 0,55)] = 57 \text{ sobres}$$

En donde (1,0 - 0,5625) es la tasa a la que crece el inventario de salsa de piña en junio y (1,0 - 0,55) es la tasa a la que crece el mismo en julio. El tiempo que transcurrirá hasta que termine este inventario es:

$$\frac{57}{0,55} = 103,64 \text{ horas}$$

En donde 0,55 es la tasa de demanda de salsa de piña en julio. En este tiempo el inventario de salsa de ciruela sube hasta:

$$[103,64 * (2,5 - 1,05)] = 150 \text{ sobres}$$

En donde (2,5 - 1,05) es la tasa a la que crece el inventario de salsa de ciruela en julio. El tiempo que falta para el fin del mes de julio es de (200 - 88,57 - 103,64) = 7,79 horas. En este tiempo el inventario de salsa de ciruela cae a:

$$[150 - (7,79 * 1,05)] = 142 \text{ sobres}$$

Estos sobres se agotan en un tiempo de:

$$\frac{142}{1,00} = 142,00 \text{ horas}$$

En donde 1,00 es la tasa de demanda de salsa de ciruela en agosto. El nivel del inventario de la salsa de piña en este tiempo (7,79 horas de julio y 142,00 horas de agosto) sube hasta:

$$[7,79 * (1,0 - 0,55)] + [142,00 * (1,0 - 0,50)] = 75 \text{ sobres}$$

En donde (1,0 - 0,55) es la tasa a la que crece el inventario de salsa de piña en julio y (1,0 - 0,50) es la tasa a la que crece el mismo en agosto. La cantidad de tiempo que falta para el fin del mes de agosto y por tanto del horizonte de planeación es de (200 - 142) = 58 horas. En este tiempo el inventario de salsa de piña cae hasta:

$$[75 - (58,00 * 0,50)] = 46 \text{ sobres}$$

En donde 0,50 es la tasa de demanda de salsa de piña en agosto. Finalmente, en las 58 horas restantes el inventario de salsa de ciruela sube hasta:

$$[58,00 * (2,5 - 1,0)] = 87 \text{ sobres}$$

En donde (2,5 - 1,0) es la tasa a la que crece el inventario de salsa de ciruela en agosto. Finalmente quedará entonces un inventario de 46 sobres de salsa de piña y 87 sobres de salsa de ciruela. En teoría estas cantidades quedarán como inventario inicial para el siguiente horizonte de planeación que iniciará en el mes de septiembre, pero esto es solo en teoría, pues el inventario inicial de ese periodo será el que realmente quedé luego de haber transcurrido el cuatrimestre mayo-agosto. Dado esto, lo verdaderamente importante de planear que quede tal inventario es que se aproveche la capacidad con la que se cuenta en este cuatrimestre para amortiguar una posible e inesperada variación al alza de la demanda.

De hecho, si revisa el ejemplo desarrollado en la cartilla de la semana 5 en la que se estableció el plan agregado para esta empresa, se estableció como requisito que al final del horizonte de planeación quedaran 80 horas de inventario. Si la cantidad de sobres arrojados como inventario se transforma en horas, quedan 80,8 horas, que es un poco más de lo requerido. El cálculo detallado es:

$$\text{Inventario final} = \left( 1 \frac{\text{hora}}{\text{sobre piña}} \right) * (46 \text{ sobres}) + \left( 0,4 \frac{\text{hora}}{\text{sobre ciruela}} \right) * (87 \text{ sobres}) = 80,8 \text{ horas}$$

La cantidad de cambios entre un producto y otro fue de 5 en un periodo de 4 meses, lo cual se hace evidente al observar la Figura 1, ya sea el gráfico del inventario de salsa de piña o el de salsa de ciruela. Allí debe contabilizarse la cantidad de veces que la línea cambia de sentido, es decir, la cantidad de veces que cambia de subir a bajar y viceversa. Recuerde que el objetivo del ejercicio es precisamente minimizar los costos de set-up, lo cual se logra minimizando el número de cambios que se hacen entre la producción de una u otra salsa. Es por este motivo que no es necesario contar explícitamente con el costo de set-up, pues bastaba con alternar la producción de la forma en que se hizo.

Con esta forma de programar la producción ya se tiene claro cómo deben secuenciarse los dos productos a lo largo del horizonte de planeación. El otro aspecto importante del programa maestro será establecer las horas que se dedicarán a cada producto en cada mes y en cada secuencia, así como el número de unidades o sobres que serán fabricados. Con los cálculos hechos ya se cuenta con esta información, no obstante, debe resumirse adecuadamente para que cualquier persona en la empresa pueda comprender el programa. En la Figura 2 se muestran las horas de dedicación a cada una de las salsas y en la Figura 3 las unidades a fabricar. En ambas figuras, el color amarillo indica la salsa de piña y el color violeta, la salsa de ciruela.

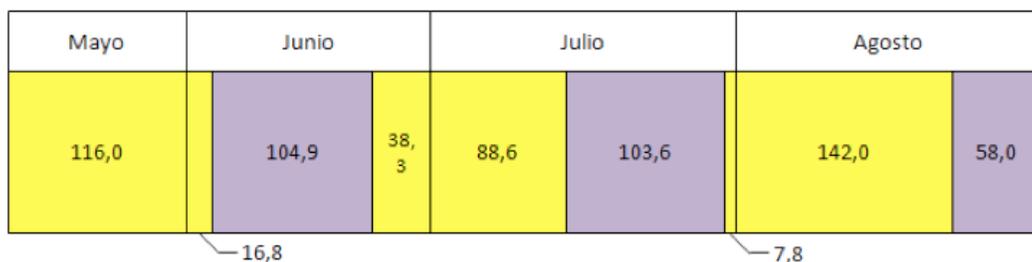


Figura 2. Horas de dedicación en cada mes para cada salsa  
Fuente: Propia.

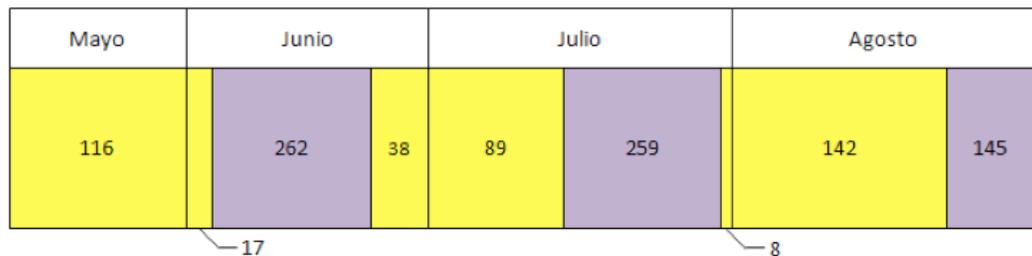


Figura 3. Sobres producidos de cada salsa en cada mes  
Fuente: Propia.

Las unidades a producir se calculan con los datos de la tasa de producción. De esta manera, como de salsa de piña se puede producir 1 sobre/hora, basta dividir las horas de producción entre este valor. Por otro lado, como de salsa de ciruela se puede producir 1 sobre en 0,4 horas, el cálculo se hace de la misma manera. Por ejemplo para el mes de junio se tiene:

$$\frac{104,9 \text{ horas}}{0,4 \text{ hora/sobre}} = 262 \text{ sobres}$$

La Figura 3 indica entonces que el programa maestro es:

- Iniciar con la producción de 133 sobres de salsa de piña. Esto se llevará todo el mes de mayo y 17 horas de producción del mes de junio.
- Realizar cambio de producto y fabricar 262 sobres de salsa de ciruela.
- Realizar cambio de producto y fabricar 127 sobres de salsa de piña. Esto se hará en las últimas 38 horas de producción de junio y en las primeras 89 de julio.
- Realizar cambio de producto y fabricar 259 sobres de salsa de ciruela.
- Realizar cambio de producto y fabricar 150 sobres de salsa de piña. Esto se hará en las últimas 8 horas de producción de julio y en las primeras 142 de agosto.
- Realizar cambio de producto y fabricar 145 sobres de salsa de ciruela. Aquí termina el horizonte de planeación.

Finalmente, en la Tabla 4 se muestra el resumen de las horas que se dedicarán a cada producto en cada mes, así como el número de unidades o sobres que serán fabricados.

Como colofón para el tema de la programación maestra de producción, debe decirse que el procedimiento estudiado es muy útil si la cantidad de productos a programar es de dos. Sin embargo, si se trata de tres o más productos, este procedimiento se vuelve dispendioso y muy poco práctico al ser empírico y casi manual. Para este tipo de situaciones en las que el número de productos es más de dos, puede hacerse uso de un modelo matemático que, con el mismo criterio que se tuvo, minimice el número de cambios que se hagan entre productos a fabricar<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Para más información al respecto puede consultar Elsayed, E.A., & Boucher, T.O. (1994). *Analysis and control of production systems* (2ª ed.). New Jersey, Prentice Hall

Mes	Horas de producción		Unidades a producir (Sobres)	
	Salsa de piña	Salsa de ciruela	Salsa de piña	Salsa de ciruela
Mayo	116,00	0,00	116	0
Junio	55,11	104,89	55	262
Julio	96,36	103,64	96	259
Agosto	142,00	58,00	142	145

Tabla 4. Horas de producción y unidades producidas de cada salsa en cada mes  
Fuente: Propia.

## Actividades auto-evaluativas

Retome el ejemplo mostrado en la cartilla de la semana 5 y en la de la presente semana y suponga que la empresa Salsita Rica ya no realiza la planeación de manera cuatrimestral sino semestral. Para esto, suponga los siguientes datos de demanda:

Mes	Demanda (Unidades)	
	Salsa de piña	Salsa de ciruela
Julio	100	200
Agosto	90	190
Septiembre	110	210
Octubre	100	200
Noviembre	120	180
Diciembre	100	200

Suponga que los demás datos son exactamente los mismos. Realice el plan agregado mediante el método de transporte estudiado en Microsoft Excel y luego establezca un programa maestro que minimice el número de cambios (costos de set-up) entre los productos.

4

## Unidad 4

Planeación de los  
requerimientos de  
materiales



Administración de operaciones

Autor: Rafael Tordecillas

# Introducción

En la presente unidad, relacionada con las semanas 4, 5, 6 y 7, se estudiarán las decisiones de tipo táctico que se deben tomar en un sistema productivo. Estas se refieren a decisiones a mediano plazo, con un horizonte de planeación entre 3 y 12 meses, con revisión semanal, mensual o trimestral. Tales decisiones incluyen: planeación agregada de operaciones, programación maestra y planeación de los requerimientos de materiales.

Veremos los requerimientos de materiales o como son más conocido en la literatura, MRP, por sus siglas en inglés (Material Requirements Planning). Este plan establece en detalle cuánto y cuándo solicitar las partes o materiales específicos de los que se componen los productos que serán fabricados. Como es posible que estas partes estén a su vez compuestas por sub-partes o elementos, el MRP también establece el detalle de cuándo deben ser pedidos y en qué cantidad. Para esto lleva a cabo una serie de cálculos que tienen en cuenta variables como el lead time (que en este caso se refiere al tiempo que transcurre desde que se hace el pedido hasta que llega a la planta), los requerimientos brutos de los productos, cantidades iniciales y finales de inventarios o recibos programados de materiales.

La presente cartilla presenta partes conceptuales y partes con ejemplos numéricos. Para la parte conceptual se recomienda dar una leída rápida a la cartilla y luego leerla nuevamente de forma más pausada, haciendo hincapié en los conceptos que mayor dificultad le generaron. Para la parte numérica se recomienda inicialmente entender bien los parámetros, datos e información que se da en el ejercicio y luego procurar comprender cada uno de los cálculos que se llevan a cabo en la solución del ejercicio. No olvide consultar con su tutor cualquier duda que se le presente.

## Planeación de los requerimientos de materiales

Una vez se ha determinado el programa maestro de producción, el cual establece el detalle de las cantidades a fabricar de cada producto y el momento en que tales cantidades deben ser fabricadas, es momento de determinar la forma en la que deben ser pedidos los materiales o partes de los que están compuestos tales productos. Específicamente hablando, debe determinarse la cantidad a pedir de estos materiales y el momento en que deben ser pedidos para que el proceso productivo se lleve a cabo sin retrasos.

Estas acciones conforman el llamado Plan de requerimiento de materiales o MRP (Material Requirements Planning), el cual tiene como objetivo que los materiales, partes o componentes necesarios para la fabricación de los productos estén disponibles en el momento correcto en que son necesarios y en la cantidad correcta. Este objetivo aplica tanto si dichos materiales son manufacturados por la misma compañía, como si son adquiridos.

En su relación con el programa maestro y el plan agregado, ya se ha mencionado que la elaboración del MRP depende de la elaboración previa de estos dos, pero un aspecto fundamental que lo diferencia de estos es el tipo de demanda que maneja, pues mientras en el plan agregado y en el programa maestro la demanda es independiente, en el MRP es dependiente.

Recuerde que un insumo fundamental para el programa maestro y el plan agregado son los pronósticos de la demanda. Tales pronósticos son requeridos debido a que la demanda de los productos es algo externo a la compañía, es decir, no se puede saber con exactitud la cantidad que se va a vender cada mes o cada año. Esto indica que la demanda es independiente.

Sin embargo, la demanda de los materiales, la cual es calculada por el MRP, es dependiente debido a que dependerá de las cantidades requeridas de los productos a fabricar. Por ejemplo, si para un producto A se ha establecido por el programa maestro un requerimiento de 50 unidades para cierta semana y además cada unidad de ese producto está compuesta por 5 partes B, entonces el total de unidades requeridas de ese material para esa semana es de 250. Note entonces que la demanda de las partes B depende de la cantidad de unidades requeridas del producto A.

Para que un MRP pueda realizarse correctamente requiere de una serie de insumos, es decir, requiere de información que debe tenerse disponible antes de llevar a cabo los cálculos asociados al MRP. Tales insumos son:

1. El programa maestro de producción, el cual establece las cantidades exactas a fabricar de cada producto y el momento en que serán fabricadas, tal como se estudió en la cartilla de la semana anterior.
2. El listado de materiales, el cual ofrece el detalle de las cantidades que se requieren por unidad de producto. Tal listado debe ser detallado, es decir, no solo debe especificar las cantidades de cada parte que compone el producto, sino de las subpartes de las que se compone cada parte y así sucesivamente. Esto permite establecer una estructura por niveles en la que a los niveles superiores se les suele llamar padres y a los niveles inferiores, hijos. En la Figura 1 se muestra un ejemplo de un listado de materiales en forma de estructura por niveles.

Allí se observan varios bloques que representan partes y subpartes. En cada bloque hay un número entre paréntesis, el cual indica las cantidades necesarias de cada hijo por cada padre. Así es como una unidad del producto "La Maravilla" incluye en el paquete 2 equipos de altavoces (componente B) y 3 equipos de altavoces con amplificador (componente C). A su vez, una unidad del componente B está compuesto de 2 altavoces (parte D) y 2 cajas y equipos de instalación (parte E). Por otro lado, una unidad del componente C está compuesto de 2 cajas y equipos de instalación (parte E) y dos altavoces con amplificador (parte F), el cual a su vez está compuesto por 1 amplificador (parte G) y 2 altavoces (parte D).

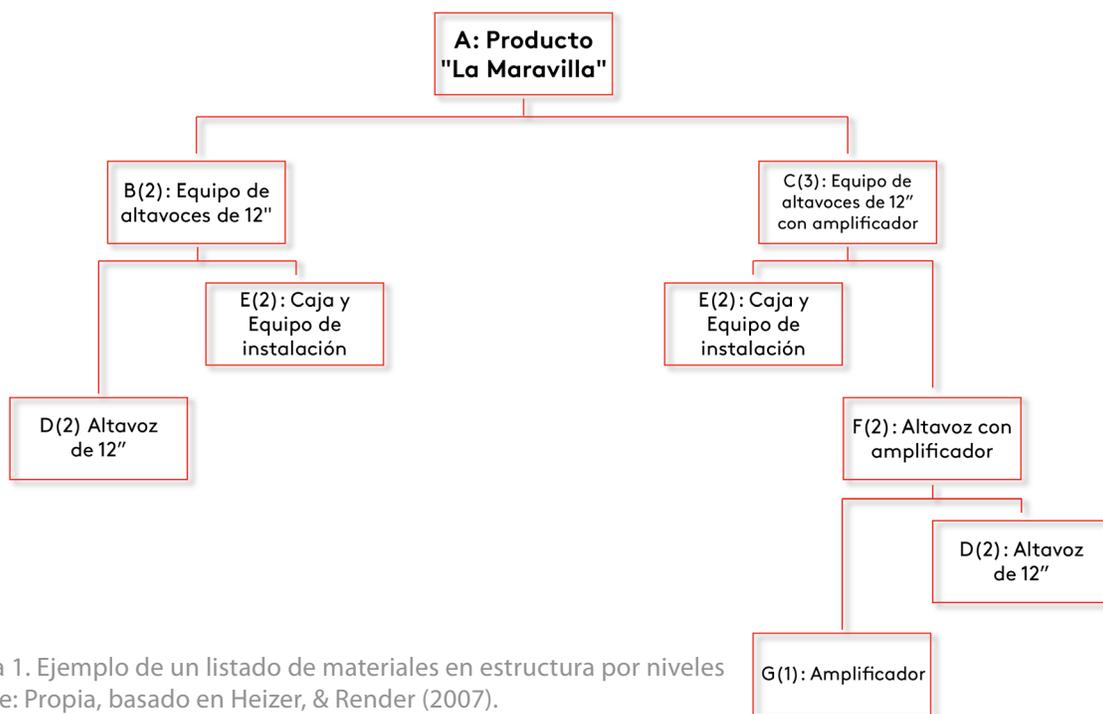


Figura 1. Ejemplo de un listado de materiales en estructura por niveles  
Fuente: Propia, basado en Heizer, & Render (2007).

Con este listado de materiales ya es posible calcular las cantidades necesarias de cada parte y subparte. Para esto basta saber la demanda independiente del producto “La Maravilla”, la cual se puede obtener del requerimiento establecido por el programa maestro. Por ejemplo, suponga que para el próximo mes esta demanda es de 45 unidades. ¿Cuántas unidades se requieren de cada parte? Para realizar tal cálculo basta con hacer una serie de multiplicaciones, como se muestra en la Tabla 1.

Parte	Requerimiento		
A			45
B	2*Cantidad de A =	(2*45)=	90
C	3*Cantidad de A =	(3*45)=	135
D	(2*Cantidad de B) + (2*Cantidad de F) =	(2*90) + (2*270)=	720
E	(2*Cantidad de B) + (2*Cantidad de C) =	(2*90) + (2*135)=	450
F	2*Cantidad de C =	(2*135)=	270
G	1*Cantidad de F =	(1*270)=	270

Tabla 1. Cálculo de las unidades requeridas de cada parte  
Fuente: Propia.

Note que para las partes D y E es necesario realizar una suma además de la multiplicación obligatoria. Esto es debido a que estas partes tienen dos padres. Por ejemplo, la parte D debe ser incluida en los componentes B y F, y la parte E debe ser incluida en los componentes B y C. Dado esto, debe entonces tenerse en cuenta la demanda de ambos componentes padres, tal como se observa en los cálculos de la Tabla 1.

3. La disponibilidad de inventario, la cual se refiere a la cantidad de cada componente, parte o subparte que se tiene en almacén y que está disponible para ser utilizada en cualquier momento. Para que el inventario pueda ser realmente útil para el MRP, es necesario que se lleve un control preciso de tales cantidades en almacén, llevando a cabo una buena gestión del inventario.
4. Las órdenes de compra pendientes, las cuales se refieren a órdenes de compra de materiales que fueron hechas en un horizonte de planeación previo al actual y que aún no han llegado a la empresa, ya sea por su natural lead time o porque se presentó algún retraso inesperado. Para que las órdenes de compra pendientes puedan ser realmente útiles para el MRP, es necesario conocer con certeza qué pedidos de los que ha realizado la empresa se tienen pendientes, así como tener registros específicos de las cantidades pendientes y de los plazos de entrega programados.
5. Los plazos de entrega de cada componente, los cuales se refieren al lead time de cada material. Específicamente hablando, el lead time es el tiempo que transcurre desde que se ordena el pedido hasta que llega a la empresa listo para ser incluido en el proceso de fabricación del padre. El lead time puede entenderse tanto si el componente es manu-

facturado en la misma empresa como si es pedido a un proveedor externo. En el primer caso, el lead time se refiere al tiempo necesario para preparar, procesar y, si es el caso, transportar cada componente. En el segundo caso, se refiere al tiempo que le toma al proveedor tener listo el componente y entregarlo al comprador.

Por ejemplo, considere nuevamente el ejemplo del producto “La Maravilla”. Suponga que los plazos de entrega de cada componente son los mostrados en la Tabla 2. Dados estos datos es posible construir una estructura de producto desplazada en el tiempo que muestre específicamente el momento en que se necesitaría cada componente, parte o subparte. Un ejemplo de esto se muestra en la Figura 2.

Componente	A	B	C	D	E	F	G
Plazo de entrega (semanas)	1	2	1	1	2	3	2

Tabla 2. Plazos de entrega para el producto “La Maravilla”

Fuente: Propia.

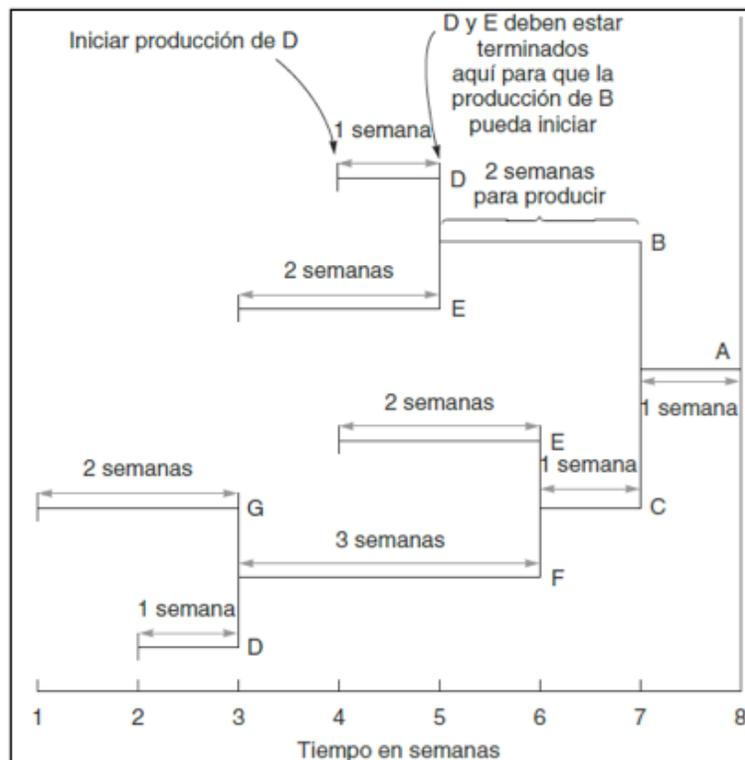


Figura 2. Ejemplo de estructura de producto desplazada en el tiempo

Fuente: Heizer, & Render (2007).

En la Figura 2 se observa que se ha tomado el diagrama de la Figura 1 y se ha adaptado a un gráfico en función de la variable “tiempo”. Note entonces allí que, por ejemplo, si la producción de la parte G se inicia al inicio de la semana 1 y la de la parte D al inicio de la semana 2, la producción de la parte F iniciaría al inicio de la semana 3, finalizando al empezar la semana 6. Si todos estos tiempos son cumplidos, el producto A estaría finalizado al iniciar la semana 8.

Una vez se cuente con todos los insumos expuestos en los numerales del 1 al 5, es posible llevar a cabo el MRP. Es importante resaltar que cada uno de estos insumos brinda información muy importante, pero si se toma cada uno por separado no se puede obtener un plan integrado que realmente sea útil para el sistema productivo. Es por esto que el MRP agrupa toda esta información y mediante una serie de sencillos cálculos establece en detalle cuánto y cuándo solicitar los componentes, partes y subpartes específicos de los que se componen los productos que serán fabricados.

Por ejemplo, note que si se cuenta con unidades en inventario o se tienen órdenes de compra pendientes, las cantidades a pedir serán menores a los requerimientos calculados en bruto en el ejemplo de la Tabla 1. Además, como se cuenta con la información del lead time de las órdenes pendientes, es posible entonces determinar el momento en que se requerirán tales cantidades menores.

Para realizar entonces los cálculos asociados a MRP es muy común elaborar tablas en función del tiempo que contengan todos estos insumos expuestos previamente. De esta forma se facilitan los cálculos y las cifras obtenidas son más sencillas de interpretar para así tomar un curso de acción que beneficie de la mejor manera a la empresa, tal como se mostrará en el ejemplo 1.

**Ejemplo 1.** Un producto Z se compone de 2 partes de A y 4 de B. A su vez, el producto A se compone de 3 partes de C y 4 de D. Los tiempos de demora para la compra o fabricación son: Z tarda dos semanas; A, B y C tardan una semana y D tarda dos semanas. Las necesidades brutas de Z para las próximas 8 semanas son: 50, 60, 70, 60, 95, 75, 60 y 55 unidades. El inventario disponible inicial para cada subparte es: Z, 120 unidades; A, 150 unidades; B, 255 unidades; C, 380 unidades; y D, 1300 unidades. Para este horizonte de planeación hay 2 recibos programados: uno para la parte C de 150 unidades que llegarán en la semana 2, y otro para la parte D de 200 unidades que llegarán en la semana 4. Establezca un plan de requerimiento de materiales para todas las partes.

Antes de hacer los cálculos es muy útil elaborar un listado de materiales en estructura por niveles, similar al observado en la Figura 1. El diagrama para este ejemplo se muestra en la Figura 3, al cual se ha agregado en cada arco la información referente al número de partes hijas de las cuales se compone cada padre, y en cada nodo, los plazos de entrega. Se recomienda elaborar siempre este diagrama para cualquier ejercicio de MRP, debido a que permite entender la situación con un solo vistazo.

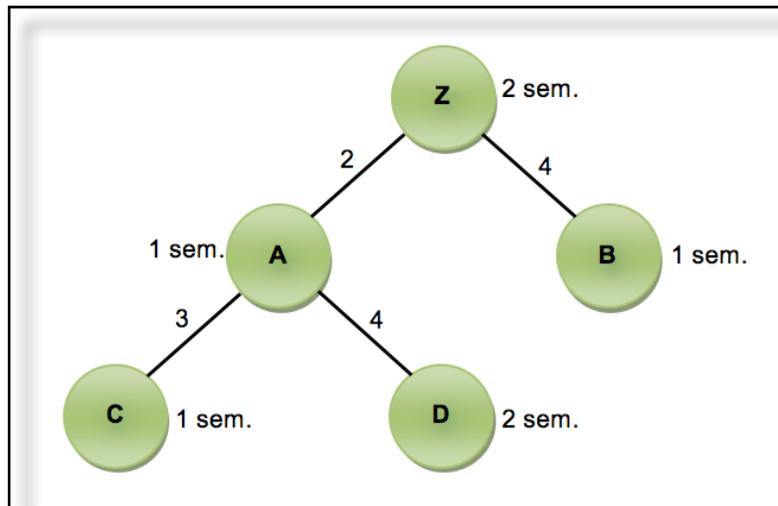


Figura 3. Listado de materiales en estructura por niveles para el ejemplo 1  
Fuente: Propia.

La idea de los cálculos asociados a MRP es entonces resumir tales cálculos en varias tablas, de las cuales corresponderá una a cada componente, parte o subparte. Tales tablas deben ser calculadas en estricto orden desde los padres hasta los hijos. Así pues, para el caso del ejemplo se iniciará con Z, el cual es el producto a fabricar y del cual se cuenta con los datos de demanda independiente. Por facilidad en la comprensión, en la Tabla 3 se muestra el MRP ya completamente calculado y a continuación se explican los ítems de dicha tabla.

Z	0	1	2	3	4	5	6	7	8
RB		50	60	70	60	95	75	60	55
OP		0	0	0	0	0	0	0	0
ID	120	70	10	0	0	0	0	0	0
RN		0	0	60	60	95	75	60	55
PRO		0	0	60	60	95	75	60	55
PCO		60	60	95	75	60	55		

Tabla 3. MRP para el producto Z  
Fuente: Propia.

- **Requerimiento bruto (RB):** es la cantidad que debe satisfacerse de Z para las próximas 8 semanas. Para el caso del producto a fabricar es igual a su demanda independiente. Note entonces que en la Tabla 3 tal ítem coincide con los datos de demanda dados en el enunciado del ejercicio.
- **Órdenes pendientes (OP):** son las órdenes de compra pendientes explicadas previamente. Para el caso del ejemplo son iguales a cero pues no hay pendientes para Z.

- **Inventario disponible (ID):** es la cantidad de inventario que queda disponible para ser usado en el periodo siguiente. Para este ítem debe agregarse un periodo “cero” que indica las unidades de inventario que están almacenadas antes del inicio del actual horizonte de planeación, es decir, son cantidades que quedaron del horizonte de planeación anterior. Para el caso del ejemplo esta cantidad es de 120 unidades, tal como se establece en el enunciado del ejercicio. Para el cálculo del ID para el resto de meses basta tomar el inventario del periodo anterior, sumarle las órdenes pendientes y restarle los requerimientos brutos. Esta operación dará como resultado la cantidad que queda al final del presente periodo. Por ejemplo, para el inventario de la semana 1 se tiene:

$$ID = 120 + 0 - 50 = 70$$

Note que es importante sumar las órdenes pendientes porque estas representan una entrada al almacén y por tanto hacen que aumente el inventario. Un cálculo similar se hace para la semana 2, pero para las semanas 3 a 8 ya no queda inventario disponible dado que los requerimientos brutos sobrepasan el inventario disponible de la semana anterior. Como para tales semanas ya no queda inventario disponible ni hay órdenes pendientes, los requerimientos brutos deben ser satisfechos con unidades que deben ser pedidas.

- **Requerimiento neto (RN):** es la cantidad que requiere ser pedida para el periodo, después de haberle descontado al requerimiento bruto las órdenes pendientes y el inventario disponible del periodo anterior. Es necesario calcular el RN debido a que las cantidades brutas requeridas pueden ser satisfechas con inventario o con órdenes que llegan y lo que esto no alcance a cubrir debe ser pedido. Para el caso del ejemplo no hay requerimientos netos en las semanas 1 y 2 debido a que los requerimientos brutos son satisfechos con cantidades en inventario. Para la semana 3 el RN es de 60 dado que de las 70 unidades de RB, 10 son satisfechas son el ID de la semana anterior. Para el resto de las semanas el RN es igual al RB dado que ya no queda inventario disponible ni hay órdenes pendientes.
- **Plan de recibir órdenes (PRO):** en muchas ocasiones las cantidades que pueden ser pedidas no coinciden exactamente con los requerimientos netos. Por ejemplo, puede suceder que el proveedor no haga entregas sino en lotes de cierta cantidad, o puede suceder que por políticas de la empresa no se pueden hacer muchos pedidos sino unos pocos, así que puede pedirse un gran cantidad, usar lo que se necesite y almacenar el resto. Para el ejemplo 1 se está suponiendo que estas situaciones no ocurren y que se puede pedir exactamente lo que se necesite. Por este motivo en la Tabla 3 la fila de los RN es igual a la del PRO. Pero suponga por un momento que el proveedor solo hace entregas en lotes de 100 unidades. Como en la semana 3 se requieren 60 unidades (RN), debe hacerse un pedido de 100 y almacenar las 40 restantes para el periodo siguiente. Estas 40 unidades quedarían registradas en el ítem del inventario disponible (ID). En el ejemplo 2 se amplía este tema.

- Plan de colocar órdenes (PCO): al considerar el lead time de los materiales es necesario hacer o colocar el pedido con algún tiempo de anticipación para que llegue a tiempo cuando se necesita. Es por esto que el PCO es el mismo PRO pero trasladado en el tiempo. Para el ejemplo 1 se tiene un lead time de 2 semanas para el producto Z, por tanto en la tabla 3 el PCO se encuentra 2 semanas corrido respecto al PRO. Por ejemplo para la semana 3 se tiene un PRO de 60 unidades, el cual se ubica en la semana 1 del PCO. Esto quiere decir que como se tiene un lead time de 2 semanas, para que hayan disponibles 60 unidades en la semana 3 es necesario pedir las o iniciar su producción en la semana 1.

En este punto ya se tiene listo el MRP para el producto Z, cuyo principal resultado es el plan de colocar órdenes, el cual indica la cantidad que debe pedirse o producirse del producto Z y en qué momento deben ser pedidas estas cantidades. Este PCO será el insumo para las partes A y B, que son las hijas de Z. Es decir, para iniciar la producción de Z en los momentos indicados por el PCO en la Tabla 3, es necesario que las partes A y B estén listas en esas semanas. Para esto se hace un MRP para estas partes, de la misma forma como se hizo para Z. Esto se muestra en las Tablas 4 y 5.

A	0	1	2	3	4	5	6
RB		120	120	190	150	120	110
RP		0	0	0	0	0	0
ID	150	30	0	0	0	0	0
RN		0	90	190	150	120	110
PRO		0	90	190	150	120	110
PCO		90	190	150	120	110	

Tabla 4. MRP para el componente A  
Fuente: Propia.

B	0	1	2	3	4	5	6
RB		240	240	380	300	240	220
RP		0	0	0	0	0	0
ID	255	15	0	0	0	0	0
RN		0	225	380	300	240	220
PRO		0	225	380	300	240	220
PCO		225	380	300	240	220	

Tabla 5. MRP para el componente B  
Fuente: Propia.

La lógica para los cálculos es exactamente la misma que la explicada previamente<sup>1</sup>, sin embargo, en esta ocasión los requerimientos brutos deben ser calculados de manera distinta.

<sup>1</sup> A manera de actividad auto-evaluativa, usted debe comprobar los valores calculados en las Tablas 4, 5, 6 y 7.

Recuerde que los RB para el producto Z estaban dados por la demanda independiente de este producto, pero como la demanda de las partes y sub-partes es dependiente, los requerimientos brutos deben ser calculados con base en el PCO de su padre. Es decir, como por cada unidad del producto Z se requieren 2 unidades del componente A (Ver Figura 3), el PCO de Z debe multiplicarse por 2. Esta operación da como resultado el requerimiento bruto de A. Para el componente B se hace la misma operación pero multiplicando por 4. Finalmente, note en las Tablas 4 y 5 que estas se calculan solo hasta la semana 6 debido a que el PCO de Z va hasta esa misma semana.

Para terminar el ejercicio se hace el MRP (ver Tablas 6 y 7) para los componentes C y D, que son hijos de A. Esto quiere decir que sus requerimientos brutos se calculan con base en el plan de colocar órdenes de A. Es así como para el RB de C se debe multiplicar 3 por el PCO de A, y para el RB de D se debe multiplicar 4 por el PCO de A.

Como C y D no tienen hijos, el cálculo para estas partes completa el MRP. Como conclusión final para el ejercicio se debe entonces observar el PCO de cada una de los componentes, partes y subpartes para establecer las cantidades a pedir o producir de cada una, así como el momento en que esto debe hacerse. Además de esto, este plan sirve como control para el sistema productivo, pues permite determinar lo que él debería estar fabricando en cualquier momento, de tal manera que si el encargado de administrar las operaciones observa que lo producido no se está ajustando al plan, deberá indagar las razones por las cuales no se está cumpliendo y tomar las acciones correctivas pertinentes, tanto para ese momento como para corridas de producción futuras.

Tabla 6. MRP para el componente C  
Fuente: Propia.

C	0	1	2	3	4	5
RB		270	570	450	360	330
RP		0	150	0	0	0
ID	380	110	0	0	0	0
RN		0	310	450	360	330
PRO		0	310	450	360	330
PCO		310	450	360	330	

Tabla 7. MRP para el componente D  
Fuente: Propia.

D	0	1	2	3	4	5
RB		360	760	600	480	440
RP		0	0	0	200	0
ID	1300	940	180	0	0	0
RN		0	0	420	280	440
PRO		0	0	420	280	440
PCO		420	280	440		

## Costos de inventarios en el MRP

Un aspecto importante en el MRP es el manejo de los inventarios, es decir, el administrador de operaciones debe decidir acerca de las cantidades y los momentos en que debe hacer los pedidos, lo cual afecta directamente la fila del PRO en el MRP y por tanto el inventario disponible. En el ejemplo 1, cada vez que se necesitó pedir cierta cantidad este proceso fue hecho exactamente con las unidades necesarias, lo cual hacía que en las últimas semanas no quedara inventario disponible.

Sin embargo, los pedidos no necesariamente deben hacerse de esa forma. Por ejemplo, el administrador de operaciones puede decidir hacer un único pedido al inicio del horizonte de planeación, el cual alcance hasta el fin del mismo. Este pedido será almacenado y cada semana se tomará lo que se necesite.

Además de las evidentes diferencias entre estas dos formas de llevar los inventarios, un aspecto fundamental que también los diferencia es el costo. Así, mientras en el caso que se acaba de describir se incurre una sola vez en costos de ordenar, el costo de mantenimiento de inventario se eleva. Por otro lado, en el ejemplo 1 se incurre muy poco en este costo de mantenimiento, pero a cambio se eleva el costo de ordenar debido a que cada semana debe hacerse un pedido.

Estos dos tipos de costos que acaban de mencionarse son los costos básicos que deben ser balanceados en un sistema de manejo de inventarios. Recuerde que cuando se estudió la planeación agregada se expuso el costo de mantenimiento de inventario, el cual es un costo variable en el que se incurre por: espacio de almacenamiento ocupado, seguros, aseo o servicios asociados al mantenimiento del inventario (por ejemplo, energía si se requiere mantener refrigerado), costos de capital y costos por obsolescencia.

Por otro lado, el costo de ordenar es un costo fijo en el que se incurre cada vez que se hace un pedido. Puede entenderse como los costos administrativos o de oficina que se generan por preparar y rastrear la orden de compra. Este costo también puede asimilarse al costo de set-up o de preparación de la producción, explicado en la cartilla referente al programa maestro de producción.

Naturalmente, las dos formas de manejar los inventarios que se expusieron al inicio de esta sección son solo los dos casos extremos, pues puede haber varios planes intermedios. Por ejemplo, si se tiene un horizonte de planeación de 8 semanas, en vez de hacer 8 pedidos (uno cada semana) o en vez de hacer un solo pedido en la semana 1 y almacenar el resto, pueden hacerse dos pedidos: uno en la semana 1, almacenar por cuatro semanas, y hacer otro pedido en la semana 5. O también podrían hacerse dos pedidos: uno en la semana 1, almacenar por seis semanas, y hacer otro pedido en la semana 7. O también podrían hacerse tres pedidos: uno en la semana 1, almacenar por dos semanas, hacer otro pedido en la semana 3, almacenar por tres semanas, y hacer otro pedido en la semana 6. Dado esto, imagine entonces la gran cantidad de planes alternativos que pueden existir.

Lo importante es entonces encontrar un plan que arroje el costo más pequeño entre todas las alternativas evaluadas. Para esto se estudiarán tres técnicas para determinar la dimensión de los lotes, y aunque realmente existe una variedad de ellas, las que serán expuestas en el ejemplo 2 hacen parte de las más usadas.

**Ejemplo 2.** Considere el producto Z del ejemplo 1 y suponga que los costos de ordenar son de \$47 por pedido y que los costos de mantener inventario son de \$0,10 por semana y por unidad. Encuentre cual de las siguientes técnicas para determinar la dimensión de los lotes arroja el costo más pequeño: lote por lote, EOQ y costo total mínimo.

**Lote por lote.** Esta técnica fue la que se utilizó para calcular el MRP en el ejemplo 1 (Tabla 3), es decir, es una técnica que indica que se debe pedir exactamente lo que se necesita en cada periodo. Como el MRP ya fue expuesto en dicha tabla, basta determinar los costos de este plan, los cuales son:

$$[0,1 * (70 + 10)] + [47 * 6] = \$290,0$$

Por un lado se tienen los costos de mantener inventario, para lo cual se multiplica \$0,1 por los inventarios totales de todo el horizonte de planeación, es decir, todos los valores ubicados en la fila del ID. Para este ejemplo estos valores son 70 y 10, y no se incluye 120 debido a que esa cantidad debió contabilizarse en el horizonte de planeación anterior. A esta operación se le suma el costo de ordenar, el cual es de \$47 por el número de pedidos que se hacen en el horizonte. Si observa la Tabla 3 notará que la cantidad de veces que se hace pedido es de seis, es decir, cada vez que el PRO es distinto de cero. Así pues, el costo total de la técnica lote por lote es de \$290.

**EOQ.** Esta es una técnica tradicionalmente usada en el campo de la administración de operaciones que, considerando varios supuestos, en teoría minimiza el costo total de manejo de inventarios. Se ha dicho “en teoría” debido a que en la realidad de las empresas tales supuestos difícilmente se cumplen<sup>2</sup>.

EOQ significa Cantidad económica de pedido (Economic Order Quantity) y básicamente hace uso de una fórmula para calcular la cantidad óptima a pedir. En este contexto, “óptima” se refiere a la cantidad que minimiza los costos de mantener y de ordenar y para su cálculo solo requiere de los datos de estos costos y de la demanda promedio.

Para el caso del ejemplo, los costos ya se tienen y la demanda se calcula hallando el promedio simple de los requerimientos brutos dados para Z. Este cálculo arroja una demanda

<sup>2</sup> Para más información sobre EOQ puede consultar Hillier, F.S., & Lieberman, G.J. (2010). *Introducción a la investigación de operaciones* (9ª ed.). México D.F.: McGraw-Hill y Chase, R.B., Jacobs, F.R., & Aquilano, N.J. (2009). *Administración de Operaciones, Producción y Cadena de Suministros* (12ª ed.). México D.F.: McGraw-Hill.

promedio de 65,6 unidades. Entonces, si Q es la cantidad óptima a pedir, d es la demanda, h es el costo unitario de mantener inventario y K es el costo de ordenar por pedido, la cantidad óptima se calcula así:

$$Q = \sqrt{\frac{Kd}{h}} = \sqrt{\frac{47 * 65,6}{0,1}} = 175,6 \text{ unidades} \approx 176 \text{ unidades}$$

Este valor indica la cantidad a ordenar cada vez que se haga un pedido. Dado esto, el MRP queda como se muestra en la Tabla 8. En ésta se observa que cada vez que el requerimiento neto es distinto de cero, al PRO se le asigna un valor de 176, que es la cantidad que debe ser pedida de acuerdo al EOQ. Esto hace que quede inventario almacenado todas las semanas. Por ejemplo, para la semana 3 el inventario que queda es igual a:

$$ID = 10 + 176 - 70 = 116 \text{ unidades}$$

Z	0	1	2	3	4	5	6	7	8
RB		50	60	70	60	95	75	60	55
OP		0	0	0	0	0	0	0	0
ID	120	70	10	116	56	137	62	2	123
RN		0	0	60	0	39	0	0	53
PRO		0	0	176	0	176	0	0	176
PCO		176	0	176	0	0	176		

Tabla 8. MRP para el producto Z según el EOQ  
Fuente: Propia.

Finalmente se calcula el costo para este plan, de la misma forma que se hizo con la técnica Lote por lote, así:

$$[0,1 * (70 + 10 + 116 + 56 + 137 + 62 + 2 + 123)] + [47 * 3] = \$198,6$$

Este costo resulta ser menor que el calculado con la técnica Lote por lote, por tanto, si hubiera que escoger entre ambas, el EOQ sería la técnica escogida.

**Costo total mínimo.** Esta técnica procura balancear los costos de ordenar con los costos de mantener. Para esto analiza el comportamiento de los costos si se hiciera un pedido solo para el periodo actual, si se hiciera para los siguientes 2 periodos, si se hiciera para los siguientes 3 periodos y así sucesivamente. A diferencia del EOQ, esta técnica cambia el tamaño del lote dependiendo de las necesidades futuras.

En particular para el ejemplo 2, en la Tabla 9 se muestra el cálculo de lo que se acaba de exponer. Note que el análisis se inicia en la semana 3, dado que en las semanas 1 y 2 no es necesario hacer pedidos. Se comienza entonces calculando el costo de mantener inventario si en la semana 3 se pidiera lo estrictamente necesario para esa semana, lo que es igual al requerimiento neto. Naturalmente el costo de mantener inventario será de cero en este caso.

Periodos combinados	Cantidad a pedir	Costo de mantener inventario
3	60	0 = 0,0
3, 4	60 + 60 = 120	1 * 0,1 * 60 = 6,0
3, 4, 5	60 + 60 + 95 = 215	(1 * 0,1 * 60) + (2 * 0,1 * 95) = 25,0
3, 4, 5, 6	60 + 60 + 95 + 75 = 290	(1 * 0,1 * 60) + (2 * 0,1 * 95) + (3 * 0,1 * 75) = 47,5
7	60	0 = 0,0
7, 8	60 + 55 = 115	1 * 0,1 * 55 = 5,5

Tabla 9. Tamaños de lote para la técnica de costo total mínimo  
Fuente: Propia.

Para la segunda fila se calcula la cantidad a pedir si se realizara un pedido que alcance para las semanas 3 y 4. En este caso el total es de 120, sumando al RN de 60 de la semana 3, 60 que representan el RB de la semana 4. En este caso el costo de inventario queda en \$6,0, pues las 60 unidades de la semana 4 deben guardarse por un periodo.

Para la tercera fila se calcula la cantidad a pedir si se realizara un pedido que alcance para las semanas 3, 4 y 5. En este caso el total es de 215, sumando al RN de 60 de la semana 3, las 60 unidades de RB de la semana 4 y las 95 unidades de RB de la semana 5. En este caso el costo de inventario queda en \$25,0, pues las 60 unidades de la semana 4 deben guardarse por un periodo y las 95 unidades de la semana 5, por 2 periodos.

Realizando un cálculo similar para la cuarta fila se obtiene un costo de mantener inventario de \$47,5. En este punto del cálculo debe detenerse debido a que el criterio de parada es cuando los costos de mantener sobrepasen los costos de ordenar. Como para este ejercicio tal costo es de \$47, se hace el siguiente análisis: se compara el costo de ordenar (\$47) con los dos últimos costos de mantener (\$25,0 y \$47,5). Como es evidente que se acerca más a 47,5, esto indica que en la semana 3 debe hacerse un pedido de 290 unidades, el cual alcanzará hasta la semana 6.

Como aún faltan dos semanas del horizonte de planeación, se lleva a cabo el mismo análisis hecho previamente, pero esta vez iniciando en la semana 7, tal como se muestra también en la Tabla 9. Como \$5,5 se acerca más a \$47 que \$0,0, en la semana 7 debe hacerse un pedido

de 115 unidades que alcance hasta la semana 8. Dadas estas consideraciones, el MRP queda como el mostrado en la Tabla 10.

Z	0	1	2	3	4	5	6	7	8
RB		50	60	70	60	95	75	60	55
OP		0	0	0	0	0	0	0	0
ID	120	70	10	230	170	75	0	55	0
RN		0	0	60	0	0	0	60	0
PRO		0	0	290	0	0	0	115	0
PCO		290	0	0	0	115	0		

Tabla 10. MRP para el producto Z según el Costo total mínimo  
Fuente: Propia.

Finalmente se calcula el costo para este plan, de la misma forma que se hizo con las técnicas anteriores, así:

$$[0,1 * (70 + 10 + 230 + 170 + 75 + 55)] + [47 * 2] = \$155,0$$

Como la técnica Lote por lote arrojó un costo de \$290,0, la técnica EOQ arrojó un costo de \$198,6, y la técnica del Costo total mínimo arrojó un costo de \$155,0, se concluye que para este caso se deben pedir los lotes según la técnica del Costo total mínimo. Naturalmente, estos cálculos afectan el MRP de las partes A, B, C y D de las cuales se compone Z y por tanto deben ser calculados de nuevo.

4

Unidad 4

Programación de la  
producción a corto  
plazo



Administración de operaciones

Autor: Rafael Tordecillas

# Introducción

En la octava y última semana del módulo, se estudiarán las decisiones de tipo operativo. Estas se refieren a decisiones a corto plazo, entre 1 y 90 días, e incluso programación por horas. Son decisiones que pretenden controlar el tiempo de las operaciones, dadas las necesidades diarias de producción. Para esto básicamente se debe decidir cómo cargar cada centro de trabajo y cómo secuenciar los trabajos. A pesar de su aparente sencillez, las decisiones operativas son las que tienen mayor complejidad matemática en el marco de la administración de operaciones, lo cual lo hace un tema verdaderamente extenso y por tanto vale la pena aclarar que lo que se estudiará en la presente cartilla es solo una pequeña aproximación conceptual al tema de la programación a corto plazo.

La presente cartilla presenta partes conceptuales y partes con ejemplos numéricos. Para la parte conceptual se recomienda dar una leída rápida a la cartilla y luego leerla nuevamente de forma más pausada, haciendo hincapié en los conceptos que mayor dificultad le generaron. Para la parte numérica se recomienda inicialmente entender bien los parámetros, datos e información que se da en el ejercicio y luego procurar comprender cada uno de los cálculos que se llevan a cabo en la solución del ejercicio. No olvide consultar con su tutor cualquier duda que se le presente.

## Programación de la producción a corto plazo

En las unidades anteriores se estudiaron las decisiones de tipo estratégico y las decisiones de tipo táctico, es decir, aquellas cuyo horizonte de planeación es a largo plazo y a mediano plazo, respectivamente. Esto quiere decir que la escala temporal de aquellas decisiones era de años, meses o semanas, dependiendo el caso. Sin embargo, los sistemas productivos operan a diario y por tanto diariamente deben tomarse decisiones que propendan por un mejor desempeño de la planta.

A estas decisiones que se toman a diario se les llama decisiones operativas, y se refieren a aquellas cuya influencia no se extiende más allá de unos cuantos días o incluso no más de unas cuantas horas. Decisiones como asignación de operarios a máquinas, secuenciación de trabajos en un grupo de máquinas, programación de días libres de meseros en un restaurante, asignación de camillas de hospital a pacientes, asignación de pilotos a vuelos, entre muchas otras, son ejemplos de decisiones operativas.

Dados los objetivos del módulo de administración de operaciones, la presente cartilla se enfocará de manera explícita solo en aquellas decisiones relacionadas con la secuenciación en sistemas de manufactura, aunque algunos de los temas que serán estudiados también pueden ser aplicados a programación en el sector servicios.

La programación a corto plazo pretende lograr alguno o algunos (cumplirlos todos es imposible debido a que lograr uno puede implicar el no logro de otro) de los siguientes objetivos:

- Minimizar los tiempos de demora, que es la cantidad de tiempo que se retrasan los trabajos respecto a la fecha de entrega al cliente. El mínimo posible es cero.
- Minimizar el tiempo en tránsito, que es la cantidad de tiempo total que los trabajos se encuentran dentro del sistema productivo.
- Minimizar el inventario de producto en proceso (WIP), que es la cantidad de unidades que hay en un momento dado dentro del sistema productivo.
- Maximizar la utilización, que es la cantidad de tiempo que las máquinas se encuentran en operación procesando algún producto. Este objetivo es igual que “minimizar el tiempo ocioso”.

Note entonces por ejemplo, que si se quiere maximizar la utilización no es posible minimizar el inventario de producto en proceso, pues el logro de un objetivo va en contravía del logro del otro. Es por eso que no pueden cumplirse simultáneamente todos los objetivos y debe escogerse alguno de ellos al momento de realizar la programación.

En términos generales, el tema de la programación a corto plazo es un tema matemáticamente complejo y muchas veces es imposible llegar a una solución óptima que permita lograr efectivamente alguno de los objetivos expuestos. Es por esto que para resolver este tipo de ejercicios se han propuesto algoritmos y heurísticas que, cuando el problema es muy grande, permite encontrar buenas soluciones en tiempos cortos, aunque no la solución óptima. A continuación se estudiarán algunos de ellos diseñados para problemas pequeños, es decir, problemas en los que es pequeño el número de máquinas a las que serán asignados trabajos.

## Secuenciación de trabajos

La secuenciación de trabajos se refiere a la forma en que deben programarse una serie de trabajos en un conjunto de máquinas, para lograr alguno de los objetivos expuestos previamente. Si en una planta deben ser programados  $n$  trabajos en  $m$  máquinas y todos los trabajos se procesan en todas las máquinas, se tiene que el número de alternativas es de  $n^m$ . Esto quiere decir, por ejemplo, que si se tienen solamente 5 trabajos y 4 máquinas, el número de alternativas posibles es de:

$$(n!)^m = (1 * 2 * 3 * 4 * 5)^4 = 207'360.000$$

Como podrá notar, el número de alternativas es muy grande para un número muy pequeño de máquinas y trabajos y a medida que este aumenta el número de alternativas crece exponencialmente, y de ahí la complejidad matemática de la que se hablaba previamente. Es por este motivo que muchas veces la única manera de llevar a cabo la secuenciación es a través de simulación<sup>1</sup>, pues el problema puede llegar a ser tan complejo que no existe un modelo analítico útil para resolver satisfactoriamente el problema.

Así pues, los problemas de secuenciación pueden clasificarse según distintos criterios. Estos son:

- El número de trabajos a ser programados, para lo cual se requieren además datos acerca del tiempo requerido para cada proceso y las máquinas o tipo de máquinas que necesita.

<sup>1</sup> La simulación es un método numérico que representa en un computador un sistema real. Es un método muy útil para modelar sistemas productivos y poder experimentar en el modelo mejoras al sistema productivo. En la video-conferencia de esta semana se amplía un poco el tema. Además, pueden consultarse los textos Hillier, F.S., & Lieberman, G.J. (2010). *Introducción a la investigación de operaciones* (9ª ed.). México D.F.: McGraw-Hill y Law, A.M. (2006) *Simulation, Modeling & Analysis* (4ª ed.). McGraw-Hill Education.

- El número de máquinas en el taller.
- El tipo de flujo de los trabajos en el taller, el cual puede ser de dos tipos: por un lado, que todos los trabajos requieran ser procesados en la misma secuencia de máquinas y por el otro, que cada trabajo tenga un patrón de flujo distinto. En general, este último tipo de flujo es mucho más complejo que el primero.
- Llegada estática o dinámica al sistema productivo. En un patrón estático existe un conjunto de  $n$  trabajos que deben ser procesados y no se permiten más llegadas al sistema productivo, mientras que en un patrón dinámico constantemente están llegando nuevos trabajos, usualmente de manera aleatoria. Naturalmente, un patrón dinámico hace que el problema sea más complejo que un patrón estático.
- Objetivos del sistema productivo, los cuales fueron descritos previamente.

A continuación se mostrará un ejemplo que aclarará estos conceptos y permitirá dar una mejor idea de lo que se trata el tema de la secuenciación.

**Ejemplo 1.** (Basado en Elsayed, & Boucher, 1994) Dos trabajos A y B deben ser programados en dos máquinas M1 y M2. Ambos trabajos requieren ser procesados inicialmente por M1 y luego por M2. Los tiempos de procesamiento de cada trabajo en cada máquina se muestran en la Tabla 1. Halle la secuencia que minimice el tiempo en tránsito total.

Trabajo	Tiempo de procesamiento (min)	
	M1	M2
A	8	5
B	7	10

Tabla 1. Tiempos de procesamiento para el Ejemplo 1  
Fuente: Propia.

Antes de resolver el ejercicio, serán identificados los criterios acerca del tipo de problema de secuenciación del que se trata. Evidentemente, se tienen dos trabajos y dos máquinas. Por otro lado, el tipo de flujo es tal que todos los trabajos requieren ser procesados en la misma secuencia de máquinas. Además, en este caso se tiene una llegada estática ya que los datos referentes a los trabajos están dados desde el principio y no se brinda información respecto a llegadas posteriores. Finalmente, el objetivo será minimizar el tiempo en tránsito total.

Como el problema es bastante pequeño, basta con evaluar cada alternativa. Como ambos trabajos deben iniciar en la máquina 1, solo hay dos alternativas: iniciar con el trabajo A o iniciar con el trabajo B. Será más fácil si cada alternativa se evalúa en un diagrama de Gantt, el cual es un diagrama que relaciona la ejecución de actividades con el tiempo que tardan<sup>2</sup>. En

<sup>2</sup> El diagrama de Gantt es muy útil para efectos de control del programa de producción. Por ejemplo, cuando el programa ya está en ejecución en la planta, el diagrama permite saber qué debería estar procesando cada máquina en un momento dado, y en caso de no estar haciendo eso para lo que estaba programado en ese momento, el administrador de operaciones deberá indagar las razones por las cuales no se está cumpliendo y tomar las acciones correctivas pertinentes

la Figura 1 se muestra el diagrama correspondiente al caso en que se programa inicialmente el trabajo A. Allí se observa que en el minuto 8 el trabajo A termina su procesamiento en M1 y de inmediato inicia en M2. En ese mismo minuto el trabajo B inicia en M1 y en el minuto 15 inicia en M2, terminando en el minuto 25. Esto quiere decir que con esta alternativa el tiempo en tránsito total es de 25 minutos.

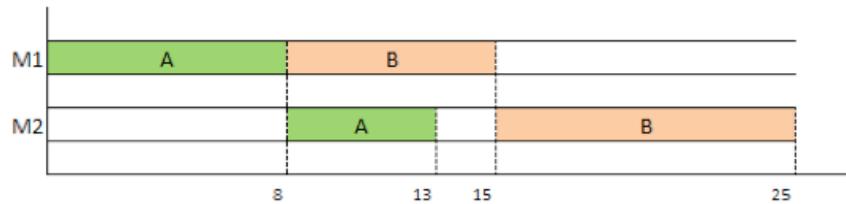


Figura 1. Diagrama de Gantt para la primera alternativa  
Fuente: Propia.

La otra alternativa se muestra en la Figura 2. Allí se observa que en el minuto 7 el trabajo B termina su procesamiento en M1 y de inmediato inicia en M2. En ese mismo minuto el trabajo A inicia en M1 y en el minuto 17 inicia en M2, terminando en el minuto 22. Esto quiere decir que la alternativa que minimiza el tiempo total de tránsito es la segunda, pues arroja un tiempo de 22 minutos.

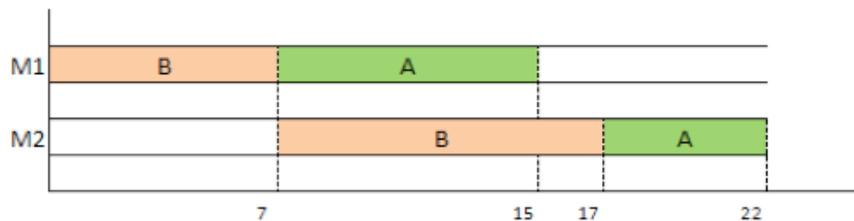


Figura 2. Diagrama de Gantt para la segunda alternativa  
Fuente: Propia.

Note que en la primera alternativa M2 entre los procesamientos de A y de B tiene un tiempo ocioso de 2 minutos, mientras que en la segunda alternativa este tiempo ocioso es inexistente. Por el contrario, en esta alternativa el trabajo A debe esperar 2 minutos a que M2 termine de procesar el trabajo B.

Este ejemplo ha permitido aclarar el tema de la secuenciación, pero resolver este problema fue bastante sencillo debido a que solo eran dos trabajos y dos máquinas. En la realidad de las plantas de producción hay muchos más trabajos y máquinas, lo cual hace que la complejidad del problema crezca exponencialmente, tal como se explicó previamente. A continuación se estudiarán dos de los casos menos complejos de secuenciación de trabajos<sup>3</sup>.

<sup>3</sup> Para casos más complejos puede consultarse Elsayed, E.A., & Boucher, T.O. (1994). *Analysis and control of production systems* (2ª ed.). New Jersey: Prentice Hall y Leung, J.Y.T, & Anderson, J.H. (2004). *Handbook of Scheduling: Algorithms, Models, and Performance Analysis*. New Jersey: Chapman and Hall/CRC.

## Secuenciación n/1

Este es el caso más sencillo de los problemas de secuenciación, el cual trata acerca de la programación de n trabajos en 1 máquina. Para este problema bastará establecer una de las siguientes reglas de prioridad:

- FCFS (First-Come, First-Served), que indica que la atención se hace en el mismo orden en que llegan los trabajos.
- SPT (Short Processing Time), que indica que los trabajos deben procesarse de acuerdo a su tiempo de procesamiento, es decir, se inicia con el trabajo con el tiempo más corto, luego con el segundo más corto y así sucesivamente.
- EDD (Earliest Due Date First), que indica que se debe iniciar con el trabajo que tenga el plazo de entrega más pronto, luego con el segundo más pronto y así sucesivamente.
- LCFS (Last-Come, First-Served), que indica que se atiende inicialmente el último trabajo en llegar. Es muy común si, por ejemplo, los trabajos se van ubicando en una pila y se va tomando el que más alto se encuentre.
- Aleatorio, que indica que el orden de procesamiento es cualquiera que los operadores elijan. No es recomendable pues no sigue ninguna regla lógica.

**Ejemplo 2.** La empresa “La Gran Fotocopia Feliz” proporciona servicio de fotocopiado a empresas legales del centro de una ciudad. Cinco clientes entregaron sus pedidos al inicio de la semana y todos deben ser procesados en una única fotocopidora de color. La empresa debe decidir la secuencia de procesamiento de los cinco pedidos. Evalúe las distintas reglas de prioridad con base en los criterios del tiempo de tránsito mínimo y tiempo de demora mínimo. Los datos de programación son los siguientes:

Trabajo (Orden de Llegada)	A	B	C	D	E
Tiempo de Procesamiento (Días)	5	3	4	7	2
Plazo (Días)	6	7	4	9	5

Tabla 2. Datos para el Ejemplo 2  
Fuente: Propia.

**FCFS.** Para este caso los trabajos deben ser procesados de acuerdo a la misma secuencia de llegada, es decir, A-B-C-D-E. En la Tabla 3 se muestran los cálculos respectivos. El tiempo en tránsito se calcula sumando el tiempo en tránsito del trabajo anterior y el tiempo de procesamiento. Por ejemplo, el tiempo en tránsito de C es 8 (tiempo en tránsito de B) más 4 (tiempo de procesamiento de C). Por otro lado, para el cálculo del tiempo de retraso se toma el tiempo en tránsito, que indica la fecha en la que se entregaría el trabajo, y se le resta el plazo, que es el día en que debería entregarse el trabajo. Note que para el trabajo A no hay retraso pues el tiempo en tránsito es menor que el plazo.

Secuencia	Tiempo de Procesamiento (días)	Plazo (días faltantes)	Tiempo de tránsito (días)	Tiempo de retraso (días)
A	5	6	0 + 5 = 5	0
B	3	7	5 + 3 = 8	8 - 7 = 1
C	4	4	8 + 4 = 12	12 - 4 = 8
D	7	9	12 + 7 = 19	19 - 9 = 10
E	2	5	19 + 2 = 21	21 - 5 = 16
<b>Total</b>			<b>65</b>	<b>35</b>

Tabla 3. Cálculos para la regla FCFS  
Fuente: Propia.

Para obtener los indicadores solicitados en el ejercicio y que evalúen el desempeño de esta regla de secuenciación, es necesario calcular el tiempo en tránsito promedio y el tiempo de retraso promedio. Para esto se tomará cada total calculado en la Tabla 3 y se dividirá entre 5, el total de trabajos programados, así:

$$\text{Tiempo en tránsito promedio} = \frac{65}{5} = 13 \text{ días}$$

$$\text{Tiempo de retraso promedio} = \frac{35}{5} = 7 \text{ días}$$

Esto indica que con esta secuenciación, en promedio un trabajo demora 13 días en atravesar el sistema, mientras que en promedio tendrá 7 días de retraso.

**SPT.** Para este caso los trabajos deben ser procesados de acuerdo al tiempo de procesamiento, de menor a mayor, es decir, E-B-C-A-D. En la Tabla 4 se muestran los cálculos respectivos.

Secuencia	Tiempo de Procesamiento (días)	Plazo (días faltantes)	Tiempo de tránsito (días)	Tiempo de retraso (días)
E	2	5	0 + 2 = 2	0
B	3	7	2 + 3 = 5	0
C	4	4	5 + 4 = 9	9 - 4 = 5
A	5	6	9 + 5 = 14	14 - 6 = 8
D	7	9	14 + 7 = 21	21 - 9 = 12
<b>Total</b>			<b>51</b>	<b>25</b>
<b>Promedio</b>			<b>10,2</b>	<b>5</b>

Tabla 4. Cálculos para la regla SPT  
Fuente: Propia.

**EDD.** Para este caso los trabajos deben ser procesados de acuerdo al plazo de entrega, de menor a mayor, es decir, E-B-C-A-D. En la Tabla 5 se muestran los cálculos respectivos.

Secuencia	Tiempo de Procesamiento (días)	Plazo (días faltantes)	Tiempo de tránsito (días)	Tiempo de retraso (días)
C	4	4	$0 + 4 = 4$	$4 - 4 = 0$
E	2	5	$4 + 2 = 6$	$6 - 5 = 1$
A	5	6	$6 + 5 = 11$	$11 - 6 = 5$
B	3	7	$11 + 3 = 14$	$14 - 7 = 7$
D	7	9	$14 + 7 = 21$	$21 - 9 = 12$
<b>Total</b>			56	25
<b>Promedio</b>			11,2	5

Tabla 5. Cálculos para la regla EDD

Fuente: Propia.

**LCFS.** Para este caso los trabajos deben ser procesados de acuerdo al orden inverso de llegada, es decir, E-D-C-B-A. En la Tabla 6 se muestran los cálculos respectivos.

Secuencia	Tiempo de Procesamiento (días)	Plazo (días faltantes)	Tiempo de tránsito (días)	Tiempo de retraso (días)
E	2	5	$0 + 2 = 2$	0
D	7	9	$2 + 7 = 9$	$9 - 9 = 0$
C	4	4	$9 + 4 = 13$	$13 - 4 = 9$
B	3	7	$13 + 3 = 16$	$16 - 7 = 9$
A	5	6	$16 + 5 = 21$	$21 - 6 = 15$
<b>Total</b>			61	33
<b>Promedio</b>			12,2	6,6

Tabla 6. Cálculos para la regla LCFS

Fuente: Propia.

Una vez se han evaluado las cuatro reglas de prioridad, en la Tabla 7 se muestra un resumen de los resultados. Allí se observa que la regla que arroja el menor tiempo de tránsito promedio es la SPT (10,2 días) y que esta misma arroja el menor tiempo de retraso promedio, junto con la EDD (5 días).

Regla	Tiempo de tránsito promedio (días)	Tiempo de retraso promedio (días)
FCFS	13,0	7,0
SPT	10,2	5,0
EDD	11,2	5,0
LCFS	12,2	6,6

Tabla 7. Resumen de resultados para el ejemplo 2

Fuente: Propia.

Aunque este haya sido solo un ejemplo, en la literatura se ha demostrado matemáticamente que la regla SPT ofrece la solución óptima para el problema de secuenciación  $n/1$  en cuanto al criterio del tiempo de tránsito y también en cuanto al tiempo de retraso.

## Secuenciación $n/2$ : Regla de Johnson

Se le llama secuenciación  $n/2$  al caso en que se requiere programar un número cualquiera de trabajos en dos máquinas y tales trabajos deben pasar por estas en el mismo orden. En particular cuando el objetivo de este problema es minimizar el tiempo en tránsito puede aplicarse un algoritmo llamado Regla de Johnson, el cual permite encontrar la solución óptima de este problema.

Los pasos que aplica la regla de Johnson son los siguientes (tomado de Chase, Jacobs, & Aquilano, 2009):

1. Se anota el tiempo de operación de cada trabajo en ambas máquinas.
2. Se elige el tiempo más breve entre todos.
3. Si el tiempo más breve es para la primera máquina, se hace este trabajo de primero; si es para la segunda, se hace este trabajo al último. En caso de empate, se elige arbitrariamente.
4. Repita los pasos 2 y 3 con los restantes trabajos hasta completar la programación.

**Ejemplo 3.** (Basado en Elsayed, & Boucher, 1994) Se tienen seis trabajos a los que inicialmente se les hace un agujero con un taladro y luego se remachan a otra estructura. Dada la siguiente información sobre los tiempos de procesamiento, halle la secuencia óptima que minimiza el tiempo en tránsito.

Trabajo	A	B	C	D	E	F
Tiempo en taladrado (min)	4	7	3	12	11	9
Tiempo en remachado (min)	11	7	10	8	10	13

Tabla 8. Datos para el ejemplo 3  
Fuente: Propia.

Lo primero que debe hacerse en el ejercicio es verificar que la Regla de Johnson puede ser aplicada, dados sus supuestos. En este caso basta mirar que el número de máquinas sea de dos y que todos los trabajos usen las máquinas en el mismo orden. Dado el enunciado, en efecto todos los trabajos deben pasar primero por taladrado y luego por remachado.

Ahora se aplican los pasos expuestos previamente. El primer paso indica que deben anotarse todos los tiempos, los cuales ya se muestran en la Tabla 8. Como segundo paso se tiene que entre todos los tiempos listados se escoge el más pequeño. En este caso el valor más pequeño es de 3 minutos, que es el tiempo que demora el trabajo C en taladrado.

Como este tiempo hace parte de la primera máquina u operación (taladrado), según el tercer paso de la Regla de Johnson este trabajo debe hacerse de primero, así:



Como el trabajo C ya se ha ubicado, este se suprime del análisis y se observan nuevamente los tiempos de la Tabla 8, pero esta vez solo para los trabajos A, B, D, E y F. De estos, el tiempo más pequeño es de 4 minutos, que es el tiempo que demora el trabajo A en taladrado. Como esta es la primera operación, el trabajo A se ubica al inicio de la secuencia, pero obviamente después de C, así:



Ahora se observan los tiempos para los trabajos B, D, E y F. En este caso hay un empate en el trabajo B de 7 minutos. Si este trabajo no tiene ninguna prioridad adicional, puede programarse indistintamente al inicio o al final de la secuencia. Para efectos del ejemplo se ubicará al final, así:



Ahora se observan los tiempos para los trabajos D, E y F. De estos, el tiempo más pequeño es de 8 minutos, que es el tiempo que demora el trabajo D en remachado. Como esta es la segunda operación, el trabajo D se ubica al final de la secuencia, pero obviamente antes de B, así:



Ahora se observan los tiempos para los trabajos E y F. De estos, el tiempo más pequeño es de 9 minutos, que es el tiempo que demora el trabajo F en taladrado. Como esta es la primera operación, el trabajo F se ubica al inicio de la secuencia, pero obviamente después de A, así:



Finalmente se ubica el trabajo E en la única casilla que aún queda vacía, así:



Así pues, la secuencia que minimiza el tiempo en tránsito es C-A-F-E-D-B. Sin embargo, a pesar de ya contar con la secuencia óptima, aún no se sabe de cuánto es tal tiempo mínimo. Para esto debe elaborarse un diagrama de Gantt similar al mostrado en las Figuras 1 y 2. Tal diagrama es mostrado en la Figura 3, el cual arroja un tiempo total en tránsito de 62 minutos. Usted puede realizar un diagrama de Gantt con una secuencia distinta a la encontrada y notará que el tiempo en tránsito será mayor.

En la Figura 3 se observa entonces la secuencia óptima, la cual debe ser la misma en ambas máquinas. Para este ejemplo ninguna máquina queda con tiempo ocioso entre los trabajos, aunque taladrado queda con tiempo ocioso desde el minuto 46, debido a que ya ha terminado el procesamiento de los seis trabajos. Debe aclararse que este tiempo ocioso es relativo, pues si bien ya ha acabado con los trabajos asignados, tal tiempo puede utilizarse para procesar algún otro trabajo que llegue después de los seis programados.

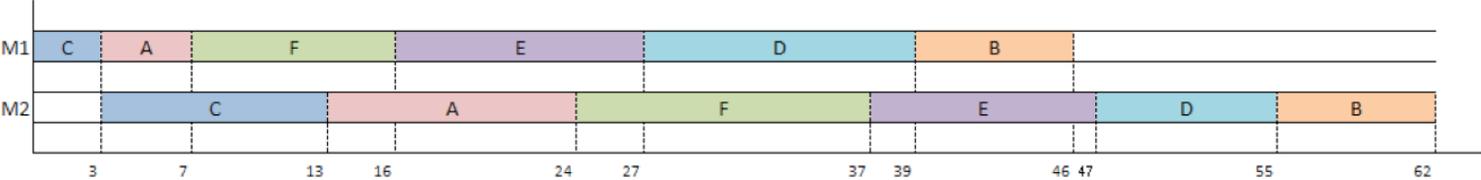
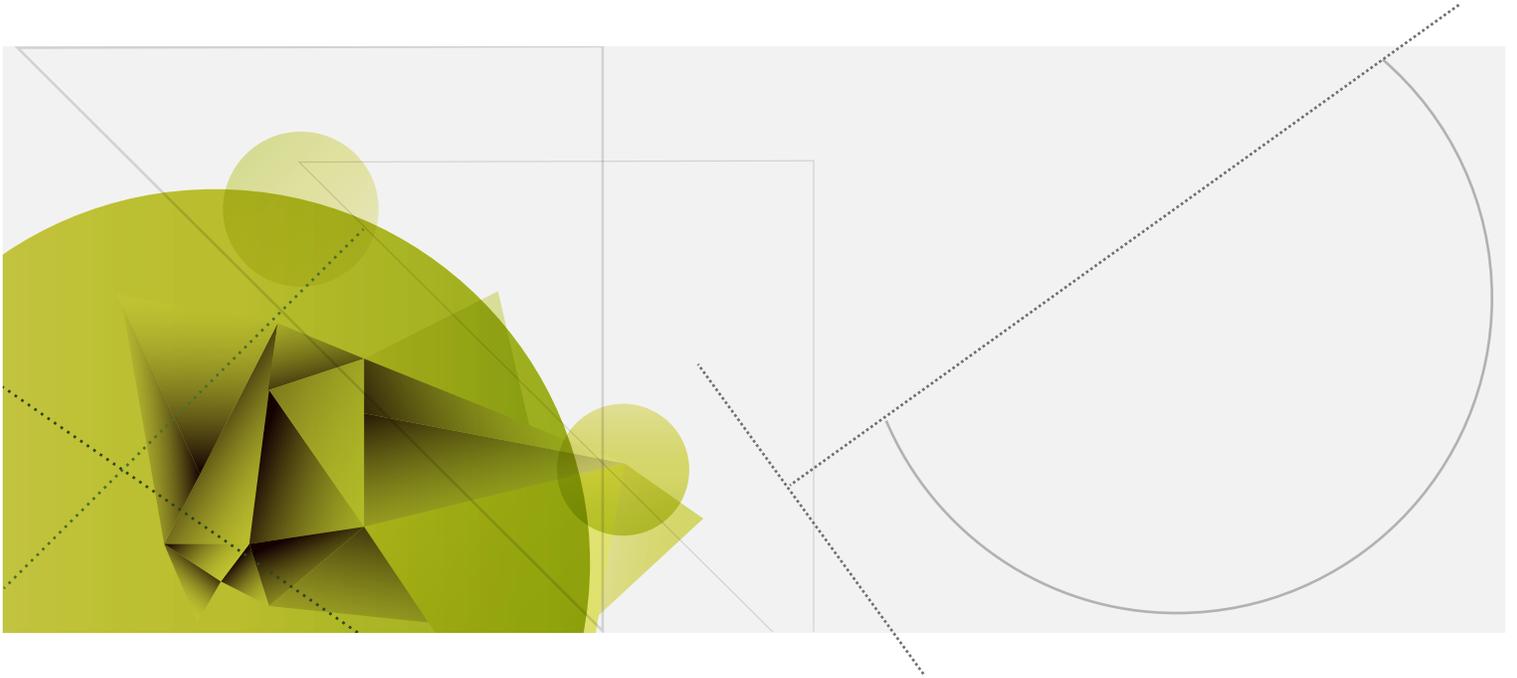


Figura 3. Diagrama de Gantt para la solución del ejemplo 3  
Fuente: Propia.

# Bibliografía

- Chapman, S. (2006). Planificación y control de la producción. México D.F.: Pearson Educación.
- Chase, R.B., Jacobs, F.R., & Aquilano, N.J. (2009). Administración de operaciones, producción y cadena de suministros (12ª ed.). México D.F.: McGraw-Hill.
- Elsayed, E.A., & Boucher, T.O. (1994). Analysis and control of production systems (2ª ed.). New Jersey: Prentice Hall.
- Galgano, A. (2004). Las tres revoluciones. Madrid: Ediciones Díaz de Santos.
- Goldratt, E. (2005). La meta. Madrid: Ediciones Díaz de Santos.
- \_\_\_\_\_. (2001). La carrera. México: Ediciones Castillo.
- Heizer, J., & Render, B. (2007). Dirección de la producción y de operaciones. (8ª ed.). México D.F.: Pearson Educación.
- Hillier, F.S., & Lieberman, G.J. (2010). Introducción a la investigación de operaciones (9ª ed.). México D.F.: McGraw-Hill.
- Krajewski, L.J., & Ritzman, L.P. (2008). Administración de operaciones: Estrategia y análisis. (8ª ed.). México D.F.: Pearson Educación.
- Law, A.M. (2006). Simulation, modeling & analysis (4ª ed.). McGraw-Hill Education.
- Leung, J.Y.T., & Anderson, J.H. (2004). Handbook of scheduling: Algorithms, models, and performance analysis. New Jersey: Chapman and Hall/CRC.
- Monden, Y. (1990). El sistema de producción de Toyota. Buenos Aires: Ediciones Macchi.
- Schroeder, R. (2005). Administración de operaciones. (5ª ed.). México D.F.: McGraw-Hill.
- Taha, H. (2011). Investigación de operaciones. (9ª ed.). México D.F.: Pearson Educación.
- Vollmann, T.E. (2005). Planeación y control de la producción, administración de la cadena de suministros (5ª ed.). México D.F.: McGraw-Hill.

Esta obra se terminó de editar en el mes de noviembre  
Tipografía Myriad Pro 12 puntos  
Bogotá D.C.,-Colombia.



**AREANDINA**  
Fundación Universitaria del Área Andina

MIEMBRO DE LA RED  
**ILUMNO**