

## CAPÍTULO

## 8

*JOB-SHOP*

## Objetivos del capítulo

1. Introducción a la producción en *job-shop*
2. Reglas de prioridad
  - 2.1. Regla de Johnson para N pedidos (P) y 2 máquinas (A, B)
  - 2.2. Regla de Jackson para 2 máquinas (A, B), N pedidos (P) y rutas aleatorias
  - 2.3. Reglas de asignación en *job-shop* con N máquinas o procesadores, rutas aleatorias y plazos de entrega

## Conceptos básicos

## Actividades de autocomprobación

## Ejercicios voluntarios

## Referencias bibliográficas



## OBJETIVOS DEL CAPÍTULO

Este capítulo se centra en aspectos muy destacados relacionados con la organización de la producción a corto plazo; en concreto para la producción tipo *job-shop* destacamos los siguientes objetivos:

- Determinar el tipo de problema que se está estudiando.
- Conocer las reglas que solucionan ese tipo de problema.
- Saber aplicar de manera práctica las reglas en cuestión y proponer la programación de los distintos pedidos en las máquinas.

Para alcanzar estos objetivos, se ha organizado este capítulo en diferentes epígrafes.

Se va a comenzar introduciendo la producción *job-shop*. A continuación, en función de la problemática asociada, se van a estudiar los tres tipos de problemas clásicos dentro del *job-shop*. El primer tipo es aquel en el que se tienen que programar una serie de pedidos que deben pasar por dos máquinas, siendo la ruta la misma para todos ellos. Con la regla de Johnson se determina la solución para esta casuística.

El siguiente tipo es aquel en el que también hay una serie de pedidos que pasan por dos máquinas, pero la ruta ya puede ser distinta (aleatoria). Se explicará la regla de Jackson que hace frente a estos problemas.

Por último se estudiará la asignación en *job-shop*, cuando se tienen múltiples pedidos, que deben ser procesados por varias máquinas, y las rutas de los pedidos son aleatorias.

## 1. INTRODUCCIÓN A LA PRODUCCIÓN EN *JOB-SHOP*

La forma de producción en *job-shop* es la más compleja en cuanto al control de la actividad de producción. Se basa en fabricar lotes bajo pedido del cliente, normalmente con un tamaño pequeño del lote. Cada lote tendrá una secuencia o ruta, que será la resultante por las máquinas o procesadores por los que pasa, en un orden determinado. En ocasiones los lotes tendrán un plazo de entrega.

En este caso hay que determinar el orden en que se van a realizar los distintos pedidos por cada una de las máquinas por las que deben procesarse. Para ello hay que utilizar unas reglas de prioridad, que se aplicarán en función del tipo de *job-shop* que se quiera analizar.

## 2. REGLAS DE PRIORIDAD

Las reglas de prioridad que se utilizan en *job-shop* dependen del número de máquinas que se utilizan, así como de la existencia de distintas secuencias de procesamiento de los pedidos y la existencia de plazos de entrega para los pedidos. Las reglas más usadas se explican a continuación.

### 2.1. REGLA DE JOHNSON PARA N PEDIDOS (P) Y 2 MÁQUINAS (A, B)

Se tiene la ruta AB; es decir, el pedido tiene que pasar primero por la máquina A, y posteriormente por la máquina B.

1. De entre todos los pedidos  $P_i$ , se elige aquel que tenga menor tiempo de procesamiento en una de las 2 máquinas. En caso de empate se escoge aleatoriamente.
2. Si el tiempo pertenece a la primera máquina de la secuencia A, ese pedido  $P_i$  debe procesarse delante de todos. Si pertenece a la segunda máquina de la secuencia B, se debe procesar detrás de todos los pedidos.
3. Repetir los pasos 1 y 2 hasta que no queden más pedidos.

## 2.2. REGLA DE JACKSON PARA 2 MÁQUINAS (A, B), N PEDIDOS (P) Y RUTAS ALEATORIAS

Para la máquina A, se procesarán los pedidos en el siguiente orden:

1. Ordenar los pedidos cuya ruta es AB por la regla de Johnson.
2. Ordenar los pedidos que solo pasan por A por el menor tiempo de procesamiento del pedido.
3. Ordenar los pedidos cuya ruta es BA por la regla de Johnson.

Para la máquina B, se procesarán los pedidos con el siguiente orden:

1. Ordenar los pedidos cuya ruta es BA por la regla de Johnson.
2. Ordenar los pedidos que solo pasan por B por el menor tiempo de procesamiento del pedido.
3. Ordenar los pedidos cuya ruta es AB por la regla de Johnson.

## 2.3. REGLAS DE ASIGNACIÓN EN JOB-SHOP CON N MÁQUINAS O PROCESADORES, RUTAS ALEATORIAS Y PLAZOS DE ENTREGA

Para decidir qué pedido se procesa en una máquina, se van a determinar los pedidos candidatos en función de su secuencia. Para elegir de entre los candidatos, se aplicará una de las siguientes holguras, y se escogerá aquel cuya holgura sea menor:

- **Holgura total del pedido i:**

$$\begin{aligned} HTi &= \text{Fecha de entrega del pedido } i - \text{Fecha actual} - \\ &- \text{Tiempo de procesamiento que le falta al pedido } i \end{aligned}$$

- **Holgura relativa del pedido i:**

$$HRi = HTi / \text{Tiempo de procesamiento que le falta al pedido } i$$

- **Holgura media del pedido i:**

$$HMi = HTi / \text{Número de operaciones que le faltan por realizar al pedido } i$$

### EJEMPLO 1. Producción en job-shop con 2 máquinas o procesadores y rutas aleatorias

Se quiere realizar el control de la actividad de producción de los siguientes 8 pedidos en 2 máquinas, en los que se especifica la secuencia (orden de las máquinas por las que tiene que pasar), así como el tiempo necesario en cada máquina, en horas. Determinar el orden de procesamiento en cada máquina para que la duración total sea la menor posible.

Tiempo de procesamiento (horas)

Pedido	A	B	Secuencia
1	2	-	A
2	2	6	AB
3	3	-	A
4	5	5	BA
5	5	3	AB
6	1	4	BA
7	-	2	B
8	-	3	B

### Solución

Se aplica la regla de Jackson para 2 máquinas (A, B), N pedidos y rutas aleatorias.

Se comienza secuenciando la **máquina A**:

1. Ordenar los pedidos cuya ruta es AB por la regla de Johnson.

Pedido	A	B	Secuencia
2	2	6	AB
5	5	3	AB

De entre todos los pedidos P2 y P5, se elige aquel que tenga menor tiempo de procesamiento en una de las 2 máquinas. En caso de empate se escoge aleatoriamente. Será el pedido 2 en A.

..../....

.../...

Como el tiempo pertenece a la primera máquina en la secuencia, el pedido 2 debe procesarse delante de todos.

Por tanto, el orden será: P2-P5.

2. Ordenar los pedidos que solo pasan por A, por el menor tiempo de procesamiento del pedido.

Pedido	A	B	Secuencia
1	2	-	A
3	3	-	A

Se tienen los pedidos 1 y 3. Como el que tiene menor tiempo de procesamiento es el pedido 1, el orden será: P1-P3.

3. Ordenar los pedidos cuya ruta es BA por la regla de Johnson.

Pedido	A	B	Secuencia
4	5	5	BA
6	1	4	BA

De entre todos los pedidos P4 y P6, se elige aquel que tenga menor tiempo de procesamiento en una de las 2 máquinas. En caso de empate se escoge aleatoriamente. Será el pedido 6 en A.

Como el tiempo pertenece a la segunda máquina en la secuencia (BA), el pedido 6 debe procesarse el último de todos.

Por tanto, el orden será: P4-P6.

**El orden de procesamiento de la máquina A quedará: P2-P5-P1-P3-P4-P6.**

Para la **máquina B**, se procesarán los pedidos en el siguiente orden:

1. Ordenar los pedidos cuya ruta es BA por la regla de Johnson.  
Será el mismo orden establecido para la máquina A: P4-P6.
2. Ordenar los pedidos que solo pasan por B, por el menor tiempo de procesamiento del pedido.

.../...

.../...

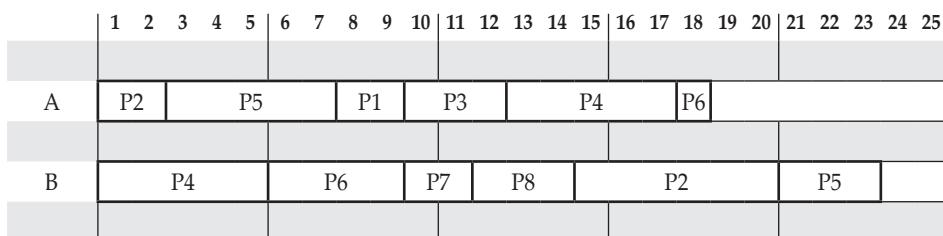
Pedido	A	B	Secuencia
7	-	2	B
8	-	3	B

Se tienen los pedidos 7 y 8. Como el que tiene menor tiempo de procesamiento es el pedido 7, el orden será: P7-P8.

3. Ordenar los pedidos cuya ruta es AB por la regla de Johnson. Será el mismo orden establecido para la máquina A: P2-P5

**El orden de procesamiento de la máquina B quedará: P4-P6-P7-P8-P2-P5.**

El diagrama de Gantt quedará:



Se tarda 23 horas en total. Y las horas de finalización de cada pedido serán:

Pedido	Fin
1	9
2	20
3	12
4	17
5	23
6	18
7	11
8	14

### EJEMPLO 2. Producción en job-shop con N máquinas o procesadores, rutas aleatorias y plazos de entrega

Empezando en un tiempo  $t = 0$  y habiendo elegido una regla de prioridad principal y otras secundarias, los pasos que se seguirán en estos casos son:

1. Actualizar tabla de secuencias.
2. Para ese tiempo  $t$ , analizar qué máquinas están libres para poder ser asignadas.
3. Hay que determinar los pedidos candidatos a cada máquina libre, en función de su secuencia de procesamiento y del grado de realización del mismo.
4. En caso de haber más de un pedido candidato a una máquina, se aplica la regla de prioridad principal para determinar qué pedido es el elegido en esa máquina. En caso de empate se aplicarían las reglas secundarias.
5. Asignar los pedidos elegidos a las máquinas y actualizar el diagrama de Gantt.
6. Determinar el próximo tiempo  $t$  que se va a analizar. Será aquel en que primero se quede libre una máquina.
7. Volver al paso 1.

En este ejemplo se quiere realizar el control de la actividad de producción de los siguientes 3 pedidos, en los que se especifica su secuencia (orden de las máquinas por las que tiene que pasar), el tiempo necesario en cada máquina y el plazo de entrega.

Todos los tiempos, así como el plazo de entrega, vienen dados en horas.

La regla de prioridad que se va a usar es la holgura total. En caso de empate se elige aquel que tenga menor tiempo de procesamiento en la máquina, y si el empate persiste, aquel pedido que le falte menos tiempo para terminar:

Pedido	A	B	C	Secuencia	Plazo
1	5	2	2	BCA	13
2	2	3	1	BAC	7
3	1	2	4	ACB	10

#### Solución

Se van a ir analizando para todos los tiempos en que haya alguna máquina libre qué pedidos se pueden procesar.

.../...

.../...

**t = 0**

Se va a transformar la tabla dada en otra en la que se ponga la secuencia de cada pedido y los tiempos de procesado entre paréntesis. La llamaremos tabla de secuencias:

Pedido	Secuencia			Plazo
1	B (2)	C (2)	A (5)	13
2	B (3)	A (2)	C (1)	7
3	A (1)	C (4)	B (2)	10

En un principio ninguna máquina está ocupada, por lo que se analizará para las máquinas A, B y C qué pedidos pueden procesarse, y en caso de haber más de un pedido candidato a ocupar la máquina, se obtendrá la holgura total. El que tenga menor holgura total será el pedido elegido.

Para determinar los pedidos candidatos a cada máquina, se analiza la tabla anterior. Mirando las secuencias, el pedido 3 empieza por la máquina A, y los pedidos 1 y 2 empiezan por la máquina B:

Máquina	Candidatos	Holgura total	Elegido
A	P3		P3
B	P1 P2	13 – 9 = 4 7 – 6 = 1	P2
C	–		Vacía

Para obtener la holgura de cada pedido se calcula como:

$$\begin{aligned} \text{Holgura total} &= \text{Plazo de entrega} - \text{Tiempo actual } t - \\ &- \text{Tiempo que queda de procesamiento al pedido} \end{aligned}$$

Por ejemplo, para el pedido 1:

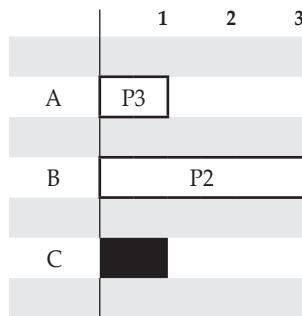
El tiempo que queda de procesamiento al pedido es la suma de todos los tiempos que faltan para finalizar el pedido. En este caso, como no se ha procesado nada todavía, será: 5 horas de la máquina A, más 2 horas de la máquina B, más 2 horas de la máquina C. En total 9 horas.

.../...

.../...

$$\text{Holgura total} = \text{Plazo entrega (13)} - \text{Tiempo actual } t(0) - \\ - \text{Tiempo que queda de procesamiento al pedido (9)} = 4$$

Una vez que ya se saben los pedidos seleccionados en cada máquina, hay que llenar el diagrama de Gantt correspondiente. El pedido 3 va a estar 1 hora en la máquina A, y el pedido 2 estará 3 horas en la máquina B:



Ahora, el siguiente tiempo que se va a analizar será aquel en que alguna máquina se quede libre. En el diagrama anterior se ve que en  $t = 1$  se va a quedar libre la máquina A.

 **$t = 1$** 

La tabla de secuencias también debe actualizarse en función del estado de los pedidos asignados. En  $t = 1$  el pedido 2 en B todavía se está procesando (en naranja), mientras que el pedido 3 en la máquina A ya ha finalizado (en azul). De esta forma, viendo esta tabla se sabrá el grado de avance de cada pedido, y qué partes de ellos se están procesando en este determinado tiempo:

Pedido	Secuencia			Plazo
1	B (2)	C (2)	A (5)	13
2	B (3)	A (2)	C (1)	7
3	A (1)	C (4)	B (2)	10

A partir de esta tabla, las conclusiones que se deben sacar son:

- Pedido 1. Es candidato a la máquina B (primera máquina de la secuencia).
- Pedido 2. Está ahora mismo procesándose en la máquina B.

.../...

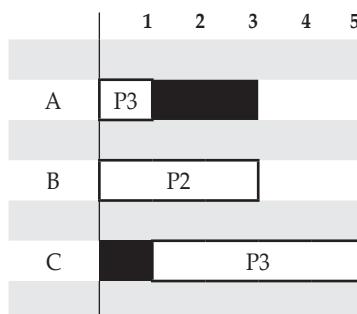
.../...

- Pedido 3. Como ya ha finalizado en la máquina A, es candidato a la máquina C que es la siguiente en la secuencia.

Con todo esto se obtienen los pedidos elegidos para cada máquina, recordando que la máquina B está ocupada ahora mismo con el pedido 2. Si hay varios candidatos, se escogen aquellos con menor holgura total:

Máquina	Candidatos	Holgura total	Elegido
A	-		Vacía
C	P3		P3

Una vez que ya se saben los pedidos seleccionados en cada máquina, hay que llenar el diagrama de Gantt correspondiente. El pedido 3 va a estar 4 horas en la máquina C:



Como ya se ha comentado, el siguiente tiempo que se va a analizar será aquel en que alguna máquina se quede libre. En el gráfico anterior se ve que en  $t = 3$  se va a quedar libre la máquina B.

$t = 3$

La tabla de secuencias también debe actualizarse en función del estado de los pedidos asignados. En  $t = 3$  el pedido 3 en C todavía se está procesando (en naranja), mientras que el pedido 2 en la máquina B ya ha finalizado (en azul).

De esta forma, viendo esta tabla se sabrá el grado de avance de cada pedido, y qué partes de ellos se están procesando en este determinado tiempo:

.../...

.../...

Pedido	Secuencia			Plazo
1	B (2)	C (2)	A (5)	13
2	B (3)	A (2)	C (1)	7
3	A (1)	C (4)	B (2)	10

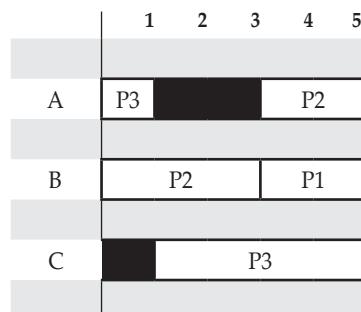
A partir de esta tabla, las conclusiones que se deben sacar son:

- Pedido 1. Es candidato a la máquina B (primera máquina de la secuencia).
- Pedido 2. Es candidato a la máquina A.
- Pedido 3. Está ahora mismo procesándose en la máquina C.

Con todo esto se obtienen los pedidos elegidos para cada máquina, recordando que la máquina C está ocupada ahora mismo con el pedido 3. Si hay varios candidatos, se escogen aquellos con menor holgura total:

Máquina	Candidatos	Holgura total	Elegido
A	P2		P2
B	P1		P1

Una vez que ya se saben los pedidos seleccionados en cada máquina, hay que rellenar el diagrama de Gantt correspondiente. El pedido 2 va a estar 2 horas en la máquina A y el pedido 1 va a estar 2 horas en la máquina B:



El siguiente tiempo que se va a analizar será aquel en que alguna máquina se quede libre. En el gráfico anterior se ve que en  $t = 5$  se van a quedar libres todas las máquinas.

.../...

.../...

**t = 5**

Han finalizado el pedido 2 en A, el pedido 1 en B y el pedido 3 en C.

Pedido	Secuencia			Plazo
1	B (2)	C (2)	A (5)	13
2	B (3)	A (2)	C (1)	7
3	A (1)	C (4)	B (2)	10

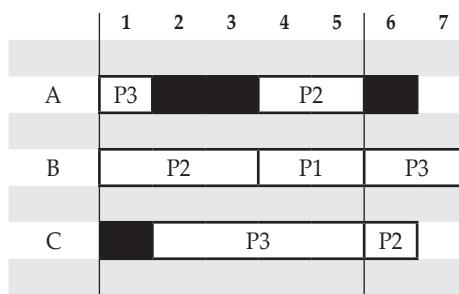
A partir de esta tabla, las conclusiones que se deben sacar son:

- Pedido 1. Es candidato a la máquina C.
- Pedido 2. Es candidato a la máquina C.
- Pedido 3. Es candidato a la máquina B.

La asignación será la siguiente:

Máquina	Candidatos	Holgura total	Elegido
A	-		Vacía
B	P3		P3
C	P1 P2	13 - 5 - 7 = 1 7 - 5 - 1 = 1	P2

Se ha seleccionado el P2 en C, ya que teniendo la misma holgura total que P1, tiene menor tiempo de procesamiento en esa máquina. El diagrama de Gantt quedará:



.../...

.../...

El siguiente tiempo en que se queda libre una máquina es  $t = 6$ .

**$t = 6$**

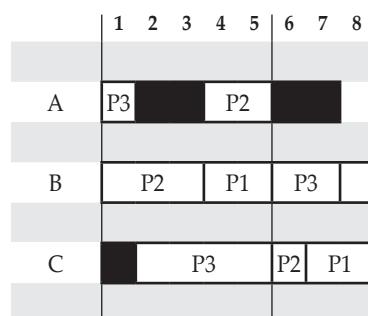
Actualizando la tabla de secuencias quedaría:

Pedido	Secuencia			Plazo
1	B (2)	C (2)	A (5)	13
2	B (3)	A (2)	C (1)	7
3	A (1)	C (4)	B (2)	10

Los pedidos candidatos a cada máquina serían:

Máquina	Candidatos	Holgura total	Elegido
A	-		Vacía
C	P1		P1

El diagrama de Gantt, incluyendo el pedido 1 a la máquina C, quedaría:



Ya únicamente queda por realizar el pedido 1 en la máquina A, con lo que el siguiente tiempo a estudiar será  $t = 8$ .

**$t = 8$**

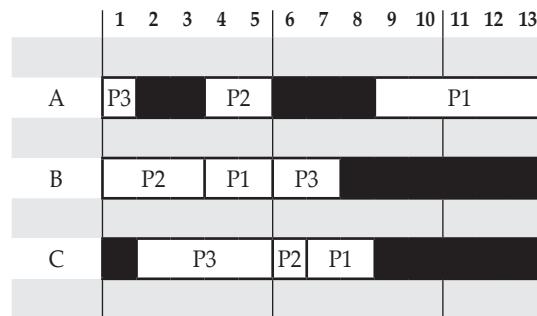
La tabla de secuencias actualizada, reflejando que el pedido 1 ya ha finalizado en la máquina C, será:

.../...

.../...

Pedido	Secuencia			Plazo
1	B (2)	C (2)	A (5)	13
2	B (3)	A (2)	C (1)	7
3	A (1)	C (4)	B (2)	10

Y asignando finalmente el pedido 1 a la máquina C, se habrá llegado a la solución.



En este caso no hay ningún retraso, ya que todos los pedidos finalizan dentro del plazo de entrega:

Pedido	Fin	Plazo	Retraso
1	13	13	-
2	6	7	-
3	7	10	-

### EJEMPLO 3. Producción en *job-shop* con N máquinas o procesadores, rutas aleatorias y plazos de entrega

Empezando en un tiempo  $t = 0$  y habiendo elegido una regla de prioridad principal y otras secundarias, los pasos que se seguirán en estos casos son:

.../...

.../...

1. Actualizar tabla de secuencias.
2. Para ese tiempo  $t$ , analizar qué máquinas están libres para poder ser asignadas.
3. Hay que determinar los pedidos candidatos a cada máquina libre, en función de su secuencia de procesamiento y del grado de realización del mismo.
4. En caso de haber más de un pedido candidato a una máquina, se aplica la regla de prioridad principal para determinar qué pedido es el elegido en esa máquina. En caso de empate se aplicarían las reglas secundarias.
5. Asignar los pedidos elegidos a las máquinas y actualizar el diagrama de Gantt.
6. Determinar el próximo tiempo  $t$  que se va a analizar. Será aquel en que primero se quede libre una máquina.
7. Volver al paso 1.

En este ejemplo se quiere realizar el control de la actividad de producción de los siguientes 5 pedidos, en los que se especifica su secuencia (orden de las máquinas por las que tiene que pasar), el tiempo necesario en cada máquina y el plazo de entrega. Todos los tiempos, así como el plazo de entrega, vienen dados en horas.

La regla de prioridad que se va a usar es la holgura total. En caso de empate se elige aquel que tenga menor tiempo de procesamiento en la máquina, y si el empate persiste, aquel pedido al que le falte menos tiempo para terminar:

Pedido	A	B	C	Secuencia	Plazo
1	2	4	3	ABC	15
2	3	1	4	CAB	12
3	2	–	5	AC	10
4	3	2	–	BA	11
5	6	2	4	BCA	19

### Solución

Se van a ir analizando para todos los tiempos en que haya alguna máquina libre qué pedidos se pueden procesar.

**$t = 0$**

Se va a transformar la tabla dada en otra en la que se ponga la secuencia de cada pedido y los tiempos de procesado entre paréntesis. La llamaremos tabla de secuencias:

.../...

.../...

Pedido	Secuencia			Plazo
1	A (2)	B (4)	C (3)	15
2	C (4)	A (3)	B (1)	12
3	A (2)	C (5)	-	10
4	B (2)	A (3)	-	11
5	B (2)	C (4)	A (6)	19

En un principio, ninguna máquina está ocupada, por lo que se analizará para las máquinas A, B y C qué pedidos pueden procesarse, y en caso de haber más de un pedido candidato a ocupar la máquina, se obtendrá la holgura total. El que tenga menor holgura total será el pedido elegido.

Para determinar los pedidos candidatos a cada máquina, se analiza la tabla anterior. Mirando las secuencias, los pedidos 1 y 3 empiezan por la máquina A, los pedidos 4 y 5 empiezan por la máquina B, y el pedido 2 empieza por la máquina C:

Máquina	Candidatos	Holgura total	Elegido
A	P1	$15 - 0 - 9 = 6$	P3
	P3	$10 - 0 - 7 = 3$	
B	P4	$11 - 0 - 5 = 6$	P4
	P5	$19 - 0 - 12 = 7$	
C	P2		P2

Para obtener la holgura de cada pedido se calcula como:

$$\text{Holgura total} = \text{Plazo de entrega} - \text{Tiempo actual } t - \\ - \text{Tiempo que queda de procesamiento al pedido}$$

Por ejemplo, para el pedido 1:

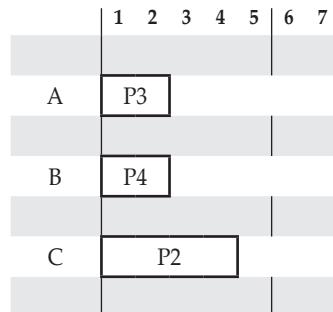
El tiempo que queda de procesamiento al pedido es la suma de todos los tiempos que faltan para finalizar el pedido. En este caso, como no se ha procesado nada todavía, será: 2 horas de la máquina A, más 4 horas de la máquina B, más 3 horas de la máquina C. En total 9 horas.

.../...

.../...

$$\text{Holgura total} = \text{Plazo entrega (15)} - \text{Tiempo actual } t(0) - \\ - \text{Tiempo que queda de procesamiento al pedido (9)} = 6$$

Una vez que ya se saben los pedidos seleccionados en cada máquina, hay que llenar el diagrama de Gantt correspondiente. El pedido 3 va a estar 2 horas en la máquina A, el pedido 4 estará 2 horas en la máquina B y el pedido 2 ocupará la máquina C 4 horas:



Ahora, el siguiente tiempo que se va a analizar será aquel en que alguna máquina se quede libre. En el diagrama anterior se ve que en  $t = 2$  se van a quedar libres las máquinas A y B, que serán las que analizaremos.

 **$t = 2$** 

La tabla de secuencias también debe actualizarse en función del estado de los pedidos asignados. En  $t = 2$  el pedido 2 en C todavía se está procesando (en naranja), mientras que los pedidos 3 y 4 en las máquinas A y B ya han finalizado (en azul). De esta forma, viendo esta tabla se sabrá el grado de avance de cada pedido, y qué partes de ellos se están procesando en este determinado tiempo:

Pedido	Secuencia			Plazo
1	A (2)	B (4)	C (3)	15
2	C (4)	A (3)	B (1)	12
3	A (2)	C (5)		10
4	B (2)	A (3)		11
5	B (2)	C (4)	A (6)	19

.../...

.../...

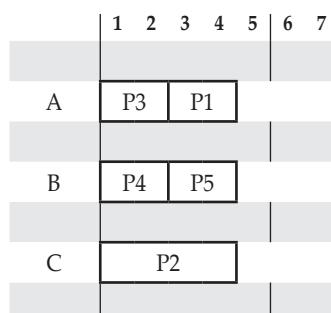
A partir de esta tabla, las conclusiones que se deben sacar son:

- Pedido 1. Es candidato a la máquina A (primera máquina de la secuencia).
- Pedido 2. Está ahora mismo procesándose en la máquina C.
- Pedido 3. Como ya ha finalizado en la máquina A, es candidato a la máquina C que es la siguiente en la secuencia.
- Pedido 4. Como ya ha finalizado en la máquina B, es candidato a la máquina A que es la siguiente en la secuencia.
- Pedido 5. Es candidato a la máquina B (segunda máquina de la secuencia).

Con todo esto se obtienen los pedidos elegidos para cada máquina, recordando que la máquina C está ocupada ahora mismo con el pedido 2. Se escogen aquellos con menor holgura total:

Máquina	Candidatos	Holgura total	Elegido
A	P1	$15 - 2 - 9 = 4$	P1
	P4	$11 - 2 - 3 = 6$	
B	P5		P5

Una vez que ya se saben los pedidos seleccionados en cada máquina, hay que rellenar el diagrama de Gantt correspondiente. El pedido 1 va a estar 2 horas en la máquina A y el pedido 5 ocupará la máquina B durante 2 horas:



Como ya se ha comentado, el siguiente tiempo que se va a analizar será aquel en que alguna máquina se quede libre. En el gráfico anterior se ve que en t = 4 se van a quedar libres todas las máquinas.

.../...

.../...

**t = 4**

La tabla de secuencias también debe actualizarse en función del estado de los pedidos asignados. El pedido 1 ha finalizado en la máquina A, el pedido 5 ha finalizado en la máquina B y el pedido 2 ha finalizado en la máquina C.

Pedido	Secuencia			Plazo
1	A (2)	B (4)	C (3)	15
2	C (4)	A (3)	B (1)	12
3	A (2)	C (5)		10
4	B (2)	A (3)		11
5	B (2)	C (4)	A (6)	19

Viendo esta tabla se van a sacar los pedidos candidatos a cada máquina, dependiendo de la secuencia:

- Pedido 1. Es candidato a la máquina B, ya que ha finalizado en la máquina A.
- Pedido 2. Es candidato a la máquina A, ya que ha finalizado en la máquina C.
- Pedido 3. Como ya ha finalizado en la máquina A, es candidato a la máquina C que es la siguiente en la secuencia.
- Pedido 4. Como ya ha finalizado en la máquina B, es candidato a la máquina A que es la siguiente en la secuencia.
- Pedido 5. Es candidato a la máquina C, ya que ha finalizado en la máquina B.

Con todo esto se obtienen los pedidos elegidos para cada máquina, escogiendo aquellos con menor holgura total. En caso de empate se elige aquel que tenga menor tiempo de procesamiento en la máquina, y si el empate persiste, aquel pedido al que le falte menos tiempo para terminar:

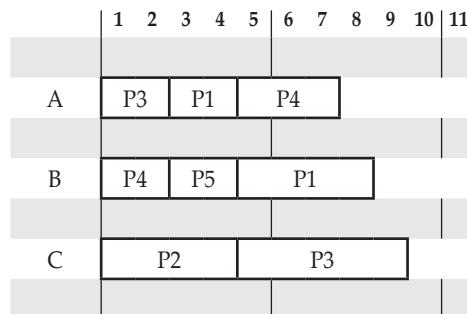
Máquina	Candidatos	Holgura total	Elegido
A	P2	$12 - 4 - 4 = 4$	P4
	P4	$11 - 4 - 3 = 4$	
B	P1		P1
C	P3	$10 - 4 - 5 = 1$	P3
	P5	$19 - 4 - 10 = 5$	

.../...

.../...

En la máquina A se selecciona el pedido 4, ya que teniendo la misma holgura total y el mismo tiempo de procesamiento en esa máquina, es al que le falta menos tiempo para terminar.

En el diagrama de Gantt se tendrá:



El siguiente tiempo en que se queda libre una máquina es  $t = 7$ , momento en el que el pedido 4 finaliza en la máquina A.

$$t = 7$$

Se actualiza la tabla de secuencias. El pedido 1 se está procesando en la máquina B (en naranja), el pedido 3 se está procesando en la máquina C (en naranja) y el pedido 4 ha finalizado en la máquina A (en azul).

Pedido	Secuencia			Plazo
1	A (2)	B (4)	C (3)	15
2	C (4)	A (3)	B (1)	12
3	A (2)	C (5)		10
4	B (2)	A (3)		11
5	B (2)	C (4)	A (6)	19

Los pedidos candidatos serán:

- Pedido 1. Se está procesando en la máquina B.
- Pedido 2. Es candidato a la máquina A, ya que ha finalizado en la máquina C.
- Pedido 3. Se está procesando en la máquina C.

.../...

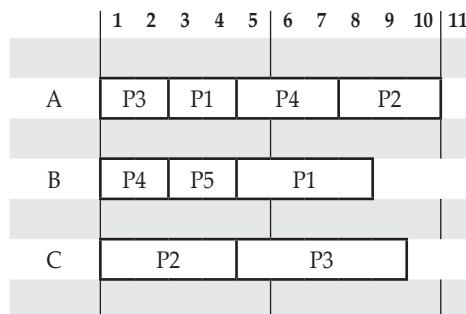
.../...

- Pedido 4. Ya ha finalizado este pedido.
- Pedido 5. Es candidato a la máquina C, ya que ha finalizado en la máquina B.

En  $t = 7$  la única máquina libre es la A:

Máquina	Candidatos	Holgura total	Elegido
A	P2		P2

Poniendo el pedido 2 en la máquina A, el diagrama de Gantt quedaría:



El siguiente tiempo en que se queda libre una máquina es  $t = 8$ , momento en el que el pedido 1 finaliza en la máquina B.

$t = 8$

Se actualiza la tabla de secuencias. El pedido 1 finaliza en la máquina B (en azul) y el pedido 2 se está procesando en la máquina A (en naranja).

Pedido	Secuencia			Plazo
1	A (2)	B (4)	C (3)	15
2	C (4)	A (3)	B (1)	12
3	A (2)	C (5)		10
4 (Finalizado)	B (2)	A (3)		11
5	B (2)	C (4)	A (6)	19

.../...

.../...

Los pedidos candidatos serán:

- Pedido 1. Es candidato a la máquina C, ya que ha finalizado en la máquina B.
- Pedido 2. Se está procesando en la máquina A.
- Pedido 3. Se está procesando en la máquina C.
- Pedido 5. Es candidato a la máquina C, ya que ha finalizado en la máquina B.

En  $t = 8$  la única máquina libre es la B y, como no hay pedidos candidatos, se queda libre.

El siguiente tiempo en que se queda libre una máquina es  $t = 9$ , momento en el que el pedido 3 finaliza en la máquina C.

**$t = 9$**

Se actualiza la tabla de secuencias:

Pedido	Secuencia			Plazo
1	A (2)	B (4)	C (3)	15
2	C (4)	A (3)	B (1)	12
3 (Finalizado)	A (2)	C (5)		10
4 (Finalizado)	B (2)	A (3)		11
5	B (2)	C (4)	A (6)	19

Los pedidos candidatos serán:

- Pedido 1. Es candidato a la máquina C, ya que ha finalizado en la máquina B.
- Pedido 2. Se está procesando en la máquina A.
- Pedido 5. Es candidato a la máquina C, ya que ha finalizado en la máquina B.

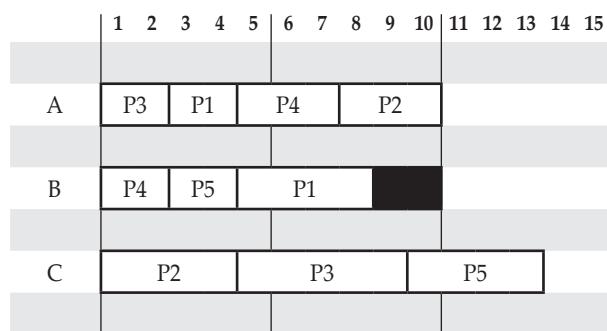
Las máquinas que hay libres en  $t = 9$  son la B y la C. Para la máquina B no hay pedidos candidatos por lo que seguirá vacía, y para la C:

Máquina	Candidatos	Holgura total	Elegido
C	P1 P5	$15 - 9 - 3 = 3$ $19 - 9 - 10 = 0$	P5

.../...

.../...

Asignando el pedido 5 a la máquina C se tendrá el siguiente diagrama de Gantt:



El siguiente tiempo en que se queda libre una máquina es  $t = 10$ , momento en el que el pedido 2 finaliza en la máquina A.

**$t = 10$**

Se actualiza la tabla de secuencias:

Pedido	Secuencia			Plazo
1	A (2)	B (4)	C (3)	15
2	C (4)	A (3)	B (1)	12
3 (Finalizado)	A (2)	C (5)		10
4 (Finalizado)	B (2)	A (3)		11
5	B (2)	C (4)	A (6)	19

Los pedidos candidatos serán:

- Pedido 1. Es candidato a la máquina C, ya que ha finalizado en la máquina B.
- Pedido 2. Es candidato a la máquina B, ya que ha finalizado en la máquina A.
- Pedido 5. Se está procesando en la máquina C.

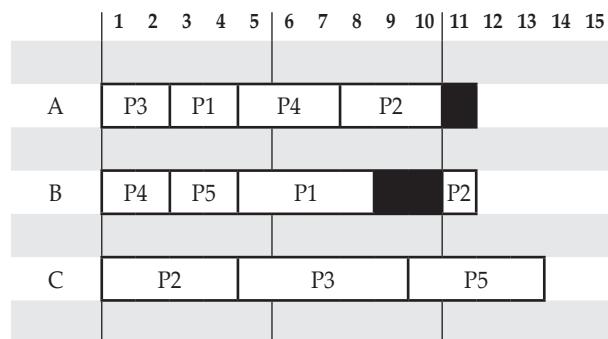
Las máquinas que hay libres en  $t = 10$  son la A y la B:

- Como no hay pedidos candidatos a la máquina A, se quedará vacía.
- Solo está el pedido 2 como candidato a la máquina B, por lo que será el elegido.

.../...

.../...

Con ello el diagrama de Gantt será:



El siguiente tiempo en que se queda libre una máquina es  $t = 11$ , momento en el que el pedido 2 finaliza en la máquina B.

**$t = 11$**

Se actualiza la tabla de secuencias:

Pedido	Secuencia			Plazo
1	A (2)	B (4)	C (3)	15
2 (Finalizado)	C (4)	A (3)	B (1)	12
3 (Finalizado)	A (2)	C (5)		10
4 (Finalizado)	B (2)	A (3)		11
5	B (2)	C (4)	A (6)	19

Los pedidos candidatos serán:

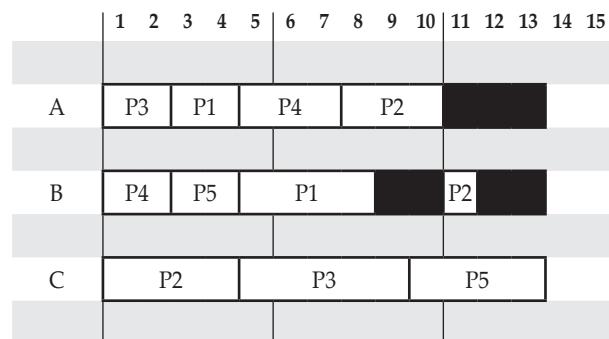
- Pedido 1. Es candidato a la máquina C, ya que ha finalizado en la máquina B.
- Pedido 5. Se está procesando en la máquina C.

Las máquinas que hay libres en  $t = 11$  son la A y la B:

- Como no hay pedidos candidatos a las máquinas A y B, se quedarán vacías.

.../...

.../...



En  $t = 13$  se queda libre la máquina C, ya que finaliza en ella el pedido 5.

$t = 13$

La tabla de secuencias quedará:

Pedido	Secuencia			Plazo
1	A (2)	B (4)	C (3)	15
2 (Finalizado)	C (4)	A (3)	B (1)	12
3 (Finalizado)	A (2)	C (5)		10
4 (Finalizado)	B (2)	A (3)		11
5	B (2)	C (4)	A (6)	19

Los pedidos candidatos serán:

- Pedido 1. Es candidato a la máquina C, ya que ha finalizado en la máquina B.
- Pedido 5. Es candidato a la máquina A, ya que ha finalizado en la máquina C.

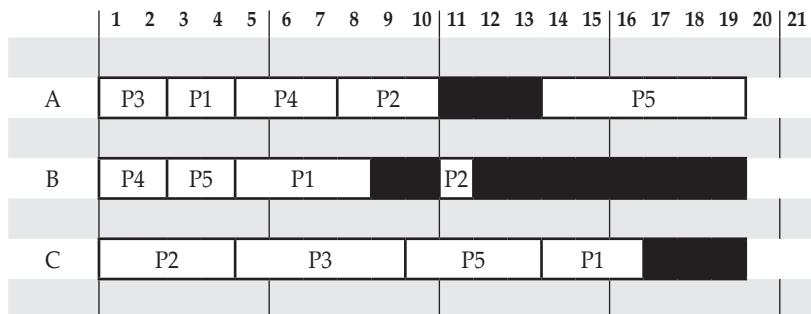
Las máquinas que hay libres en  $t = 13$  son todas:

- Solo está el pedido 5 como candidato a la máquina A, por lo que será el elegido.
- Como no hay pedidos candidatos a la máquina B, se quedará vacía.
- Solo está el pedido 1 como candidato a la máquina C, por lo que será el elegido.

Con esto ya estarán todas las secuencias de los pedidos asignadas, y el diagrama de Gantt final será:

.../...

.../...



Y los retrasos de los pedidos en función de su hora de fin y de su plazo de entrega serán:

Pedido	Fin	Plazo	Retraso
1	16	15	1 hora
2	11	12	
3	9	10	
4	7	11	
5	19	19	

Como se observa, solo el pedido 1 sufrirá retraso y será de 1 hora.



## CONCEPTOS BÁSICOS

- Control de la actividad de producción.
- Fecha de vencimiento.
- Holgura media.
- Holgura relativa.
- Holgura total.
- *Job-shop*.
- Regla de Jackson.
- Regla de Johnson.
- Tiempo de procesamiento más corto.



## ACTIVIDADES DE AUTOCOMPROBACIÓN

### Enunciado 1. *Job-shop con N máquinas o procesadores, rutas aleatorias y plazos de entrega*

Se quiere realizar el control de la actividad de producción de los siguientes 3 pedidos, en los que se especifica su secuencia (orden de las máquinas por las que tiene que pasar), el tiempo necesario en cada máquina y el plazo de entrega.

Todos los tiempos, así como el plazo de entrega, vienen dados en horas.

La regla de prioridad que se va a usar es la holgura total. En caso de empate se elige aquel que tenga menor tiempo de procesamiento en la máquina, y si el empate persiste, aquel pedido al que le falte menos tiempo para terminar.

Pedido	A	B	C	Secuencia	Plazo
1	3	4	2	ABC	12
2	2	3		BA	8
3	3	2	4	ACB	13

## Enunciado 2. Job-shop para 2 máquinas y rutas aleatorias

Se quiere realizar el control de la actividad de producción de los siguientes 10 pedidos en 2 máquinas, en los que se especifica su secuencia (orden de las máquinas por las que tiene que pasar), así como el tiempo necesario en cada máquina, que viene dado en horas. Determinar su orden de procesamiento en cada máquina para que la duración total sea la menor posible.

Tiempo de procesado

Pedido	A	B	Secuencia
1	2	3	AB
2	1	3	BA
3	4	2	AB
4	3	–	A
5	2	1	BA
6	–	2	B
7	4	4	AB
8	–	4	B
9	1	–	A
10	3	4	BA

## Enunciado 3. Job-shop con N máquinas o procesadores, rutas aleatorias y plazos de entrega

Se quiere realizar el control de la actividad de producción de los siguientes 6 pedidos, en los que se especifica su secuencia (orden de las máquinas por las que tiene que

pasar), el tiempo necesario en cada máquina y el plazo de entrega. Todos los tiempos, así como el plazo de entrega, vienen dados en horas.

La regla de prioridad que se va a usar es la holgura total. En caso de empate se elige aquel que tenga menor tiempo de procesamiento en la máquina, y si el empate persiste, aquel pedido al que le falte menos tiempo para terminar.

Tiempo de procesado

Pedido	A	B	C	Secuencia	Plazo
1	3	5	2	BCA	15
2	1	4	3	ABC	12
3	2	3	4	CAB	16
4	4	1	1	CBA	9
5	2	2	–	AB	10
6	–	3	4	BC	13

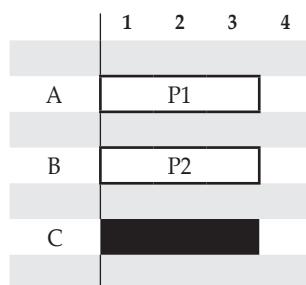
## Solución 1. Job-shop con N máquinas o procesadores, rutas aleatorias y plazos de entrega

Tabla de secuencias

Pedido	Secuencia			Plazo
1	A (3)	B (4)	C (2)	12
2	B (3)	A (2)		8
3	A (3)	C (4)	B (2)	13

**t = 0**

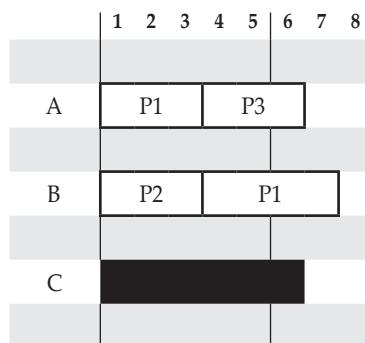
Máquina	Candidatos	Holgura total	Elegido
A	P1	$12 - 0 - 9 = 3$	P1
	P3	$13 - 0 - 9 = 4$	
B	P2		P2
C			Vacía



**t = 3**

Pedido	Secuencia			Plazo
1	A (3)	B (4)	C (2)	12
2	B (3)	A (2)		8
3	A (3)	C (4)	B (2)	13

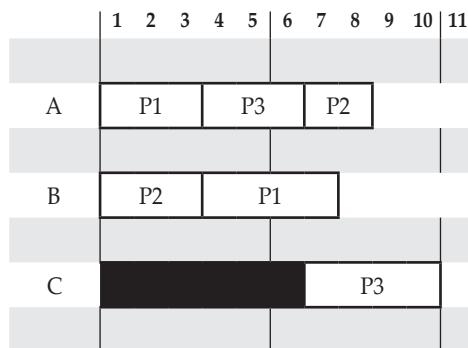
Máquina	Candidatos	Holgura total	Elegido
A	P2 P3	8 – 3 – 2 = 3 13 – 3 – 9 = 1	P3
B	P1		P1
C			Vacía



**t = 6**

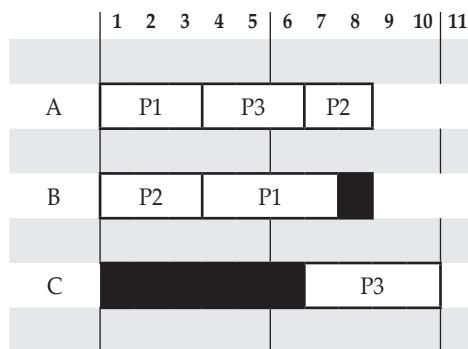
Pedido	Secuencia			Plazo
1	A (3)	B (4)	C (2)	12
2	B (3)	A (2)		8
3	A (3)	C (4)	B (2)	13

Máquina	Candidatos	Holgura total	Elegido
A	P2		P2
C	P3		P3

 **$t = 7$** 

Pedido	Secuencia			Plazo
1	A (3)	B (4)	C (2)	12
2	B (3)	A (2)		8
3	A (3)	C (4)	B (2)	13

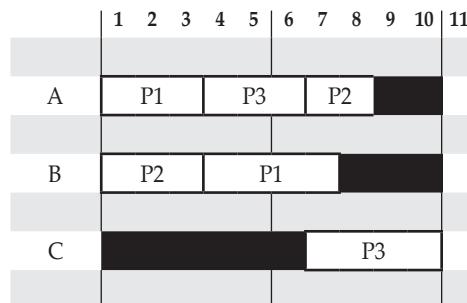
Máquina	Candidatos	Holgura total	Elegido
B			Vacía



**t = 8**

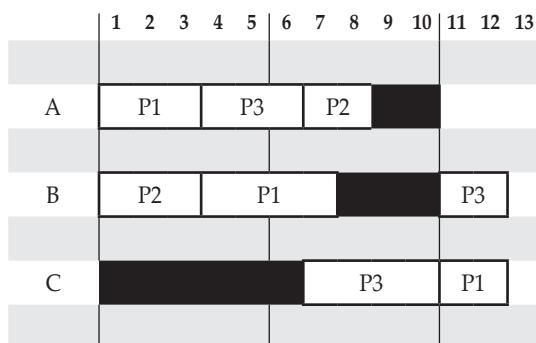
Pedido	Secuencia			Plazo
1	A (3)	B (4)	C (2)	12
2	B (3)	A (2)		8
3	A (3)	C (4)	B (2)	13

Máquina	Candidatos	Holgura total	Elegido
A			Vacía
C			Vacía

**t = 10**

Pedido	Secuencia			Plazo
1	A (3)	B (4)	C (2)	12
2	B (3)	A (2)		8
3	A (3)	C (4)	B (2)	13

Máquina	Candidatos	Holgura total	Elegido
A			Vacía
B	P3		P3
C	P1		P1



Pedido	Fin	Plazo	Retraso
1	12	12	No
2	8	8	No
3	12	13	No

## Solución 2. Job-shop para 2 máquinas y rutas aleatorias

Se aplica la regla de Jackson para 2 máquinas (A, B), N pedidos y rutas aleatorias.

Se comienza secuenciando la **máquina A**:

1. Ordenar los pedidos cuya ruta es AB por la regla de Johnson.

Pedido	A	B	Secuencia
1	2	3	AB
3	4	2	AB
7	4	4	AB

De entre todos los pedidos, P1, P3 y P7, se elige aquel que tenga menor tiempo de procesamiento en una de las 2 máquinas. En caso de empate se escoge aleatoriamente. Será el pedido 1 en A o el pedido 3 en B. Se empezará por el pedido 1.

Como el tiempo pertenece a la primera máquina en la secuencia, el pedido 1 debe procesarse delante de todos.

El siguiente tiempo mínimo es el pedido 3 en B. Como pertenece a la segunda máquina de la secuencia, debe procesarse el último. El pedido 7 irá entre los dos.

Por tanto, el orden será: P1-P7-P3.

2. Ordenar los pedidos que solo pasan por A, por el menor tiempo de procesamiento del pedido.

Pedido	A	B	Secuencia
4	3		A
9	1		A

Se tienen los pedidos 4 y 9. Como el que tiene menor tiempo de procesamiento es el pedido 9, el orden será: P9-P4.

3. Ordenar los pedidos cuya ruta es BA por la regla de Johnson.

Pedido	A	B	Secuencia
2	1	3	BA
5	2	1	BA
10	3	4	BA

De entre todos los pedidos, P2, P5 y P10, se elige aquel que tenga menor tiempo de procesamiento en una de las 2 máquinas. En caso de empate se escoge aleatoriamente. Será el pedido 2 en A o el pedido 5 en B. Se empezará por el pedido 5.

Como el tiempo pertenece a la primera máquina en la secuencia, el pedido 5 debe procesarse delante de todos.

El siguiente tiempo mínimo es el pedido 2 en A. Como pertenece a la segunda máquina de la secuencia, debe procesarse el último. El pedido 10 irá entre los dos.

Por tanto, el orden será: P5-P10-P2.

**El orden de procesamiento de la máquina A quedará: P1-P7-P3-P9-P4-P5-P10-P2.**

Para la **máquina B**, se procesarán los pedidos con el siguiente orden:

1. Ordenar los pedidos cuya ruta es BA por la regla de Johnson. Será el mismo orden establecido para la máquina A: P5-P10-P2.
2. Ordenar los pedidos que solo pasan por B, por el menor tiempo de procesamiento del pedido.

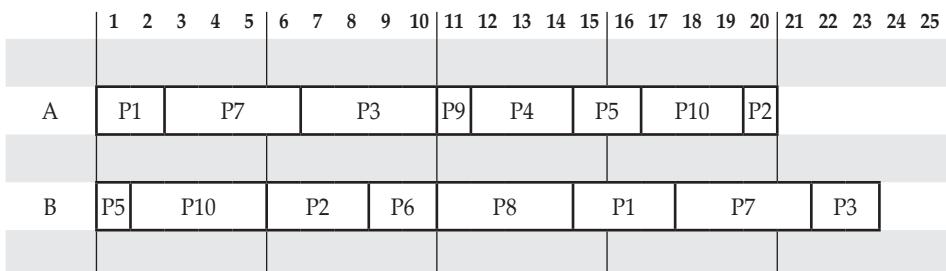
Pedido	A	B	Secuencia
6		2	B
8		4	B

Se tienen los pedidos 6 y 8. Como el que tiene menor tiempo de procesamiento es el pedido 6, el orden será: P6-P8.

3. Ordenar los pedidos cuya ruta es AB por la regla de Johnson. Será el mismo orden establecido para la máquina A: P1-P7-P3.

**El orden de procesamiento de la máquina B quedará: P5-P10-P2-P6-P8-P1-P7-P3.**

El diagrama de Gantt quedará:



El tiempo total es de 23 horas, y las horas de fin de cada pedido son:

Pedido	Fin
1	17
2	20
3	23
4	14
5	16
6	10
7	21
8	14
9	11
10	19

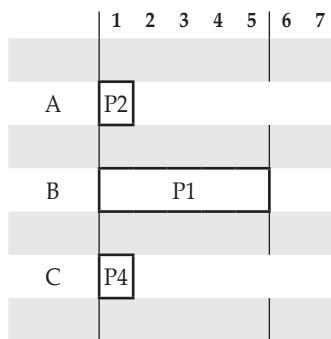
### Solución 3. Job-shop con N máquinas o procesadores, rutas aleatorias y plazos de entrega

Tabla de secuencias

Pedido	Secuencia			Plazo
1	B (5)	C (2)	A (3)	15
2	A (1)	B (4)	C (3)	12
3	C (4)	A (2)	B (3)	16
4	C (1)	B (1)	A (4)	9
5	A (2)	B (2)	–	10
6	B (3)	C (4)	–	13

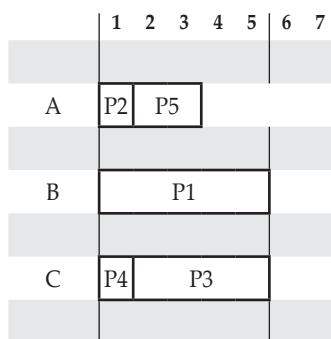
**t = 0**

Máquina	Candidatos	Holgura total	Elegido
A	P2	$12 - 0 - 8 = 4$	P2
	P5	$10 - 0 - 4 = 6$	
B	P1	$15 - 0 - 10 = 5$	P1
	P6	$13 - 0 - 7 = 6$	
C	P3	$16 - 0 - 9 = 7$	P4
	P4	$9 - 0 - 6 = 3$	

**t = 1**

Pedido	Secuencia			Plazo
1	B (5)	C (2)	A (3)	15
2	A (1)	B (4)	C (3)	12
3	C (4)	A (2)	B (3)	16
4	C (1)	B (1)	A (4)	9
5	A (2)	B (2)		10
6	B (3)	C (4)		13

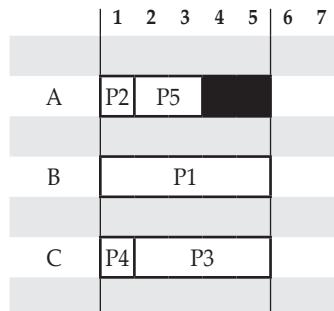
Máquina	Candidatos	Holgura total	Elegido
A	P5		P5
C	P3		P3



**t = 3**

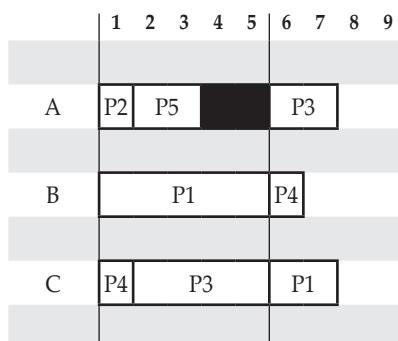
Pedido	Secuencia			Plazo
1	B (5)	C (2)	A (3)	15
2	A (1)	B (4)	C (3)	12
3	C (4)	A (2)	B (3)	16
4	C (1)	B (1)	A (4)	9
5	A (2)	B (2)		10
6	B (3)	C (4)		13

Máquina	Candidatos	Holgura total	Elegido
A	No hay		Vacía

**t = 5**

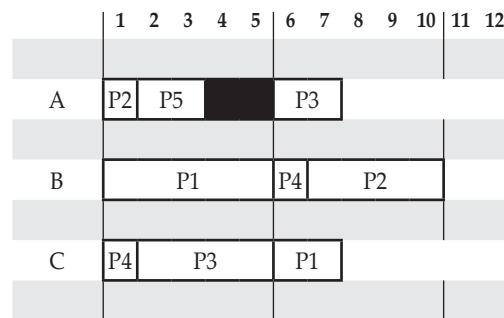
Pedido	Secuencia			Plazo
1	B (5)	C (2)	A (3)	15
2	A (1)	B (4)	C (3)	12
3	C (4)	A (2)	B (3)	16
4	C (1)	B (1)	A (4)	9
5	A (2)	B (2)		10
6	B (3)	C (4)		13

Máquina	Candidatos	Holgura total	Elegido
A	P3		P3
B	P2	$12 - 5 - 7 = 0$	P4
	P4	$9 - 5 - 5 = -1$	
	P5	$10 - 5 - 2 = 3$	
	P6	$13 - 5 - 7 = 1$	
C	P1		P1

**t = 6**

Pedido	Secuencia			Plazo
1	B (5)	C (2)	A (3)	15
2	A (1)	B (4)	C (3)	12
3	C (4)	A (2)	B (3)	16
4	C (1)	B (1)	A (4)	9
5	A (2)	B (2)		10
6	B (3)	C (4)		13

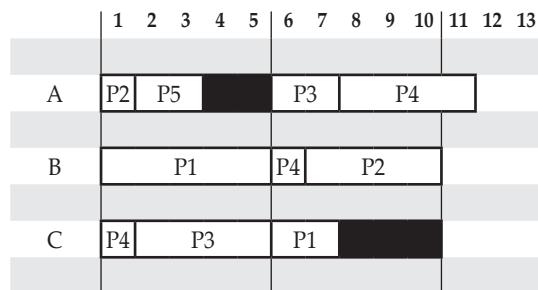
Máquina	Candidatos	Holgura total	Elegido
B	P2	$12 - 6 - 7 = -1$	P2
	P5	$10 - 6 - 2 = 2$	
	P6	$13 - 6 - 7 = 0$	



$t = 7$

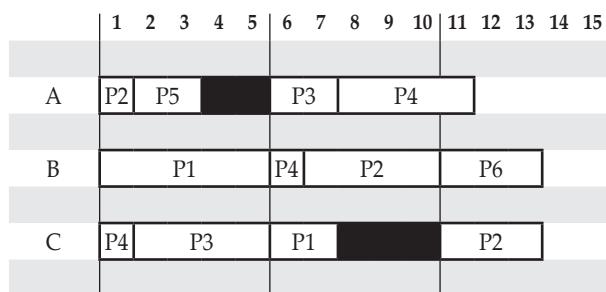
Pedido	Secuencia			Plazo
1	B (5)	C (2)	A (3)	15
2	A (1)	B (4)	C (3)	12
3	C (4)	A (2)	B (3)	16
4	C (1)	B (1)	A (4)	9
5	A (2)	B (2)		10
6	B (3)	C (4)		13

Máquina	Candidatos	Holgura total	Elegido
A	P1 P4	$15 - 7 - 3 = 5$ $9 - 7 - 4 = -2$	P4
C	No hay		Vacía

**t = 10**

Pedido	Secuencia			Plazo
1	B (5)	C (2)	A (3)	15
2	A (1)	B (4)	C (3)	12
3	C (4)	A (2)	B (3)	16
4	C (1)	B (1)	A (4)	9
5	A (2)	B (2)		10
6	B (3)	C (4)		13

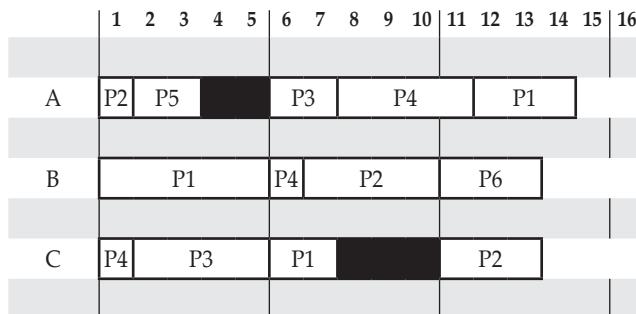
Máquina	Candidatos	Holgura total	Elegido
B	P3	16 - 10 - 3 = 3	
	P5	10 - 10 - 2 = -2	
	P6	13 - 10 - 7 = -4	P6
C	P2		P2



**t = 11**

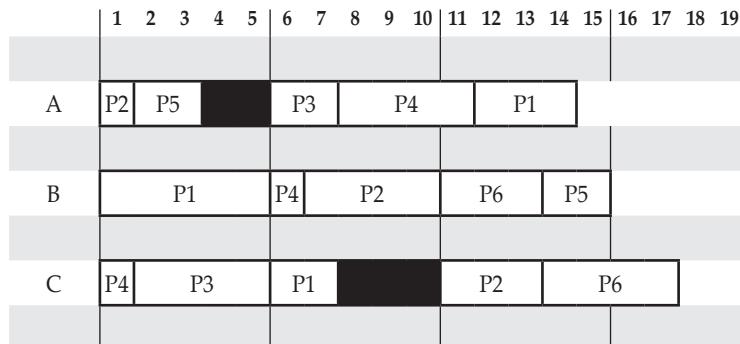
Pedido	Secuencia			Plazo
1	B (5)	C (2)	A (3)	15
2	A (1)	B (4)	C (3)	12
3	C (4)	A (2)	B (3)	16
4	C (1)	B (1)	A (4)	9
5	A (2)	B (2)		10
6	B (3)	C (4)		13

Máquina	Candidatos	Holgura total	Elegido
A	P1		P1

**t = 13**

Pedido	Secuencia			Plazo
1	B (5)	C (2)	A (3)	15
2	A (1)	B (4)	C (3)	12
3	C (4)	A (2)	B (3)	16
4	C (1)	B (1)	A (4)	9
5	A (2)	B (2)		10
6	B (3)	C (4)		13

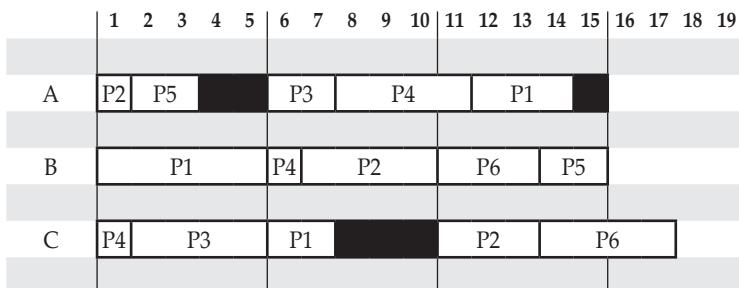
Máquina	Candidatos	Holgura total	Elegido
B	P3	$16 - 13 - 3 = 0$	P5
	P5	$10 - 13 - 2 = -5$	
C	P6		P6



**t = 14**

Pedido	Secuencia			Plazo
1	B (5)	C (2)	A (3)	15
2	A (1)	B (4)	C (3)	12
3	C (4)	A (2)	B (3)	16
4	C (1)	B (1)	A (4)	9
5	A (2)	B (2)		10
6	B (3)	C (4)		13

Máquina	Candidatos	Holgura total	Elegido
A	No hay		Vacía

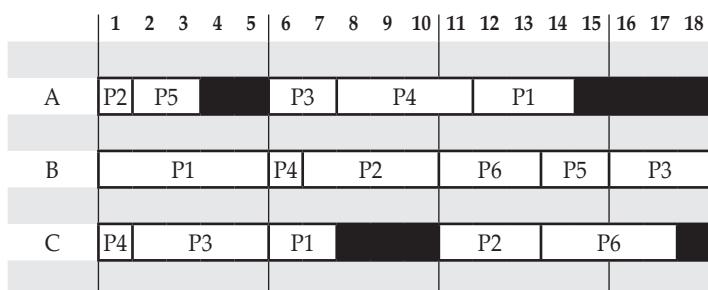


**t = 15**

Pedido	Secuencia			Plazo
1	B (5)	C (2)	A (3)	15
2	A (1)	B (4)	C (3)	12
3	C (4)	A (2)	B (3)	16
4	C (1)	B (1)	A (4)	9
5	A (2)	B (2)		10
6	B (3)	C (4)		13

Máquina	Candidatos	Holgura total	Elegido
A	No hay		Vacía
B	P3		P3

Y finalizando:



Pedido	Fin	Plazo	Retraso
1	14	15	
2	13	12	1 hora
3	18	16	2 horas
4	11	9	2 horas
5	15	10	5 horas
6	17	13	4 horas



## EJERCICIOS VOLUNTARIOS

1. ¿Qué se entiende por producción *job-shop*?
2. ¿Qué reglas de prioridad son las más habituales en el control de la actividad de producción?



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

### Básica

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

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

Peña Esteban, F. D. de la. *Dirección de la producción*, Madrid, CEF, 2011.

Peña Esteban, F. D. de la et al. *Problemas de organización industrial*, Madrid, Vision Net, 2005.

### FUNDAMENTOS DE DIRECCIÓN DE PRODUCCIÓN Y OPERACIONES

---

#### Avanzada

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