

CAPÍTULO

10

ANÁLISIS DE SISTEMAS PRODUCTIVOS: CUELLOS DE BOTELLA

Objetivos del capítulo

1. Los cuellos de botella
 - 1.1. Definición y características del cuello de botella
 - 1.2. El recurso humano como cuello de botella
2. Teoría de las restricciones
 - 2.1. Clasificación de las restricciones
 - 2.2. Pasos de la teoría de las restricciones

Conceptos básicos

Actividades de autocomprobación

Ejercicios voluntarios

Referencias bibliográficas



OBJETIVOS DEL CAPÍTULO

Este capítulo se centra en el análisis de los cuellos de botella de un sistema productivo y en la teoría de las restricciones. En este sentido, al finalizar este capítulo el lector deberá:

- Saber identificar un cuello de botella de un proceso productivo.
- Determinar el tiempo de ciclo de un sistema productivo.
- Poder realizar un análisis de un proceso productivo y proponer mejoras de rendimiento en el mismo.
- Conocer la base de la filosofía de la teoría de las restricciones.

Para alcanzar estos objetivos, se ha organizado este capítulo en diferentes epígrafes. Se comienza con la definición de los cuellos de botella y sus características. Habrá que saber identificar el tiempo de ciclo de un proceso y su implicación en la producción máxima que se puede obtener.

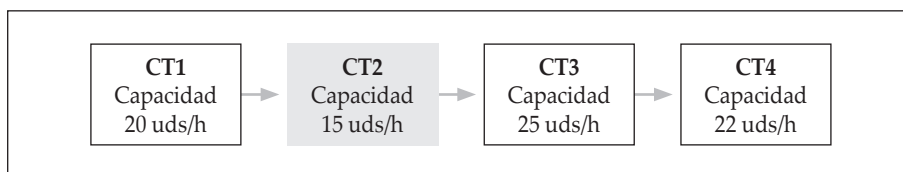
Con respecto a la teoría de las restricciones se estudiará qué se entiende por restricción, se explicarán los tipos de restricciones que existen y se conocerán los pasos a seguir para llevar a cabo esta metodología.

1. LOS CUELLOS DE BOTELLA

1.1. DEFINICIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL CUELLO DE BOTELLA

Un cuello de botella en un proceso es un recurso o restricción que limita la capacidad productiva del sistema en conjunto. Cuando se mencionan los cuellos de botella nos referimos a las diferentes actividades que disminuyen la velocidad de los procesos, incrementan los tiempos de espera y reducen la productividad, generando, como consecuencia final, el aumento en los costos.

Figura 1. Ejemplo de cuello de botella



Los cuellos de botella producen una caída considerable de la eficiencia en un área determinada del sistema, y se presentan tanto en el personal como en la maquinaria debido a diferentes factores: falta de preparación, entrenamiento o capacitación, en el caso del personal, o falta de mantenimiento apropiado para el caso de las máquinas y equipos. Hasta que alguien identifica y resuelve estas limitaciones, el conjunto del sistema queda a su merced. Intentar evitarlos agilizando frenéticamente la actividad en los operadores de su alrededor produce una corriente caótica e impredecible de la producción y hace que realizar una programación adecuada y precisa sea imposible.

Figura 2. Ejemplo de cuello de botella en una carretera



Sus características más destacables son:

- Es el recurso con menor capacidad en el proceso y determina la velocidad total del mismo.
- Es la restricción que determina la capacidad total del proceso y que habrá que arreglar/eliminar con prioridad.
- Normalmente, tiene altos inventarios por procesar (cola de espera), ya que su velocidad es menor que la de los procesadores anteriores.
- Las etapas posteriores del proceso sufren retrasos que se traducen en tiempos de parada y, por tanto, en capacidad ociosa.

Es importante mencionar que, al realizar la planificación de la producción, hay que tener en cuenta aquellos cuellos de botella que existen en el proceso para que, así, los recursos que no sean cuello de botella y no funcionen al 100 % de su capacidad sean programados con relación a los que sí lo son. De esta manera se producirá solo lo que puedan absorber los cuellos de botella reasignando la carga de trabajo de las máquinas que están sobrecargadas a las que tienen capacidad disponible.

1.2. EL RECURSO HUMANO COMO CUELLO DE BOTELLA

Uno de los procesadores que tiene más relevancia en el mundo de los servicios, no solo por su importancia en el mismo hecho de la prestación del servicio, sino también por ser en muchos casos el elemento principal o protagonista en el estudio de los cuellos de botella, es el recurso humano. Pensemos en cómo calculará el propietario de un restaurante cuántos camareros ha de contratar en función de la actividad, o cuántos cocineros, etc. Con este sencillo ejemplo comenzamos a reconocer la necesidad de incorporar el análisis de este recurso desde el punto de vista operativo. Se trata de responder a la siguiente pregunta: ¿qué grado de polivalencia debe tener el personal de mi empresa?

Figura 3. Ejemplo de recurso humano como cuello de botella



Fuente: <http://sciencenordic.com/new-formula-avoiding-supermarket-queues>.

EJEMPLO 1. Análisis de cuellos de botella

Situación actual

La empresa Rosquillas, SA quiere hacer un análisis de su pequeño negocio para examinar cuál es su capacidad de producción y qué mejoras se pueden introducir en el proceso. Se dedica a preparar rosquillas artesanales que vende en paquetes de 12 unidades, para lo que cuenta con un pequeño local de 10 m², en el que tiene como elementos principales una mezcladora para hacer la masa y una sartén industrial con capacidad para freír 36 rosquillas simultáneamente.

El precio de venta de la docena de rosquillas es de 5 euros.

El coste de las materias primas por docena de rosquillas es de 1 euro.

En las 6 horas que abre al día el negocio, en la actualidad logra realizar 12 pedidos, con 3 docenas de rosquillas cada uno.

El coste medio de alquiler del local diario es de 12 euros.

Descripción del proceso productivo: las rosquillas se hacen en lotes de 36 unidades

- Preparación de la masa de las 36 rosquillas: 15 minutos.
- Una vez preparada la masa se realiza el cambio y precalentamiento del aceite de la sartén industrial: 2 minutos.
- Colocar las rosquillas en la sartén industrial: 1 minuto.
- Freír rosquillas: 16 minutos.
- Dar la vuelta a las rosquillas en la sartén pasados 8 minutos de estar friéndose en la sartén: 1 minuto.
- Sacar las rosquillas de la sartén industrial: 1 minuto.
- Dejar reposar las rosquillas sobre servilletas de papel sobre una bandeja: 5 minutos.
- Por último se realiza el empaquetado de las rosquillas por docenas: 2 minutos.

El personal con el que se cuenta es el pastelero (dueño de la pastelería) que ahora mismo es la persona que realiza todas las tareas descritas anteriormente, y un aprendiz que se dedica exclusivamente a despachar, tomar pedidos de los clientes y cobrar, para lo que suele emplear una media de 30 minutos por hora. El sueldo del aprendiz es de 8 euros por hora.

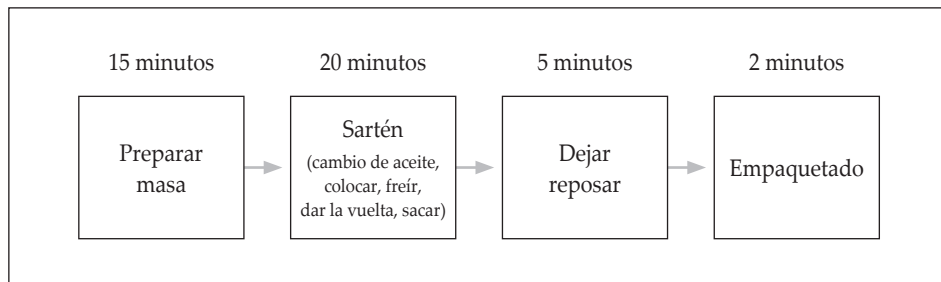
Análisis del proceso productivo

Lo primero será realizar un diagrama del proceso, especificando los tiempos de cada actividad, y se obtendrá el tiempo necesario para obtener el primer lote.

.../...

.../...

Figura 4. Diagrama del proceso



Código	Operación	Minutos
1	Preparación de la masa de las rosquillas	15
2	Cambio y precalentamiento del aceite en la sartén industrial	2
3	Colocar las rosquillas en la sartén	1
4	Freír las rosquillas	16
5	Dar la vuelta a las rosquillas en la sartén a la mitad del tiempo	1
6	Sacar las rosquillas de la sartén industrial	1
7	Dejar reposar las rosquillas sobre servilletas de papel en bandeja	5
8	Empaquetado por docenas	2
Total		43

Todas las operaciones son secuenciales, excepto el dar la vuelta a las rosquillas, que se hace a la vez que se están freiendo. Por ello, el tiempo necesario para tener preparado el primer lote es de 42 minutos.

¿Cuál es el cuello de botella del proceso? ¿Cuál es el tiempo de ciclo?

Para determinar el cuello de botella, habrá que ver el uso que se va a hacer de los recursos y el tiempo requerido para cada uno. Con ello se obtendrá la capacidad por hora de cada recurso.

El que tenga menor capacidad será el cuello de botella del proceso. En este caso será la sartén.

.../...

.../...

Conjuntos de operaciones que acaparan el mismo recurso	Minutos	Capacidad/hora
Preparación de la masa de las rosquillas	15	4
Sartén (precalentamiento, colocar, freír y sacar)	20	3
Reposado de las rosquillas	5	12
Empaquetado de las rosquillas	2	30

El **tiempo de ciclo** es el tiempo que se tarda en realizar un lote, desde que el proceso está en marcha, o sea, exceptuando el primer lote. Consecuentemente es el que marca el ritmo productivo. El tiempo de ciclo para la realización de 3 docenas de rosquillas será de 20 minutos, que corresponde al tiempo del proceso en que se utiliza el cuello de botella.

En 6 horas de trabajo diarias, ¿cuántas docenas de rosquillas podrá tener listas para la venta?

En función del tiempo que se tarda en realizar el primer lote y del tiempo de ciclo se obtendrán los tiempos de fin de cada lote. El primer pedido tarda 42 minutos, y a partir de ahí saldrá un nuevo pedido cada 20 minutos (tiempo de ciclo). Como 6 horas son 360 minutos, se podrán hacer 16 pedidos, lo que significan 48 docenas de rosquillas.

Pedido	Minutos
Pedido 1	42
Pedido 2	62
Pedido 3	82
Pedido 4	102
Pedido 5	122
Pedido 6	142

Pedido	Minutos
Pedido 7	162
Pedido 8	182
Pedido 9	202
Pedido 10	222
Pedido 11	242
Pedido 12	262

Pedido	Minutos
Pedido 13	282
Pedido 14	302
Pedido 15	322
Pedido 16	342
Pedido 17	362

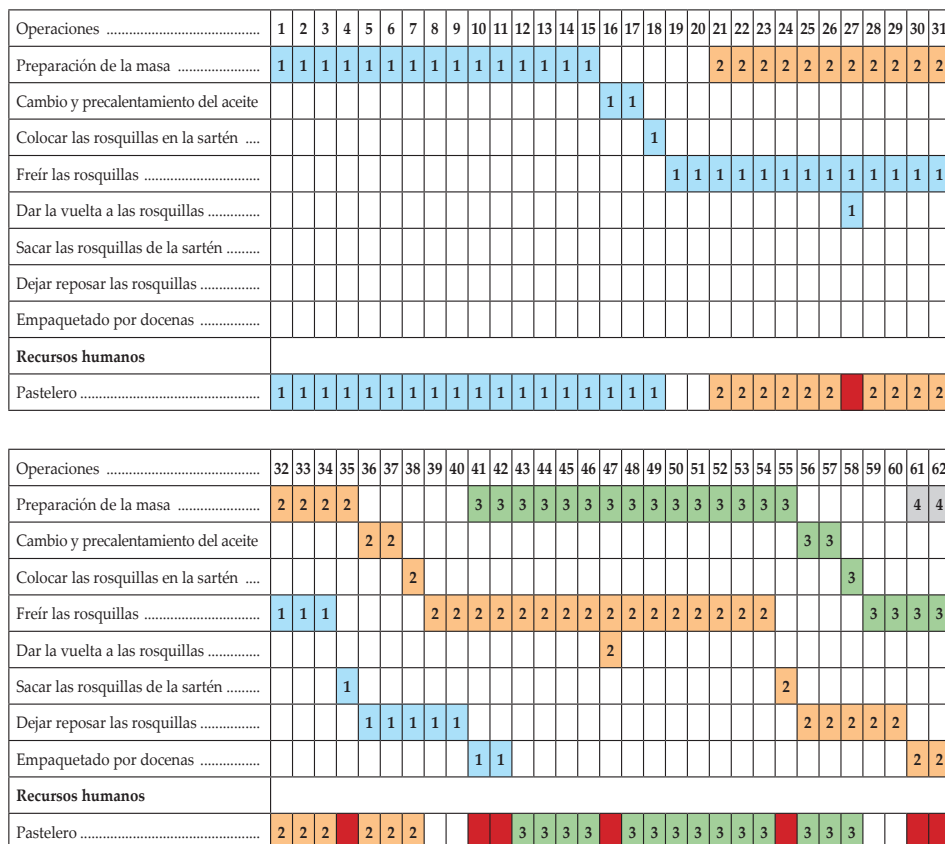
¿Necesitará ayuda el pastelero para mantener este ritmo de producción?

Analizando el gráfico de Gantt y la carga de trabajo del pastelero se podrá determinar si es necesaria la ayuda y para qué tareas. Los minutos que están en rojo en la carga de trabajo del pastelero, es porque debería realizar dos tareas simultáneamente para poder acabar a tiempo todos los lotes. Esos minutos con sobrecarga son en los que el pastelero debería tener ayuda para poder seguir el tiempo de ciclo de 20 minutos.

.../...

.../...

Figura 5. Diagrama de Gantt del proceso



Los minutos con sobrecarga corresponden justo a las siguientes operaciones:

- Dar la vuelta a las rosquillas (1 minuto).
- Sacar las rosquillas de la sartén (1 minuto).
- Empaquetado (2 minutos).

Son en total 4 minutos, que se repetirán a lo largo de todos los ciclos (20 minutos). Por tanto, en una hora sería necesaria una ayuda puntual en 12 minutos de media.

Como el ayudante está ocupado solo la mitad del tiempo, podría emplearse al mismo para realizar estas operaciones.

.../...

.../...

¿Qué beneficio obtiene el pastelero por día de trabajo si vendiese todos los lotes?

Se va a analizar para las 6 horas que permanece abierta al día la tienda, con la antigua situación:

- Número de lotes producidos: 12.
- Número de docenas de rosquillas: $12 \times 3 = 36$.
- Precio de venta al público de la docena de rosquillas: 5 euros.
- Coste de las materias primas por docena de rosquillas: 1 euro.
- Beneficio por docena: $5 - 1 = 4$ euros.
- Beneficio de las 36 docenas: $36 \times 4 = 144$ euros.
- Coste del ayudante: 6 horas \times 8 euros/hora = 48 euros.
- Coste del alquiler diario: 12 euros.

Beneficio bruto diario: $144 - 48 - 12 = 84$ euros

Se va a analizar para las 6 horas que permanece abierta al día la tienda, con la nueva situación:

- Número de lotes producidos: 16.
- Número de docenas de rosquillas: $16 \times 3 = 48$.
- Precio de venta al público de la docena de rosquillas: 5 euros.
- Coste de las materias primas de la docena de rosquillas: 1 euro.
- Beneficio por docena: $5 - 1 = 4$ euros.
- Beneficio de las 48 docenas: $48 \times 4 = 192$ euros.
- Coste del ayudante: 6 horas \times 8 euros/hora = 48 euros.
- Coste del alquiler diario: 12 euros.

Beneficio bruto diario: $192 - 48 - 12 = 132$ euros

Mejora de beneficios diaria: $132 - 84 = 48$ euros

En porcentaje: $48/84 \rightarrow 57\%$ de aumento de beneficio

¿Cómo se podría mejorar el proceso?

Lo primero que se debe hacer es actuar sobre el cuello de botella, como en este caso es la sartén industrial, se debería analizar el efecto de tener dos sartenes en lugar de una. La capacidad/hora de la sartén se duplicará y quedará la siguiente tabla.

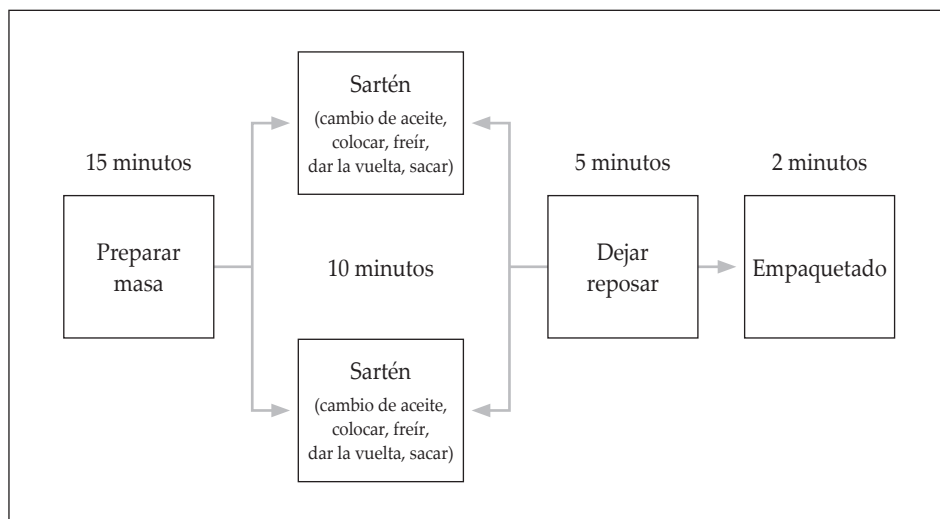
.../...

.../...

El nuevo cuello de botella será la preparación de la masa de las rosquillas, siendo el nuevo tiempo de ciclo para las tres docenas de rosquillas de 15 minutos.

Conjuntos de operaciones que acaparan el mismo recurso	Minutos	Capacidad/hora
Preparación de la masa de las rosquillas	15	4
Sartén (precalentamiento, colocar, freír y sacar)	10	6
Reposado de las rosquillas	5	12
Empaquetado de las rosquillas	2	30

Figura 6. Diagrama del proceso mejorado



Con el tiempo de ciclo de 15 minutos, los lotes se terminarán acorde a la siguiente tabla. El primer lote se terminará a los 42 minutos, y se terminará uno nuevo cada 15 minutos.

En 6 horas se podrían acabar 22 lotes de 3 docenas de rosquillas cada uno.

Eso sí, habría que realizar un análisis de los recursos humanos necesarios para poderlo llevar a buen término, ya que ahora hay que atender dos sartenes en lugar de una.

.../...

.../...

Pedido	Minutos
Pedido 1	42
Pedido 2	57
Pedido 3	72
Pedido 4	87
Pedido 5	102
Pedido 6	117
Pedido 7	132
Pedido 8	147

Pedido	Minutos
Pedido 9	162
Pedido 10	177
Pedido 11	192
Pedido 12	207
Pedido 13	222
Pedido 14	237
Pedido 15	252
Pedido 16	267

Pedido	Minutos
Pedido 17	282
Pedido 18	297
Pedido 19	312
Pedido 20	327
Pedido 21	342
Pedido 22	357

Para ver si se tienen los recursos humanos necesarios para lograr terminar los lotes a tiempo, habría que analizar mediante un diagrama de Gantt y un gráfico de carga la ayuda que necesitaría el pastelero.

El siguiente paso sería atacar al nuevo cuello de botella: la preparación de la masa de las rosquillas.

Hay que conseguir que su capacidad pase de 4 lotes/hora a 6 lotes/hora (de la sartén). Para ello habría que analizar si existe alguna manera de lograr que el tiempo de preparación sea de 10 minutos por lote. Las posibilidades son:

- Reducir directamente el tiempo mediante la inclusión de más recursos humanos en la operación.
- Adquirir una nueva amasadora.
- Subcontratar la masa de rosquillas.
- Etcétera.

Conjuntos de operaciones que acaparan el mismo recurso	Minutos	Capacidad/hora
Preparación de la masa de las rosquillas	15	4
Sartén (precalentamiento, colocar, freír y sacar)	10	6
Reposado de las rosquillas	5	12
Empaquetado de las rosquillas	2	30

2. TEORÍA DE LAS RESTRICCIONES

La teoría de las restricciones fue popularizada por el libro escrito por M. Goldratt y J. Cox, titulado *The goal (La meta)*. A partir de la historia de una empresa dedicada a la manufactura, el autor nos va llevando por diversos conceptos como «cuello de botella», «restricción» y «utilidad», consiguiendo la manera de optimizar la producción.

Esta teoría parte de que para la fabricación de un producto o la prestación de un servicio hay que realizar un conjunto de pasos con una secuencia determinada. Cada paso tendrá su limitación de capacidad, y aquellas que limiten la capacidad total del proceso serán una restricción.

En el libro citado se expone una analogía entre el ritmo productivo de una fábrica y una excursión de *boy scouts* por el campo. Para ello utiliza los términos de «tambor», «buffer» o «amortiguador» y «cuerda». El tambor equivale al ritmo o velocidad de producción. Para un mayor detalle de estos elementos se recomienda su lectura.

Figura 7. Ejemplo de restricción bloqueada



Fuente: <http://smithsmachine.com/pro>

2.1. CLASIFICACIÓN DE LAS RESTRICCIONES

Stephen N. Chapman en el libro *Planificación y control de la producción* (2006) identificó que se pueden clasificar las restricciones en función de la causa que motiva el cuello de botella:

- **Restricción bloqueada.** Se da cuando no hay espacio físico disponible para situar los *outputs* de ese paso del proceso. Será necesario poner un *buffer* o respaldo de espacio tras la restricción.
- **Restricción hambrienta.** Sucede cuando ese paso del proceso productivo no recibe suficientes *inputs* como para poder producir a su capacidad. Será necesario poner un respaldo de tiempo antes de esta restricción.
- **Restricción rota.** Sucede cuando la maquinaria usada en un paso del proceso se avería frecuentemente. Habrá que establecer un plan de mantenimiento preventivo para evitar estas paradas del proceso.

2.2. PASOS DE LA TEORÍA DE LAS RESTRICCIONES

La aplicación de la teoría de las restricciones se basa en los siguientes cinco pasos, extraídos del libro *La meta* de M. Goldratt y J. Cox (1992):

- **«PASO 1. Identificar los cuellos de botella del sistema».** Para identificar los cuellos de botella o restricciones hay que realizar un análisis de todos los procesos involucrados en la producción.
- **«PASO 2. Decidir cómo explotar los cuellos de botella».** Hay que buscar la forma de que el cuello de botella o restricción deje de serlo.
- **«PASO 3. Subordinar todo lo demás a la decisión anterior».** La forma adoptada para explotar los cuellos de botella debe ir acompañada de todas las acciones complementarias que sean necesarias.
- **«PASO 4. Elevar los cuellos de botella del sistema».** Consiste en poner los medios necesarios para lograr explotar las restricciones y aumentar la capacidad.
- **«PASO 5. Si en un paso previo un cuello de botella se ha roto, volver al paso 1».** Cuando ya se ha logrado eliminar un cuello de botella o restricción, hay que volver al paso primero para identificar ahora cuál será el nuevo cuello de botella.



CONCEPTOS BÁSICOS

- Cuello de botella.
- Restricción.
- Restricción bloqueada.
- Restricción hambrienta.
- Restricción rota.
- Tiempo de ciclo.



ACTIVIDADES DE AUTOCOMPROBACIÓN

Enunciado 1

Características de un cuello de botella.

Enunciado 2

¿Qué se entiende por restricción bloqueada?

Enunciado 3. Cuellos de botella

Un pequeño taller artesanal de fabricación de muebles de madera, llamado Muebles artesanos, SA, tiene una línea de producción de sillas que está teniendo mucho éxito, y se quiere realizar un análisis exhaustivo de su sistema productivo para ver si se puede mejorar el proceso.

La descripción del proceso productivo y de los recursos necesarios es el siguiente:

- Se trabaja actualmente 8 horas diarias de lunes a sábado. La media de días laborables al mes será de 26 días.
- Al acabar cada día se podrán quedar operaciones del proceso a medias, que se continuarán al día siguiente.

¿En qué consiste el proceso?

1. **Selección de la madera.** Es necesario seleccionar la madera apropiada. Esto lleva unos 5 minutos por silla.
2. **Medición.** Sobre los tablones cepillados se efectuarán las medidas y puntos de corte para obtener cada una de las piezas de la silla que se fabricará. Para las mediciones se necesitan 30 minutos.
3. **Corte.** Una vez finalizada la medición, los tablones deben ser cortados con una sierra circular eléctrica y una sierra de calar. El corte de todos los tablones lleva 50 minutos.
4. **Ensamblado.** Una vez finalizado el corte, en esta fase se ensamblan las piezas correspondientes. Para ello se utilizará el taladro con el que se realizarán perforaciones que permitan ensamblar las piezas. El ensamblado se lleva a cabo en 40 minutos.
5. **Pulido.** Una vez que el mueble ha sido ensamblado se pasa a la fase de pulido con la lijadora eléctrica. Se necesitan 10 minutos para esta tarea.
6. **Embalaje.** Una vez que el mueble esté terminado, es necesario que cuente con una envoltura protectora para el traslado y entrega. El tiempo necesario son 10 minutos por silla.

El tiempo para todas las tareas descritas se da sobre la base de que cada tarea la realice un solo operario.

Para analizar el proceso productivo hay que resolver las siguientes cuestiones:

- a) Realizar el diagrama del proceso.
- b) ¿Cuánto tiempo se tarda en realizar la primera silla?
- c) ¿Cuál es el cuello de botella del proceso?

- d) ¿Cuál es el tiempo de ciclo del proceso?
- e) ¿Cuántas sillas se podrán producir al mes?
- f) ¿Cómo se podría mejorar el proceso?

Enunciado 4

Dado el siguiente proceso productivo para producir una unidad, cuyas operaciones a realizar son las siguientes, con sus tiempos y recursos utilizados, y en este orden:

- Operación 1: 10 minutos (operario 1).
- Operación 2: 20 minutos (operario 1).
- Operación 3: 15 minutos (operario 1).
- Operación 4: 25 minutos (operario 2).
- Operación 5: 30 minutos (operario 2).

El número medio de días de trabajo al mes es de 23, trabajando cada día 8 horas.

Hay que contestar a las siguientes preguntas:

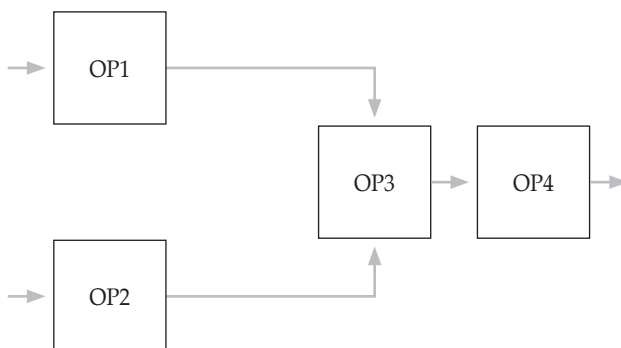
1. ¿Cuál es el cuello de botella, teniendo en cuenta los recursos humanos disponibles?
2. ¿Cuál es el tiempo de ciclo asociado a la pregunta 1?
3. ¿Cuál es la producción máxima que se puede obtener al mes asociada a la pregunta 1?
4. ¿Cuál es el cuello de botella, sin tener en cuenta los recursos humanos disponibles?
5. ¿Cuál es el tiempo de ciclo asociado a la pregunta 4?
6. ¿Cuál es la producción máxima que se puede obtener al mes asociada a la pregunta 4?
7. ¿Cuántos operarios serían necesarios para lograr esta producción máxima?
8. Partiendo de la situación original planteada en el enunciado, y sin tener en cuenta los recursos humanos: ¿cómo mejorarías el proceso? Razonar la respuesta exponiendo el nuevo tiempo de ciclo y la producción máxima.

Enunciado 5

Dado el siguiente proceso productivo para producir un lote de 100 unidades, cuyas operaciones a realizar son las siguientes, con sus tiempos y recursos utilizados:

- Operación 1: 10 minutos (técnico 1).
- Operación 2: 30 minutos (técnico 1).
- Operación 3: 15 minutos (técnico 2).
- Operación 4: 35 minutos (técnico 2).

Siendo la ruta la siguiente:



El número medio de días de trabajo al mes es de 23, trabajando cada día 8 horas.

Hay que contestar a las siguientes preguntas:

1. ¿Cuál es el cuello de botella, teniendo en cuenta los recursos humanos disponibles?
2. ¿Cuál es el tiempo de ciclo asociado a la pregunta 1?
3. ¿Cuál es la producción máxima que se puede obtener al mes asociada a la pregunta 1?
4. Realizar el diagrama de Gantt para esta situación.
5. ¿Cuál es el cuello de botella, sin tener en cuenta los recursos humanos disponibles?

6. ¿Cuál es el tiempo de ciclo asociado a la pregunta 5?
7. ¿Cuál es la producción máxima que se puede obtener al mes asociada a la pregunta 5?
8. ¿Cuántos operarios serían necesarios para lograr esta producción máxima?
9. Realizar el diagrama de Gantt para esta situación.

Enunciado 6

Se tiene el siguiente proceso productivo para producir un lote de 600 unidades. Las operaciones a realizar son las siguientes, con sus tiempos y recursos utilizados, y en este orden:

- Operación 1: 55 minutos (técnico 1).
- Operación 2: 5 minutos (técnico 1).
- Operación 3: 50 minutos (técnico 1).
- Operación 4: 20 minutos (técnico 1).
- Operación 5: 25 minutos (técnico 1).
- Operación 6: 40 minutos (técnico 2).

El número medio de días de trabajo al mes es de 28, trabajando cada día 10 horas.



Hay que contestar a las siguientes preguntas:

1. ¿Cuál es el cuello de botella, teniendo en cuenta los recursos humanos disponibles?
2. Si la primera unidad empieza en un tiempo $t = 0$, ¿en qué tiempo t empezará la cuarta unidad?
3. ¿Cuál es la producción máxima que se puede obtener al mes asociada a la pregunta 1?

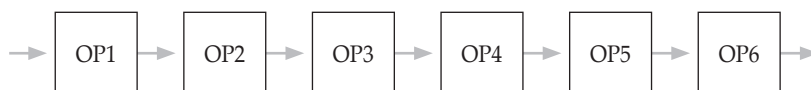
4. ¿Cuál es el cuello de botella, sin tener en cuenta los recursos humanos disponibles?
5. ¿Cuál es el tiempo de ciclo asociado a la pregunta 4?
6. ¿Cuál es la producción máxima que se puede obtener al mes asociada a la pregunta 4?
7. ¿Cuántos técnicos serían necesarios para lograr esta producción máxima?
8. ¿Cuál es la capacidad (en unidades/hora) asociada a la operación 5?

Enunciado 7

Se tiene el siguiente proceso productivo para producir un lote de 550 unidades. Las operaciones a realizar son las siguientes, con sus tiempos y recursos utilizados, y en este orden:

- Operación 1: 5 minutos (técnico 1).
- Operación 2: 20 minutos (técnico 1).
- Operación 3: 25 minutos (técnico 1).
- Operación 4: 20 minutos (técnico 2).
- Operación 5: 30 minutos (técnico 2).
- Operación 6: 20 minutos (técnico 2).

El número medio de días de trabajo al mes es de 23, trabajando cada día 14 horas.



Hay que contestar a las siguientes preguntas:

1. ¿Cuál es el cuello de botella, teniendo en cuenta los recursos humanos disponibles?
2. Si la primera unidad empieza en un tiempo $t = 0$, ¿en qué tiempo t empezará la cuarta unidad?

3. ¿Cuál es la producción máxima que se puede obtener al mes asociada a la pregunta 1?
4. ¿Cuál es el cuello de botella, sin tener en cuenta los recursos humanos disponibles?
5. ¿Cuáles el tiempo de ciclo asociado a la pregunta 4?
6. ¿Cuál es la producción máxima que se puede obtener al mes asociada a la pregunta 4?
7. ¿Cuántos técnicos serían necesarios para lograr esta producción máxima?
8. ¿Cuál es la capacidad (en unidades/hora) asociada a la operación 5?

Solución 1

- Es el recurso con menor capacidad en el proceso y determina la velocidad total del mismo.
- Es la restricción que determina la capacidad total del proceso y que habrá que arreglar/eliminar con prioridad.
- Normalmente, tiene muchos inventarios pendientes de procesar (cola de espera), ya que su velocidad es menor que la de los procesadores anteriores.
- Las etapas posteriores del proceso sufren retrasos que se traducen en tiempos de parada y, por tanto, en capacidad ociosa.

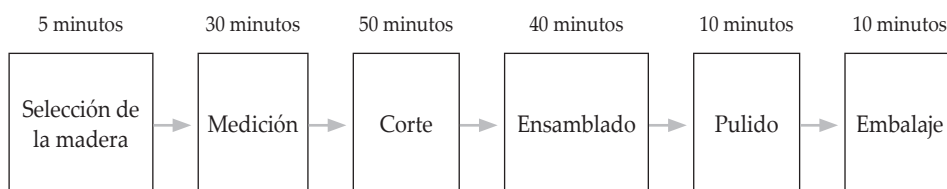
Solución 2

Se da cuando no hay espacio físico disponible para situar los *outputs* de ese paso del proceso. Será necesario poner un *buffer* o respaldo de espacio tras la restricción.

Solución 3. Cuellos de botella

a)

Figura 8. Diagrama del proceso



b) La primera silla se tardará la suma de todos los tiempos de todas las tareas, ya que son secuenciales: 145 minutos.

c) Para determinar el cuello de botella del proceso se va a determinar la capacidad por hora de cada operación, y los recursos necesarios para realizarla:

Código operación	Operación	Tiempo (minutos)	Recursos	Capacidad/hora
1	Selección de la madera	5		12
2	Medición	30		2
3	Corte	50	Sierra circular/sierra de calar	1,2
4	Ensamblado	40	Taladro	1,5
5	Pulido	10	Lijadora	6
6	Embalaje	10		6

Como no hay recursos que se utilicen en más de una operación, no serán restrictivos y no serán el cuello de botella. Entonces, el cuello de botella será aquella operación cuya capacidad por hora sea menor, en este caso el corte.

d) El tiempo de ciclo del proceso corresponde al tiempo del cuello de botella, el corte, por lo que será de 50 minutos. Eso implica que cada 50 minutos se fabricará una silla nueva.

Por tanto, si se empieza de cero las sillas se irán produciendo en los siguientes tiempos:

Silla número	Tiempo
1	145
2	195
3	245
4	295
5	345
...	...

e) Cada mes consta de 26 días laborables, con 8 horas diarias, por lo que en minutos se tendrá:

$$26 \times 8 \times 60 = 12.480 \text{ minutos}$$

Una vez que el sistema productivo está en marcha, se va a tener una silla nueva cada 50 minutos, por lo que el número de sillas que se podrán fabricar al mes serán:

$$12.480/50 = 249,6 \text{ sillas} \rightarrow 249 \text{ sillas}$$

f) Para mejorar el proceso se debería atacar el cuello de botella, el corte. Si se ponen dos líneas de corte en paralelo, mediante la compra de otro equipo y poniendo los recursos humanos necesarios, se duplicaría su capacidad y quedaría:

Código operación	Operación	Tiempo (minutos)	Recursos	Capacidad/hora
1	Selección de la madera	5		12
2	Medición	30		2
3	Corte	25	Sierra circular/sierra de calar	2,4
4	Ensamblado	40	Taladro	1,5
5	Pulido	10	Lijadora	6
6	Embalaje	10		6

El nuevo cuello de botella sería el ensamblado, y el nuevo tiempo de ciclo sería de 40 minutos. Por tanto, la nueva producción mensual sería:

$$12.480/40 = 312 \text{ sillas}$$

La mejora sería pasar de fabricar 249 sillas a fabricar 312, $312/249 \approx 1,25 \rightarrow 25\%$ de aumento de producción.

Solución 4

- Habría que obtener el tiempo que dedica cada uno de ellos a la realización de una unidad: operario 1: 45 minutos, operario 2: 55 minutos.

Por tanto, el cuello de botella, que será el que tenga más tiempo asignado, es el operario 2.

2. Es el asociado al operario 2: 55 minutos.
3. Se va a obtener el número de minutos que se tienen disponibles de trabajo al mes:
 - $\text{Días/mes} = 23.$
 - $\text{Horas/día} = 8.$
 - $\text{Horas/mes} = 23 \times 8 = 184.$
 - $\text{Minutos/mes} = 184 \times 60 = 11.040.$

La producción máxima se obtendrá como el tiempo total al mes dividido entre el tiempo de ciclo $= 11.040/55 = 200,72 \rightarrow 200$ unidades.

4. Si no se tienen en cuenta los recursos humanos, habrá que analizar cada una de las operaciones. La que tenga mayor tiempo será el cuello de botella. En este caso es la operación 5, con 30 minutos.
5. 30 minutos.
6. La producción máxima se obtendrá como el tiempo total al mes dividido entre el nuevo tiempo de ciclo $= 11.040/30 = 368$ unidades.
7. Hay que agrupar las operaciones según el tiempo de ciclo de 30 minutos. Cada operario no puede hacer más de 30 minutos. Una posible distribución sería:
 - Operario 1: operación 1 (10 minutos) y operación 2 (20 minutos). Total 30 minutos.
 - Operario 2: operación 3 (15 minutos).
 - Operario 3: operación 4 (25 minutos).
 - Operario 4: operación 5 (30 minutos).

Por tanto se necesitan cuatro operarios.

8. Atacando el cuello de botella, que es la operación 5. Se podría duplicar el puesto de trabajo de la operación 5, con lo que el tiempo medio de esa operación bajaría a 15 minutos.

El nuevo cuello de botella sería la operación 4, que es la que tiene el siguiente mayor tiempo \rightarrow tiempo de ciclo: 25 minutos.

$$\text{Producción máxima} = 11.040/25 = 441,6 \rightarrow 441 \text{ unidades.}$$

Solución 5

1. Habrá que obtener el tiempo que dedica cada uno de ellos a la realización de una unidad: técnico 1: 40 minutos, técnico 2: 50 minutos.

Por tanto, el cuello de botella, que será el que tenga más tiempo asignado, es el técnico 2.

2. Es el asociado al técnico 2: 50 minutos.
3. Se va a obtener el número de minutos que se tienen disponibles de trabajo al mes:
 - Días/mes = 23.
 - Horas/día = 8.
 - Horas/mes = $23 \times 8 = 184$.
 - Minutos/mes = $184 \times 60 = 11.040$.

La producción máxima se obtendrá como el tiempo total al mes dividido entre el tiempo de ciclo = $11.040/50 = 220,8 \rightarrow 220$ lotes de 100 unidades. Por tanto, 22.000 unidades.

4. Diagrama de Gantt: debe transcurrir exactamente el tiempo de ciclo entre el comienzo de una unidad y de la siguiente:

Operaciones	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120	125	130	135	140	145	150	
1	1	1									2	2									3	3									
2			1	1	1	1	1	1					2	2	2	2	2	2					3	3	3	3	3	3	3		
3									1	1	1								2	2	2								3	3	
4												1	1	1	1	1	1	1					2	2	2	2	2	2	2		
Técnico																															
Técnico 1																															
Técnico 2																															

5. Si no se tienen en cuenta los recursos humanos, habrá que analizar cada una de las operaciones. La que tenga mayor tiempo será el cuello de botella. En este caso es la operación 4, con 35 minutos.
6. 35 minutos.

7. La producción máxima se obtendrá como el tiempo total al mes dividido entre el nuevo tiempo de ciclo = $11.040/35 = 315,42 \rightarrow 315$ lotes de 100 unidades. Por tanto, 31.500 unidades.
8. Hay que agrupar las operaciones según el tiempo de ciclo de 35 minutos, siguiendo su orden de realización. Hay que tener en cuenta que las operaciones 1 y 2 se hacen en paralelo y hasta que no acaben no puede empezar la operación 3. Cada técnico no puede hacer más de 35 minutos. Una posible distribución sería:
 - Técnico 1: operación 1 y operación 3 (10 + 15 = 25 minutos).
 - Técnico 2: operación 2 (30 minutos).
 - Técnico 3: operación 4 (35 minutos).

Por tanto se necesitan tres operarios.

9. Diagrama de Gantt: debe transcurrir exactamente el tiempo de ciclo entre el comienzo de un lote y del siguiente. Un posible diagrama de Gantt sería:

Operaciones	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120	125	130	135	140	145	150
1				1	1							2	2						3	3						4	4			
2	1	1	1	1	1	1		2	2	2	2	2	2		3	3	3	3	3	3		4	4	4	4	4	4		5	5
3							1	1	1					2	2	2					3	3	3					4	4	4
4										1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3
Técnico																														
Técnico 1																														
Técnico 2																														
Técnico 3																														

Solución 6

1. Habrá que obtener el tiempo que dedica cada uno de ellos a la realización de una unidad: técnico 1: 155 minutos, técnico 2: 40 minutos.

Por tanto, el cuello de botella será el técnico que tenga más tiempo asignado: técnico 1.

¿Cuál es el tiempo de ciclo asociado? Es el asociado al cuello de botella: 155 minutos.

2. Entre el comienzo de una unidad y la siguiente debe transcurrir exactamente el tiempo de ciclo.

La cuarta unidad comenzará en $t = 0 + 155 + 155 + 155 = 465$ minutos.

3. Se va a obtener el número de minutos que se tienen disponibles de trabajo al mes:

- Días/mes: 28
- Horas/día: 10
- Horas/mes: 280
- Minutos/mes: 16.800

La producción máxima se obtendrá dividiendo el tiempo total al mes entre el tiempo de ciclo: $16.800/155 = 108,39$ lotes.

Como cada lote tiene 600 unidades, la producción máxima será aproximadamente de 65.032 unidades.

4. Si no se tienen en cuenta los recursos humanos, habrá que analizar cada una de las operaciones. La que tenga mayor tiempo será el cuello de botella. En este caso es la operación 1, con 55 minutos. Todas aquellas operaciones que tengan este tiempo también serán cuellos de botella del sistema.
5. Es el asociado al nuevo cuello de botella: 55 minutos.
6. La producción máxima se obtendrá dividiendo el tiempo total al mes entre el nuevo tiempo de ciclo: $16.800/55 = 305,45$ lotes.

Como cada lote tiene 600 unidades, la producción máxima será aproximadamente de 183.273 unidades.

7. Hay que agrupar las operaciones siguiendo su orden de realización, según el tiempo de ciclo de 55 minutos. Cada técnico no puede hacer más de 55 minutos. Por tanto, se necesitan 4 técnicos:
 - Técnico 1: operación 1 (55 minutos).
 - Técnico 2: operación 2 + operación 3 (55 minutos).
 - Técnico 3: operación 4 + operación 5 (45 minutos).
 - Técnico 4: operación 6 (40 minutos).

8. La capacidad se calculará dividiendo los 60 minutos que tiene 1 hora entre el tiempo asociado a la operación. En este caso: $60/25 = 2,4$ lotes/hora. Como cada lote tiene 600 unidades, la capacidad será aproximadamente de 1.440 unidades/hora.

Solución 7

1. Habrá que obtener el tiempo que dedica cada uno de ellos a la realización de una unidad: técnico 1: 50 minutos, técnico 2: 70 minutos.

Por tanto, el cuello de botella será el técnico que tenga más tiempo asignado: técnico 2.

¿Cuál es el tiempo de ciclo asociado? Es el asociado al cuello de botella: 70 minutos.

2. Entre el comienzo de una unidad y la siguiente debe transcurrir exactamente el tiempo de ciclo.

La cuarta unidad comenzará en $t = 0 + 70 + 70 + 70 = 210$ minutos.

3. Se va a obtener el número de minutos que se tienen disponibles de trabajo al mes:

- Días/mes: 23
- Horas/día: 14
- Horas/mes: 322
- Minutos/mes: 19.320

La producción máxima se obtendrá dividiendo el tiempo total al mes entre el tiempo de ciclo $= 19.320/70 = 276$ lotes.

Como cada lote tiene 550 unidades, la producción máxima será aproximadamente de 151.800 unidades.

4. Si no se tienen en cuenta los recursos humanos, habrá que analizar cada una de las operaciones. La que tenga mayor tiempo será el cuello de botella. En este caso es la operación 5, con 30 minutos. Todas aquellas operaciones que tengan este tiempo también serán cuellos de botella del sistema.

5. Es el asociado al nuevo cuello de botella: 30 minutos.
6. La producción máxima se obtendrá dividiendo el tiempo total al mes entre el nuevo tiempo de ciclo = $19.320/30 = 644$ lotes.

Como cada lote tiene 550 unidades, la producción máxima será aproximadamente de 354.200 unidades.

7. Hay que agrupar las operaciones siguiendo su orden de realización, según el tiempo de ciclo de 30 minutos. Cada técnico no puede hacer más de 30 minutos. Por tanto, se necesitan 5 técnicos:
 - Técnico 1: operación 1 + operación 2 (25 minutos).
 - Técnico 2: operación 3 (25 minutos).
 - Técnico 3: operación 4 (20 minutos).
 - Técnico 4: operación 5 (30 minutos).
 - Técnico 5: operación 6 (20 minutos).
8. La capacidad se calculará dividiendo los 60 minutos que tiene 1 hora entre el tiempo asociado a la operación. En este caso: $60/30 = 2$ lotes/hora. Como cada lote tiene 550 unidades, la capacidad será aproximadamente de 1.100 unidades/hora.



EJERCICIOS VOLUNTARIOS

1. ¿Qué se entiende por tiempo de ciclo?
2. ¿Qué pasos hay que seguir para aplicar la teoría de las restricciones?



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Básica

CEF. *Dirección de operaciones*, del Máster en Dirección de Negocios Internacionales, Madrid, CEF, 2010.

Chapman, S. N. *Planificación y control de la producción*, México, Pearson Education, 2006.

Davis, M. M.; Aquilano, N. J. y Chase, R. B. *Fundamentals of operations management*, International Edition, McGraw-Hill, 1999.

— *Administración de producción y operaciones. Manufactura y servicios*, Santa Fe de Bogotá, McGraw-Hill, 2000.

Domínguez Machuca, J. A. et al. *Dirección de operaciones. Aspectos tácticos y operativos en la producción y los servicios*, Madrid, McGraw-Hill, 1995.

Goldratt, E. M. y Cox, J. *The goal: a process of ongoing improvement*, North River Press, 1992.

Rajadell, M. y Sánchez, J. L. *Lean manufacturing. La evidencia de una necesidad*, Madrid, Ediciones Díaz de Santos, 2010.

En la red

<<http://ingenieriametodos.blogspot.com>>

<<http://www.goldrattconsulting.com/>>

<www.leanmanufacturing.org/>

Avanzada

Gaither, N. y Frazier, G. *Administración de producción y operaciones*, México, Thomson Editores, 2000.

Heizer, J. y Render, B. *Dirección de la producción. Decisiones operativas*, Madrid, Pearson Education, 2001.