

Diseño de puestos de trabajo complejos. Equilibrado de la capacidad e interferencias.

Eduardo Vicens-Salort

Catedrático de Universidad
Unidad de investigación en Análisis y Mejora de la Productividad
Centro de Investigación de Gestión e Ingeniería de la Producción (CIGIP)
Universitat Politècnica de Valencia
evicens@cigip.upv.es

Carlos Andrés Romano

Profesor Titular de Universidad
Grupo en Reingeniería, Organización, Trabajo en Grupo y Logística Industrial
Departamento de Organización de Empresas
Universitat Politècnica de Valencia
candres@omp.upv.es

Cristobal Miralles Insa

Profesor Titular de Universidad
Grupo en Reingeniería, Organización, Trabajo en Grupo y Logística Industrial
Departamento de Organización de Empresas
Universitat Politècnica de Valencia
cmiralles@omp.upv.es

Marzo, 2015

Palabras clave: Ciclo de Trabajo, Tiempo de Ciclo, Capacidad de Producción, Tiempo de Ciclo Requerido, Takt-Time, Cantidad de Trabajo, Demora de Proceso, Demora Inherente, Tiempo Tipo, Work Standard, Productividad, Eficiencia, Utilización de los Recursos, Máquinas en Paralelo, Máquinas en Serie, Equilibrado de puestos de trabajo, Interferencias entre máquinas.

Índice:

1. Introducción
2. Puestos de trabajo complejos. Asignación multi-máquina. Interferencias.
 - 2.1. Asignación Multimáquina. Clasificación.
 - 2.2. Asignación con Atención Sistemática.
 - 2.3. Interferencia entre máquinas.
 - 2.4. Número ideal de máquinas. Sobreasignación y subasignación.
3. Asignación de máquinas con ciclos diferentes.
 - 3.1. Caso 1: Operario subasignado
 - 3.2. Caso 2: Operario sobreasignado
 - 3.3. Cálculo de los parámetros
4. Costes en asignaciones multimáquina.
 - 4.1. Máquinas con igual coste y 1 pieza por máquina.
5. Asignación con Atención Aleatoria.
6. Equilibrado de la capacidad.
 - 6.1. Tiempo de ciclo requerido o tiempo de tacto (Takt Time).
 - 6.2. Eliminación de la Demora Inherente y de la Demora de Máquinas por equilibrado del sistema.
 - 6.3. Conclusiones
7. Bibliografía.

1. INTRODUCCIÓN

En *Vicens-Salort, E. y otros* (2010) se estudió el diseño de Puestos de Trabajo Simples. Allí se establecían los Parámetros necesarios para caracterizar cada uno de ellos, definiendo dos tipos de parámetros, los que hacen referencia a la capacidad de producción a conseguir en el puesto (TC y Cap) y los que hacen referencia al consumo de los recursos involucrados (en el caso de la mano de obra, el WS con sus componentes QT, DP y DI; en el caso de máquinas, el TM y otras demoras) y por lo tanto a la productividad de éstos. Se analizaron diferentes casos de puestos de trabajo y su configuración en un sistema de fabricación, distinguiendo la configuración de Puestos de Trabajos Simples en Paralelo y de Puestos de Trabajo Simples en Serie. Se calcularon los dos tipos de parámetros para estas configuraciones y se concluyeron generalizaciones de estos cálculos. Al final se establecía que para incrementar la productividad de un recurso de fabricación, como la mano de obra, se podían utilizar dos estrategias. La primera, cuyo objetivo es reducir la demora de proceso (DP) del sistema, se podría basar en la asignación de varias máquinas a un mismo operario. La segunda, cuyo objetivo es reducir la demora inherente (DI) del sistema, se basaría en el equilibrado de las diferentes capacidades (Cap) y tiempos de ciclo (TC) entre los elementos que constituyen el sistema.

Aquí se pretenden estudiar estas dos estrategias de mejora de la productividad en un sistema de fabricación: la reducción de las demoras de procesos mediante Asignación Multimáquina y la reducción de la Demora Inherente mediante el Equilibrado y ajuste de los tiempos de ciclo al Tiempo de Ciclo Requerido (o Tackt Time) determinado por la demanda de los productos que se fabrican. Previamente se definen algunos conceptos nuevos como el de Puesto de Trabajo Complejo y el de Batería de recursos.

2. PUESTOS DE TRABAJO COMPLEJOS. ASIGNACIÓN MÚLTI-MÁQUINA. INTERFERENCIAS.

Se dirá que un **Puesto de trabajo** es **complejo** cuando intervienen diferentes recursos en la fabricación de uno o varios productos en ese puesto, con la característica que el trabajo de alguno de esos recursos (por ejemplo máquinas) depende o está condicionado por el trabajo de otros recursos (por ejemplo personas).

Se define como **Batería** de recursos al grupo de máquinas y personas que se analizan de forma conjunta y que constituyen el puesto de trabajo complejo.

En cada puesto de trabajo complejo estarán especificados (o habrá que hacerlo) los **Métodos** de trabajo que siguen cada uno de los recursos de la Batería y los **Tiempos** necesarios para realizar cada uno de los elementos que constituyan el conjunto de tareas, y a partir de ellos se podrán calcular y establecer los parámetros que caracterizarán el puesto: su TC o Cap y el consumo de recursos (WS, QT, DP, DI, TM, ...).

Se define el **Tiempo de Ciclo de la Batería** (TC_{bat}) como el tiempo entre dos estados idénticos sucesivos de la batería operario-máquinas entre los que se producen una o varias unidades del producto. En cada ciclo de la batería todas las tareas o elementos se repiten según el mismo ciclo de trabajo.

2.1. Asignación multi-máquina. Clasificación.

DE acuerdo con lo definido en un puesto de trabajo simple, y su representación en un diagrama de actividades múltiples (diagramas hombre-máquina), aparece la Demora de proceso (DP) cuando el operario debe esperar a que la máquina finalice su ciclo automático de operación para comenzar un nuevo ciclo de trabajo (fig. 1).

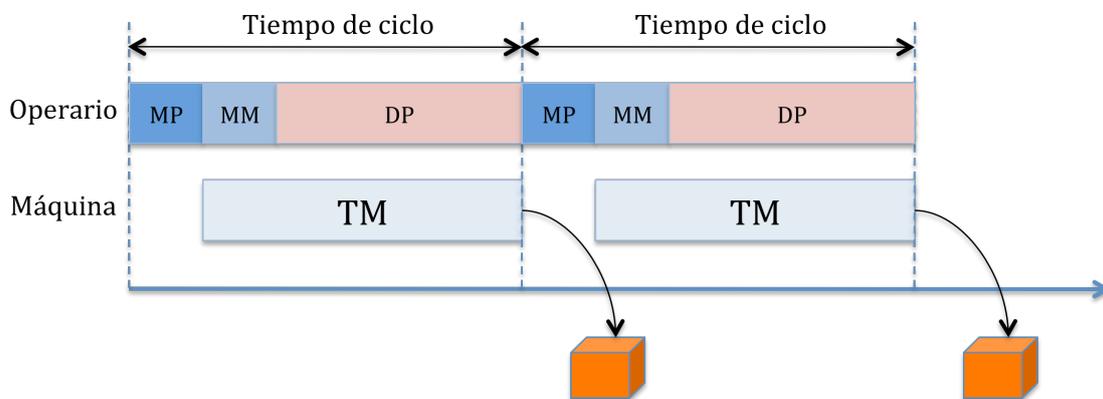


Figura 1. Puesto de trabajo simple

Se puede mejorar la productividad de la mano de obra (recurso) disminuyendo o eliminando la Demora de Proceso (DP) asignando al operario trabajo adicional en esos períodos.

Una forma de hacerlo es que el operario maneje otra (u otras) máquina de las mismas características (o diferentes).

Esto da lugar a lo que se denomina como **Problema de Asignación Multimáquina**.

Supóngase que se está diseñando un sistema de fabricación inicialmente compuesto por un puesto de trabajo simple y que se decide que el operario maneje otra máquina de las mismas características que la que está manejando, según la figura 2. Para ello, el método de trabajo definido consiste en que el operario realiza el MP de la primera máquina y la deja en funcionamiento, después realiza el MM de la primera máquina, a continuación realiza el MP de la segunda máquina y la pone en funcionamiento, y después realiza el MM de la segunda máquina, finalmente se espera a que la primera máquina acabe su ciclo automático para repetir de nuevo el ciclo de operaciones.

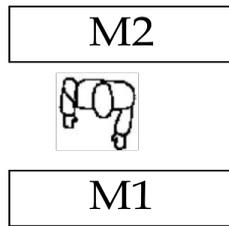


Figura 2. Puesto de trabajo con un operario manejando dos máquinas (complejo)

Supóngase que los datos del puesto de trabajo son MP=8 min.h/pieza; MM=5 min.h/pieza; TM=12 min.maq/pieza.

Al realizar el diagrama hombre-máquina del puesto de trabajo complejo se tendrá lo siguiente (figura 3):

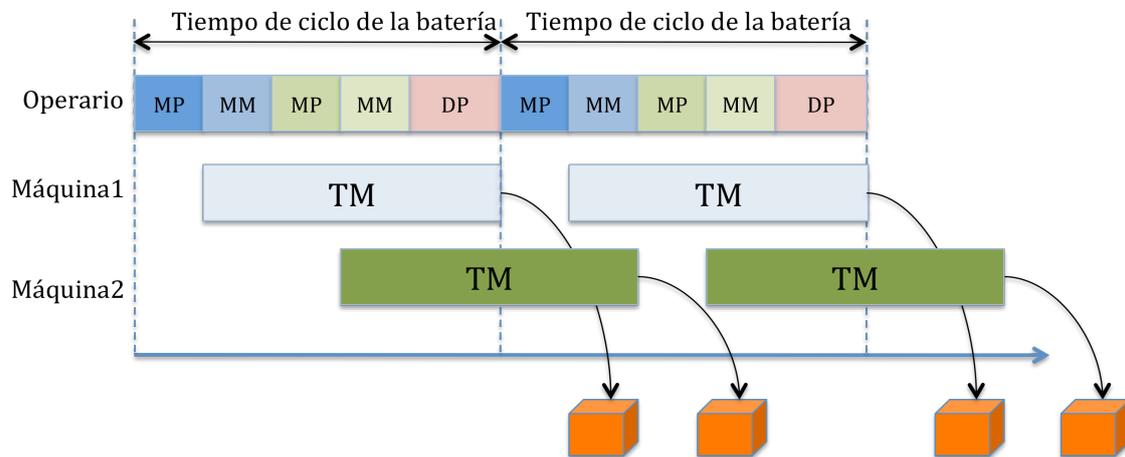


Figura 3. Diagrama hombre- máquinas (actividades múltiples) del puesto de trabajo

A partir del diagrama anterior, se puede obtener que:

$$TC_{bat} = 20 \text{ min}$$

Y es posible calcular el conjunto de parámetros que caracterizan el puesto de trabajo:

- Parámetros relacionados con el Tiempo de Ciclo y la Capacidad de Producción:

$$TC = \frac{TC_{bat}}{n^{\circ} \text{ piezas}} = \frac{20}{2} = 10 \text{ min/pieza}$$

$$Cap = \frac{1}{TC} = \frac{1}{10} = 0,10 \text{ piezas/min} = 6 \text{ piezas/hora}$$

que, como se observa, son los mismos valores que se obtendrían si se dispusiera de dos puestos de trabajo simples, cada uno con una máquina, trabajando en paralelo (el tiempo de ciclo se reduce a la mitad y la capacidad se duplica).

- Parámetros relacionados con el consumo del recurso Mano de Obra: Tiempo Tipo o work standard (WS), Cantidad de Trabajo (QT), Demoras (DP, DI)

$$QT = \frac{MP1 + MM1 + MP2 + MM2}{n^{\circ} piezas} = \frac{8 + 5 + 8 + 5}{2} = \frac{26}{2} = 13 \text{ min h / pieza}$$

$$DP = \frac{DP_{bat}}{n^{\circ} piezas} = \frac{7}{2} = 3,5 \text{ min h / pieza}$$

$$WS = QT + DP + DI = 13 + 3,5 = 16,5 \text{ min h / pieza}$$

Y, como se observa, la cantidad de trabajo (QT) permanece igual que en el caso de un puesto de trabajo simple (a una pieza se le sigue haciendo el mismo trabajo por la persona), y la demora de proceso (DP), o tiempo que el operario pierde esperando a que finalice una máquina, se ha reducido significativamente. Por ello disminuye el WS (de 20 min.h/pieza a 16.5 min.h/pieza) y se incrementa la productividad de la mano de obra (de 3 piezas/hora.h a 3,63 piezas/hora.h).

- Parámetros relacionados con el consumo del recurso Máquina: Máquina Estándar (MS) o minutos máquina necesarios para fabricar una pieza:

$$MS = \frac{MP + TM + MP + TM}{2 piezas} = \frac{2.2 + 7.2 + 2.2 + 7.2}{2} = 9.4 \text{ min.maq / pieza}$$

Y, como se observa, los minutos máquina necesarios para hacer la pieza son los mismos que en el caso de un puesto de trabajo simple (a una pieza se le sigue haciendo el mismo trabajo por la máquina).

Clasificación:

Los problemas de asignación Multimáquina se clasifican en dos grandes tipos:

- Asignación Multimáquina con **atención sistemática**.
Se dirá que existe atención sistemática a una máquina cuando se sabe, dentro del método de trabajo, el momento en el que el operario debe atender a la máquina, bien para colocar una nueva pieza, para descargarla, etc. Este momento será después de que la máquina haya terminado su ciclo automático y se haya parado. Son los casos que se han estudiado hasta el momento.

Las herramientas que se suelen utilizar para abordar estos problemas son los diagramas de actividades múltiples (hombre-máquinas) y/o las ecuaciones algebraicas.

- Asignación Multimáquina con **atención aleatoria**:
Se dirá que existe atención aleatoria a una máquina cuando NO se sabe, dentro del método de trabajo, el momento exacto en el que el operario debe atender a la máquina sino que éste es un instante aleatorio. Un ejemplo claro es el de un operario que está atendiendo a varios telares para que, cuando se produzca la rotura de uno de los hilos, proceda a su anudado. Normalmente el tiempo entre dos atenciones consecutivas a una máquina se comporta como una variable aleatoria de tipo exponencial.

Las herramientas que se suelen utilizar para abordar estos problemas son las ecuaciones y tablas de Jones y Ashcroft, la fórmula de Wright, la Teoría de Colas y en casos más complejos los procedimientos de simulación aleatoria.

2.2. Atención sistemática.

El caso que se ha descrito en la figura 2 es un caso típico de asignación con atención sistemática.

Supóngase un puesto de trabajo como el de la figura 4. Al operario se le pueden asignar las máquinas M1, M2 y M3.

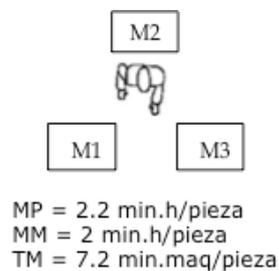


Figura 4. Puesto de trabajo con un operario manejando hasta 3 máquinas iguales

Si el operario maneja una máquina se tendrá:

$$TC_{M_1} = MP + TM = 2.2 + 7.2 = 9.4 \text{ min/pieza}$$

$$Cap_{M_1} = \frac{1}{TC} = \frac{1}{9.4} = 0.106 \text{ piezas/min} = 6,38 \text{ piezas/hora}$$

Si el operario maneja dos máquinas se tendrá (el diagrama hombre máquina es similar al de la figura 3):

$$TC_{bat} = MP + TM = 9.4 \text{ min}$$

$$TC = \frac{9,4 \text{ min}}{2 \text{ piezas}} = 4.7 \text{ min/pieza}$$

$$Cap = \frac{1}{TC} = \frac{1}{4,7} = 0.213 \text{ piezas/min} = 12,77 \text{ piezas/hora}$$

Como se observa el tiempo de ciclo es la mitad y la capacidad se duplica.

En el caso de que al operario se le asignen las tres máquinas se tendrá el diagrama hombre máquina de la figura 5.

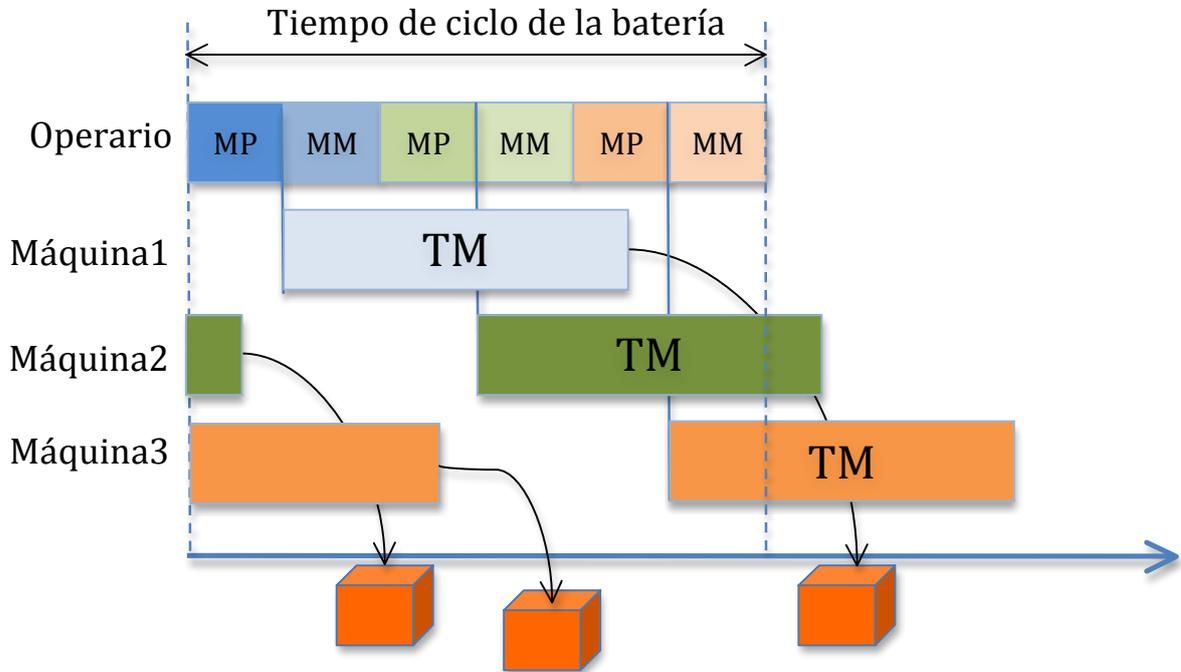


Figura 5. Diagrama hombre-máquina para el caso 1 operario-3 máquinas

En este caso cuando el operario termina el MM de la tercera máquina, la primera máquina está esperando a que el operario la atienda (existe una demora de la máquina).

Así pues, los parámetros del puesto relacionados con TC y Cap serán:

$$TC_{bat} = MP + TM + MP + TM + MP + TM = 12.6min$$

$$TC = \frac{12.6min}{3piezas} = 4.2min/pieza$$

$$Cap = \frac{1}{TC} = \frac{1}{4.2} = 0.238 piezas/min = 14,29 piezas/hora$$

y, como se observa, la capacidad NO se triplica o el tiempo de ciclo no se reduce a la tercera parte, $Cap \neq 3 * Cap_{M1}$. Se ha perdido capacidad de fabricación de las máquinas. Este fenómeno se conoce como **Interferencia entre máquinas**.

2.3. Interferencia entre máquinas.

Se denomina **Interferencia** al tiempo que la máquina debe esperar a ser atendida por el operario. Es una Demora o tiempo ocioso de la máquina debido a la

sobreasignación de trabajo al operario que la maneja. En el caso de sobreasignación en una batería con todas las máquinas iguales, todas las máquinas tienen la misma interferencia, como se puede observar en la figura 6.

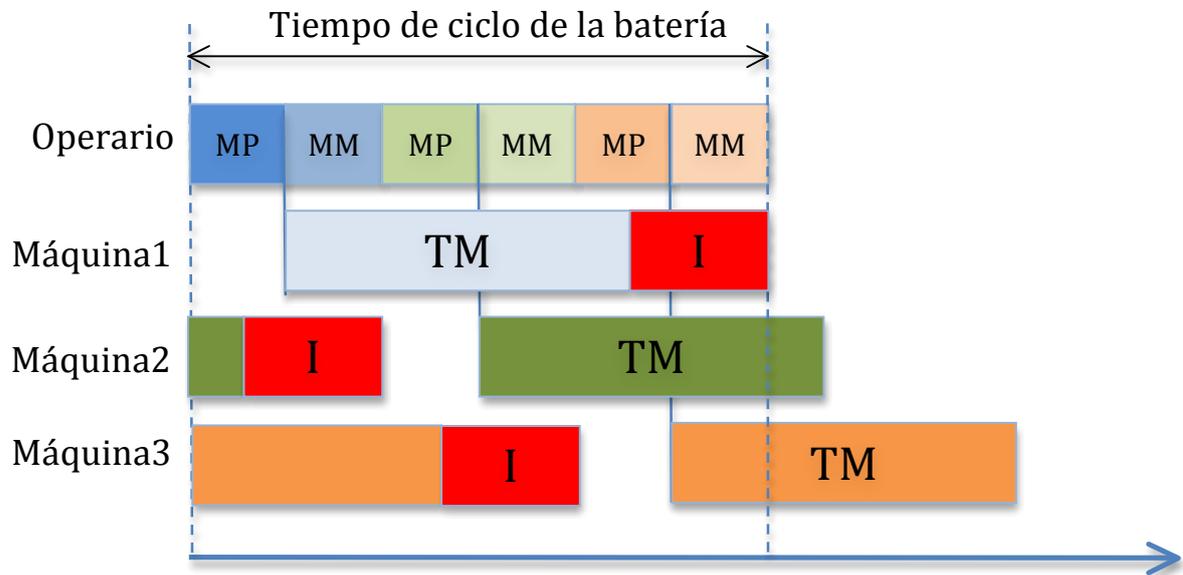


Figura 6. Interferencias en las máquinas cuando hay sobreasignación

La interferencia de una máquina se puede calcular como:

$$I_i = TC_{bat} - MP_i - TM_i = 12.6 - 2.2 - 7.2 = 3.2 \text{ min}$$

Al calcular los parámetros relacionados con el consumo de recurso mano de obra se tendrá:

$$QT = \frac{\sum QT_i}{n^\circ \text{ piezas}} = \frac{2.2 + 2.0 + 2.2 + 2.0 + 2.2 + 2.0}{3} = \frac{12.6}{3} = 4.2 \text{ min.h / pieza}$$

$$DP = 0; DI = 0$$

$$WS = QT + DP + DI = 4.2 \text{ min.h / pieza}$$

Pero al calcular los parámetros relacionados con el consumo de recurso máquina, en concreto los minutos máquina necesarios para la pieza, o máquina estándar (MS) se tendrá:

$$MS = MP + TM + I = 2.2 + 7.2 + 3.2 = 12.6 \text{ min.maq / pieza}$$

Se han incrementado los minutos máquina necesarios para hacer la pieza (se ha pasado de 9.4 a 12.6 min.maq/pieza), aunque el trabajo efectivo que continúa haciendo la máquina sobre la pieza es el mismo (TM = 7,2 min.maq/pieza). Y consecuentemente la utilización de las máquinas disminuirá.

2.4. Número ideal de máquinas. Sobreasignación y subasignación.

De lo discutido anteriormente se deduce que:

Sea N el número de máquinas que se asignan a un operario

Sea MP el tiempo máquina parada del operario para cada una de las máquinas

Sea MM el tiempo máquina en marcha del operario para cada una de las máquinas

Sea TM el tiempo del ciclo automático de cada máquina o tiempo de máquina

Si $N \times (MP + MM) = MP + TM$ entonces no existirá ni demora de proceso ni interferencias en la batería formada por las N máquinas y el operario que las maneja.

Se define el **Número Ideal** de máquinas (N^*) que se pueden asignar a un operario como:

$$N^* = \frac{MP + TM}{MP + MM} = \frac{MP + TM}{QT}$$

Si $N \times (MP + MM) < MP + TM$ entonces existirá una demora de proceso en la batería formada por las N máquinas y el operario que las maneja. Se dirá que el **operario** está **subasignado**.

Y el tiempo de ciclo de la batería está definido por:

$$TC_{bat} = MP + TM$$

Si $N \times (MP + MM) > MP + TM$ entonces existirán interferencias en la batería formada por las N máquinas y el operario que las maneja. Se dirá que el **operario** está **sobreasignado**.

Y el tiempo de ciclo de la batería está definido por:

$$TC_{bat} = N \times (MP + MM)$$

Normalmente N^* será un número real (no entero) y se deberá redondear al entero inferior o al entero superior. La decisión de uno u otro en la Asignación de máquinas a un operario debería basarse tanto en las capacidades o tiempos de ciclo que se consigan en cada caso como en el consumo de recursos relacionado con ello y, por lo tanto, en los costes esperados.

De forma general se tendrá, para los parámetros relacionados con la capacidad y el tiempo de ciclo:

Sea TC_{bat} el tiempo de ciclo de la batería, tal y como se ha definido.

Sea TC_u el tiempo de ciclo unitario, o tiempo en el que sale una unidad de producto de la batería

$$Cap = \frac{1}{TC_u} = \frac{N}{TC_{bat}}$$

Si $N \leq N^*$, como se puede ver en la figura 7, se tiene demora de proceso.

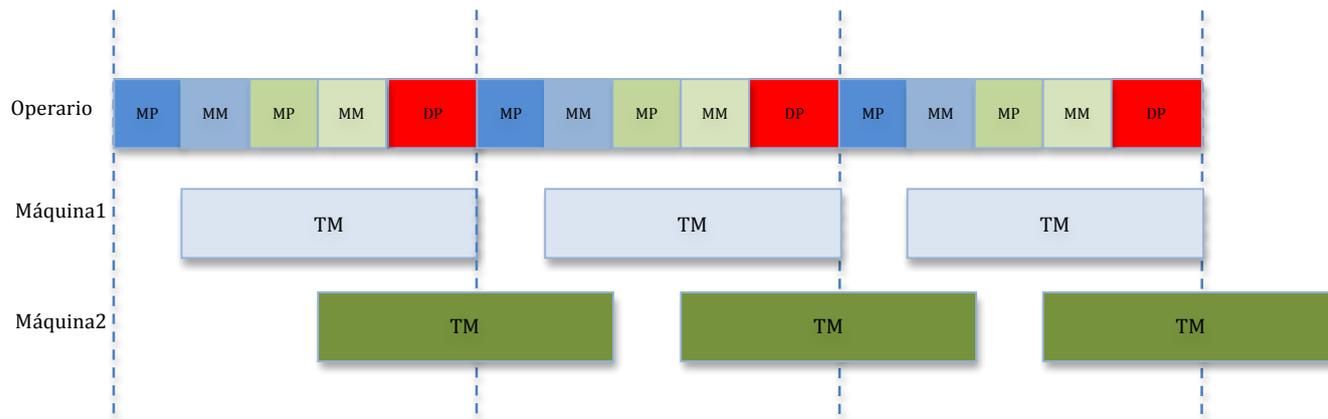


Figura 7. Número de máquinas asignadas inferior al ideal

$$TC_{bat} = (MP + TM)$$

$$Cap(N) = \frac{1}{TC_u} = \frac{N}{MP + TM}$$

Si $N \geq N^*$, como se puede ver en la figura 8, se tienen interferencias.

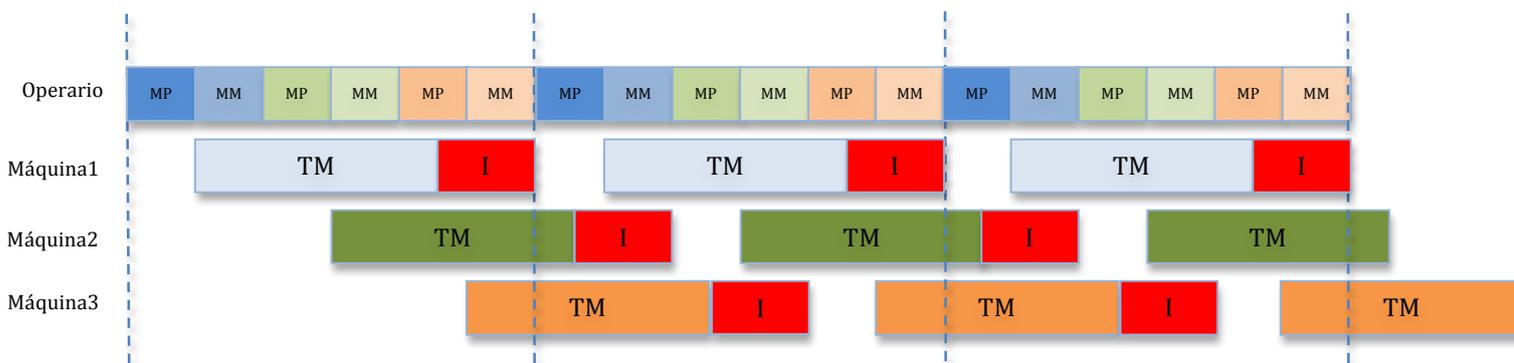


Figura 8. Número de máquinas asignadas superior al ideal

$$TC_{bat} = N \times (MP + MM) = N \times QT$$

$$Cap(N) = \frac{1}{TC_u} = \frac{N}{N \times (MP + MM)} = \frac{1}{MP + MM} = Cte.$$

Y la capacidad permanece constante para $N \geq N^*$. Gráficamente se ve en la figura 9.

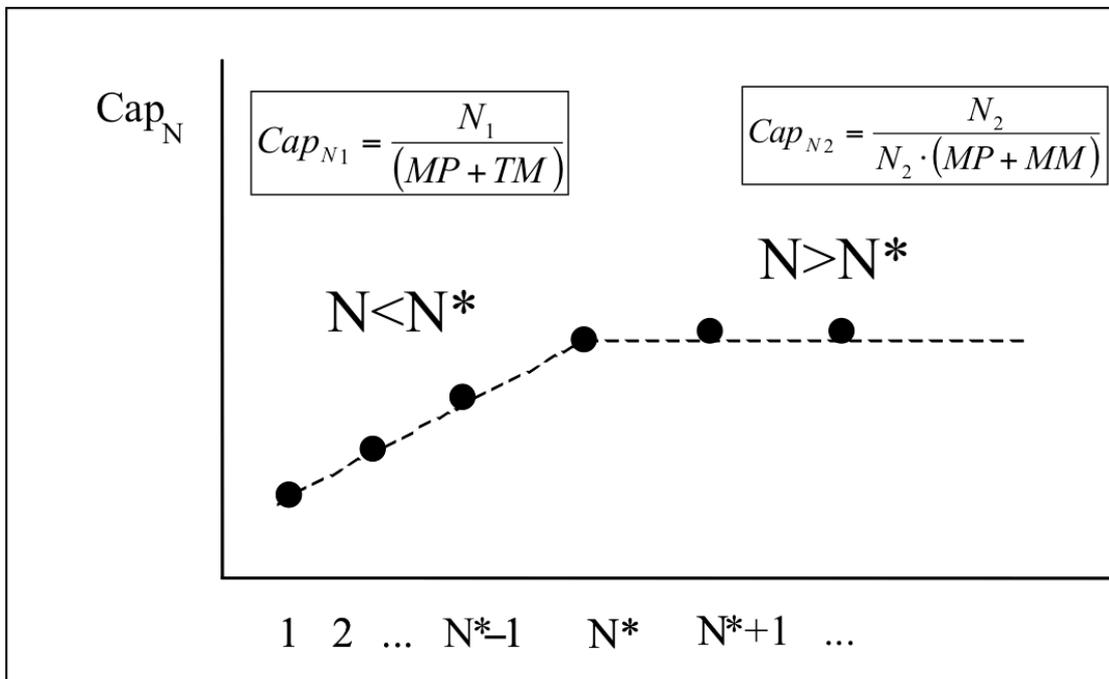


Figura 9. Evolución de la capacidad en función del número de maquinas asignadas al operario

De forma general se tendrá, para los parámetros relacionados con el consumo de recursos:

Si $N \leq N^*$,

$$QT(N) = \frac{N \times (MP + MM)}{N} = QT = Cte.$$

$$DP(N) = \frac{TC_{bat} - N \times QT}{N} = \frac{MP + TM}{N} - QT$$

$$WS(N) = QT(N) + DP(N) + DI(N) = QT + \frac{MP + TM}{N} - QT = \frac{MP + TM}{N}$$

$$I = 0$$

$$MS(N) = \frac{N \times (MP + TM + I)}{N} = MP + TM = Cte.$$

El WS disminuye con N y el MS es constante.

Si $N \geq N^*$,

$$QT(N) = \frac{N \times (MP + MM)}{N} = QT = Cte.$$

$$DP(N) = 0$$

$$WS(N) = QT(N) + DP(N) + DI(N) = QT = Cte.$$

$$I = TC_{bat} - MP - TM = N \times (MP + MM) - MP - TM$$

$$MS(N) = \frac{N \times (MP + TM + I)}{N} = N \times (MP + MM) = N \times QT$$

El WS permanece constante y el MS se incrementa con N.

3. CASO DE MÁQUINAS CON CICLOS DIFERENTES

Supóngase que en el diseño un sistema de fabricación se decide que un operario maneje tres máquinas de características diferentes (pueden o no fabricar la misma pieza) según la figura 10. Para ello, el método de trabajo definido consiste en que el operario realiza el MP_1 de la primera máquina y la deja en funcionamiento, después realiza el MM_1 de la primera máquina, a continuación realiza el MP_2 de la segunda máquina y la pone en funcionamiento, después realiza el MM_2 de la segunda máquina, a continuación realiza el MP_3 de la tercera máquina y finalmente el MM_3 de la tercera máquina volviendo a repetir el ciclo de operaciones en la batería formada por las tres máquinas¹.

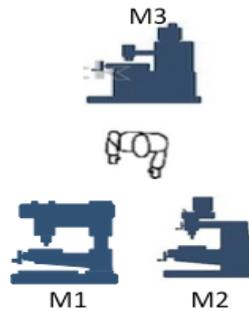


Figura 10. Puesto de trabajo con tres máquinas diferentes

Supóngase los datos siguientes:

	MP	MM	TM
M1	2.5	2.0	10.0
M2	2.5	1.5	2.5
M3	1.5	2.0	4.0

Tiempos en minutos

¹ El desplazamiento a la máquina siguiente por parte del operario se pueden considerar incluido como el último elemento del MM de cada máquina.

El diagrama hombre-máquinas o de actividades múltiples correspondiente se observa en la figura 11.

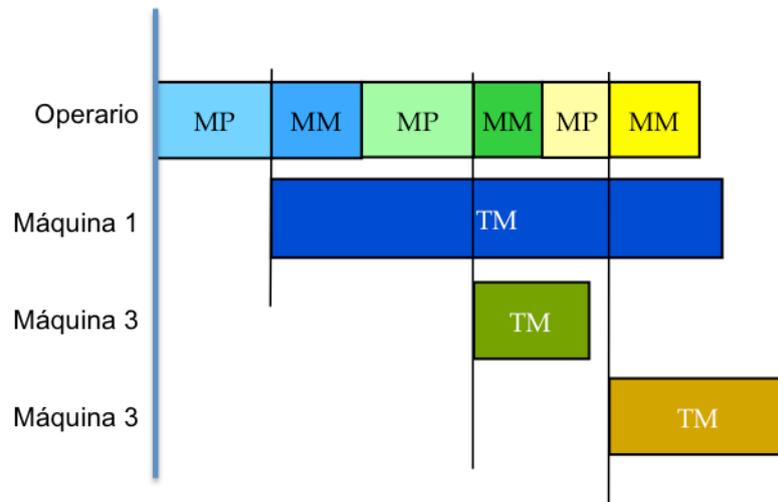


Figura 11. Diagrama hombre-máquina con tres máquinas diferentes

Al repetir sucesivamente los ciclos de operaciones se tendrá:

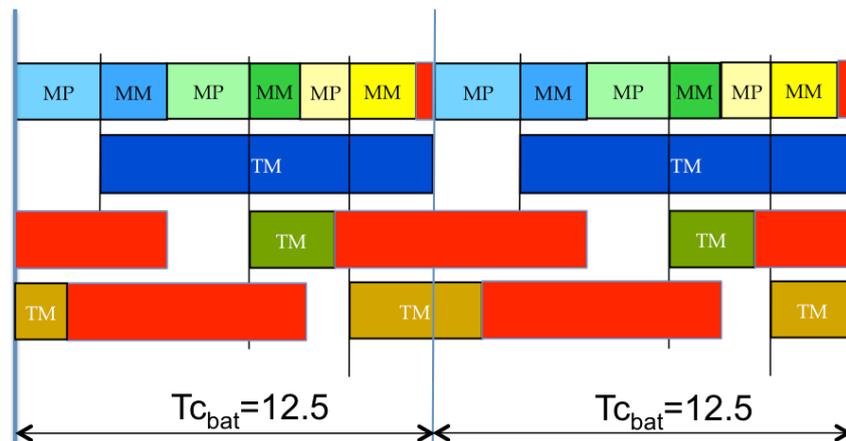


Figura 12. $T_{c_{bat}}$ con tres máquinas diferentes y operario subasignado

De lo cual se deduce que en el caso de asignación a un operario de máquinas con ciclos diferentes puede aparecer tanto demora de proceso en el operario como interferencia en alguna de las máquinas.

El trabajo total que realiza el operario, que será:

$$QT = \sum_{i=1}^N (MP_i + MM_i)$$

donde $i=1, \dots, N$ es el número de máquinas asignadas al operario.

Los tiempos de ciclo de cada una de las máquinas que se operan son:

$$TC_i = MP_i + TM_i ; \text{ desde } i=1, \dots, N$$

Al compararlos entre sí, cabe distinguir dos casos:

3.1. Caso 1: Operario subasignado

$$\text{Si} \quad \max_{i=1,\dots,N} (MP_i + TM_i) \geq \sum_{i=1}^N (MP_i + MM_i)$$

$$\text{Entonces} \quad TC_{bat} = \max_{i=1,\dots,N} (MP_i + TM_i)$$

Lo que indica que si el trabajo que realiza el operario es menor o igual que el tiempo de ciclo de la máquina que tiene mayor tiempo de ciclo, entonces el tiempo de ciclo de la batería está definido por la máquina de mayor tiempo de ciclo.

Es el caso representado en las figuras 10, 11 y 12. En este caso el operario estará **subasignado** (aparece demora de proceso) y a la vez existen **interferencias** en todas aquellas máquinas cuyo tiempo de ciclo es inferior a la de mayor tiempo de ciclo. Como consecuencia de esto todas las máquinas acoplan su tiempo de ciclo al tiempo de ciclo de la batería o, de la misma forma, la capacidad de cada una de las máquinas se reduce a la capacidad de la máquina de menor capacidad².

3.2. Caso 2: Operario sobreasignado

$$\text{Si} \quad \max_{i=1,\dots,N} (MP_i + TM_i) \leq \sum_{i=1}^N (MP_i + MM_i)$$

$$\text{Entonces} \quad TC_{bat} = \sum_{i=1}^N (MP_i + MM_i)$$

Lo que indica que si el trabajo que realiza el operario es mayor o igual que el tiempo de ciclo de la máquina que tiene mayor tiempo de ciclo, entonces el tiempo de ciclo de la batería está definido por el trabajo que realiza el operario o QT.

En este caso el operario estará **sobreasignado** y existen **interferencias** en **todas** las máquinas (ver figura 13). Como consecuencia de esto todas las máquinas acoplan su tiempo de ciclo al tiempo de ciclo de la batería o trabajo que realiza el operario y, de la misma forma, la capacidad de todas las máquinas se reduce a la capacidad definida por el operario.

Para los datos siguientes:

² Piénsese en una célula de fabricación en la que un operario maneja varias máquinas de la célula de forma sucesiva.

	MP	MM	TM
M1	2	1	4
M2	1	1	2
M3	1	1	3

Tiempos en minutos

Se tendrá el diagrama de la figura 13.

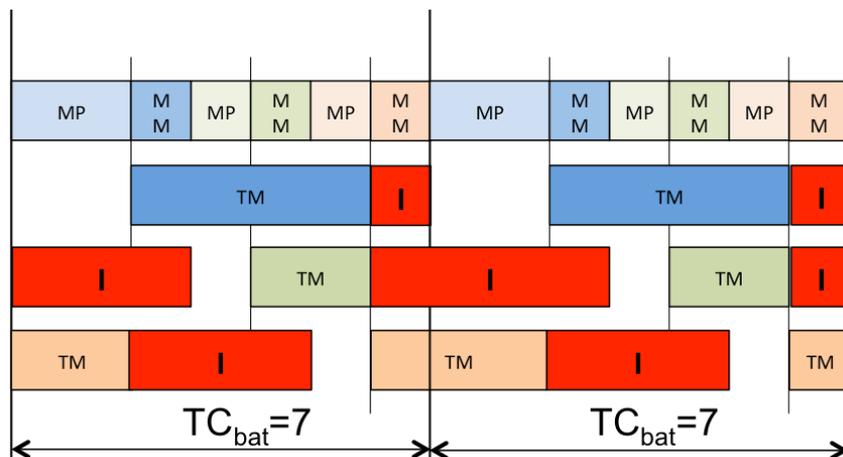


Figura 13. TC_{bat} con tres máquinas diferentes y operario sobreasignado

3.3. Cálculo de los parámetros.

De acuerdo con lo anterior, en el cálculo de los parámetros del puesto de trabajo, se tendrá:

- Parámetros TC_u y Cap .
 - o Si las piezas que se producen son la misma:

$$TC_u = \frac{TC_{bat}}{N}$$

$$Cap = \frac{1}{TC_u}$$

Al aplicarlo a los datos de la figura 11 se tendrá:

$$TC_u = \frac{12,5}{3} = 4,17 \text{ min/ pieza}$$

$$Cap = \frac{1}{4,17} = 14,4 \text{ piezas / hora}$$

- o Si las piezas que se producen son diferentes:

$$(TC_u)_i = TC_{bat}; \forall i$$

$$Cap_i = \frac{1}{TC_{bat}}; \forall i$$

$$i = 1, \dots, N$$

Al aplicarlo a los datos de la figura 13 (suponiendo piezas diferentes) se tendrá:

$$TC_1 = 7 \text{ min/ pieza1}; Cap_1 = 8,57 \text{ piezas1 / hora}$$

$$TC_2 = 7 \text{ min/ pieza2}; Cap_2 = 8,57 \text{ piezas2 / hora}$$

$$TC_3 = 7 \text{ min/ pieza3}; Cap_3 = 8,57 \text{ piezas3 / hora}$$

- Parámetros de utilización del recurso mano de obra.
 - o Si la piezas que se producen son la misma
 - Caso 1: $\sum QT_i \leq \text{Max}_i TC_i$

$$QT = \frac{\sum_i QT_i}{N}$$

$$DP = \frac{TC_{bat} - \sum_i QT_i}{N}$$

$$WS = QT + DP + DI = \frac{TC_{bat}}{N}$$

- Caso 2: $\sum QT_i \geq \text{Max}_i TC_i$

$$QT = \frac{\sum_i QT_i}{N}$$

$$DP = 0$$

$$WS = QT + DP + DI = \frac{TC_{bat}}{N} = QT$$

Al aplicarlo a los datos de la figura 11 se tendrá:

$$QT = \frac{2,5 + 2 + 2,5 + 1,5 + 1,5 + 2}{3} = \frac{12}{3} = 4 \text{ min.h / pieza}$$

$$DP = \frac{TC_{bat} - QT}{N} = \frac{12,5 - 12}{3} = 0,17 \text{ min.h / pieza}$$

$$WS = QT + DP + DI = 4,17 \text{ min.h / pieza}$$

- o Si la piezas que se producen son diferentes
 - Caso 1: $\sum QT_i \leq \text{Max}_i TC_i$

$$QT_i = MP_i + MM_i$$

$$DP_i = \frac{TC_{bat} - \sum QT_i}{\sum QT_i} \times QT_i$$

$$WS_i = QT_i + DP_i + DI_i = \frac{QT_i}{\sum QT_i} \times TC_{bat}$$

- Caso 2: $\sum QT_i \geq \text{Max}_i TC_i$

$$QT_i = MP_i + MM_i$$

$$DP_i = 0$$

$$WS_i = QT_i + DP_i + DI_i = QT_i$$

Al aplicarlo a los datos de la figura 13 (suponiendo piezas diferentes) se tendrá:

$$QT_1 = 3 \text{ min.h / pieza1}; QT_2 = 2 \text{ min.h / pieza2}; QT_3 = 2 \text{ min.h / pieza3}$$

$$DP_1 = DP_2 = DP_3 = 0$$

$$WS_1 = 3 \text{ min.h / pieza1}; WS_2 = 2 \text{ min.h / pieza2}; WS_3 = 2 \text{ min.h / pieza3}$$

- Parámetros de utilización del recurso máquina i.
 - Si las piezas que se producen son la misma
 - Caso 1: $\sum QT_i \leq \text{Max}_i TC_i$

$$I = \frac{\sum_i (TC_{bat} - MP_i - TM_i)}{N}$$

$$MS = N \times \frac{TC_{bat}}{N} = TC_{bat} = \frac{\sum_i (MP_i + TM_i)}{N} + I$$

- Caso 2: $\sum QT_i \geq \text{Max}_i TC_i$

$$I = \frac{\sum_i (TC_{bat} - MP_i - TM_i)}{N}$$

$$MS = N \times \frac{TC_{bat}}{N} = TC_{bat} = \frac{\sum_i (MP_i + MM_i)}{N} + I$$

Al aplicarlo a los datos de la figura 11 se tendrá:

$$I = \frac{(12,5 - 2,5 - 10) + (12,5 - 2,5 - 2,5) + (12,5 - 1,5 - 4)}{3} = \frac{0 + 7,5 + 7}{3} = 4,83 \text{ min.maq / pieza}$$

$$MS = 12,5 \text{ min.maq / pieza}$$

- Si la piezas que se producen son diferentes
 - Casos 1 y 2:

$$I_i = TC_{bat} - (MP_i + TM_i)$$

$$MS_i = TC_{bat} = MP_i + TM_i + I_i$$

Al aplicarlo a los datos de la figura 13 (suponiendo piezas diferentes) se tendrá:

$$I_1 = 7 - 2 - 4 = 1 \text{ min.maq / pieza1}; MS_1 = 2 + 4 + 1 = 7 \text{ min.maq / pieza1}$$

$$I_2 = 7 - 1 - 2 = 4 \text{ min.maq / pieza2}; MS_2 = 1 + 2 + 4 = 7 \text{ min.maq / pieza2}$$

$$I_3 = 7 - 1 - 3 = 3 \text{ min.maq / pieza3}; MS_3 = 1 + 3 + 3 = 7 \text{ min.maq / pieza3}$$

4. COSTES EN ASIGNACIONES MULTIMÁQUINA

Se ha comentado en 2.4 que la elección entre los valores entero superior o inferior al número de máquinas ideal N^* asignadas a un operario puede estar definida bien por la necesidad de conseguir una capacidad determinada o bien por la consideración de un coste por unidad de pieza menor. En este apartado se intenta estimar el coste de fabricación de una pieza a partir de los parámetros del puesto de trabajo con asignación multimáquina.

Si bien existen diferentes modelos de cálculo de costes en los sistemas de fabricación, nos limitaremos a estudiar los costes variables que son consecuencia fundamental del método de trabajo y por lo tanto del consumo de recursos de los tipos mano de obra y máquinas. Lo más usual es que, a partir de los sistemas de contabilidad de costes implantados en la empresa, se conozcan el coste de un operario por unidad de tiempo de ese operario y el coste de la máquina por unidad de tiempo de ese recurso. No se incluyen en estos cálculos el coste de materia prima, consumibles, etc., ya que se consideran fijos e independientes de la asignación o método de trabajo.

Sea K_{op} el coste debido a un operario por unidad de tiempo (€/min.h)

Sea K_j el coste de la máquina j por unidad de tiempo (€/min.maq)

$$K_M = K_1 + K_2 + \dots + K_m = \sum_{j=1}^m K_j$$

K_M será el coste total por unidad de tiempo de las m máquinas que constituyen la batería manejada por el operario.

El coste de una pieza producida en la batería se puede estimar como:

$$C_N = K_{op} \times TC_u + K_M \times TC_u$$

donde en primer termino del sumatorio es el coste de operarios por pieza producida en la batería³ y el segundo término es el coste de máquinas por pieza producida en la batería.

En función del tiempo de ciclo de la batería:

$$C_N = K_{op} \frac{TC_{bat}}{N} + (K_1 + K_2 + \dots + K_m) \frac{TC_{bat}}{N}$$

Si además las m máquinas son iguales (y de igual coste K₁) y de cada máquina sale una pieza cada vez (m=N), entonces:

$$C_N = K_{op} \times \frac{TC_{bat}}{N} + K_1 \times TC_{bat}$$

Para.....N₁ ≤ N*

$$\begin{cases} TC_{bat} = (MP + TM) \\ C_N = \frac{K_{op} \times (MP + TM)}{N_1} + K_1 \times (MP + TM) \end{cases}$$

Para.....N₂ ≥ N*

$$\begin{cases} TC_{bat} = N_2 \times (MP + MM) \\ C_N = K_{op} \times (MP + MM) + K_1 \times N_2 \times (MP + MM) \end{cases}$$

Para el caso descrito en la figura 4 (MP=2.2, MM=2.0, TM=7.2) y suponiendo K_{op}=0,15 €/min, K₁=0,2 €/min, se tendrá:

$$\begin{aligned} N_1 = 2 \leq N^* = 2,19 \\ \begin{cases} TC_{bat} = (2,2 + 7,2) = 9,4 \text{ min} \\ C_2 = \frac{0,15 \times 9,4}{2} + 0,2 \times 9,4 = 2,59 \text{€ / pieza} \end{cases} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} N^* \leq N_2 = 3 \\ \begin{cases} TC_{bat} = 3 \times (2,2 + 2,0) = 12,6 \text{ min} \\ C_N = 0,15 \times 4,2 + 0,2 \times 3 \times 4,2 = 3,15 \text{€ / pieza} \end{cases} \end{aligned}$$

De forma gráfica y en función del número de máquinas N asignadas al operario se tendrá la figura 14:

³ Si hubiesen varios operarios manejando la batería este coste sería el total de los operarios por unidad de tiempo.

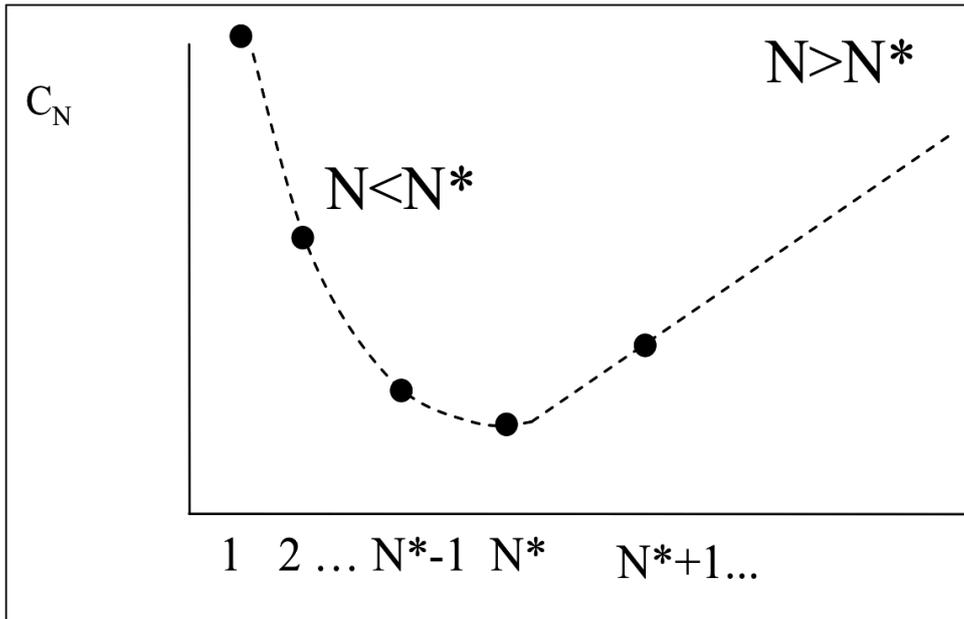


Figura 14. Coste de una pieza en función del número de máquinas asignadas al operario

Con carácter general, para el caso de una batería de M operarios con costes $K_{1,i}$ y N máquinas con costes $K_{2,j}$ que fabrica una misma pieza se puede establecer que:

$$C_N = \left(\sum_{i=1}^M K_{1,i} \right) \times TC_u + \left(\sum_{j=1}^N K_{2,j} \right) \times TC_u$$

Y el problema se reduce a **definir correctamente el Tiempo de Ciclo Unitario (TC_u)**, que se obtiene siempre a partir del tiempo de ciclo de la batería (TC_{bat}), que podrá estar condicionado por el Operario (QT) o por la máquina de ciclo ($MP+TM$) más largo.

5. ASIGNACIÓN CON ATENCIÓN ALEATORIA.

Un ejemplo muy corriente de asignación de máquinas con atención aleatoria lo constituían los telares, que podían pararse debido a varias razones (tales como la rotura de hilo o el final de una madeja). El tiempo empleado en la máquina por el operario depende de la clase de reparación o servicio que tenga que prestar en dicha máquina. En unas ocasiones habrá máquinas inactivas, en espera de los servicios del operario que se encuentra ocupado, mientras que en otras ocasiones el operario permanecerá ocioso, pendiente de que alguna máquina requiera su atención. ¿Cuántas máquinas se deben asignar a cada operario? ¿Cuál es el tiempo promedio de espera de una máquina? ¿Cómo calcular el tiempo de ciclo y la producción esperada? ¿Cómo determinar el mejor método para atender a las máquinas (primero a las que menos tiempo requieran o no)? Actualmente estos procesos están ampliamente robotizados; el trabajo que realizaban los operarios se realiza por robots automatizados que anudan los hilos en el telar que lo necesita. Ahora bien, podría tratarse el robot como un servidor con características similares a los operarios.

Se puede entender que las máquinas que requieren la atención son como clientes que llegan aleatoriamente (en número e instante) a un servicio (el operario) que, a la vez, tiene una duración aleatoria también. Las interferencias (o tiempos promedios de espera) se dan cuando la máquina tiene que aguardar a que el operario esté desocupado.

Actualmente estos análisis se pueden realizar mediante el estudio de la Teoría de Colas y/o la Simulación. Estas técnicas no se incluyen en este temario y se estudiarán en otras asignaturas. Aquí se incluyen parte de los estudios de Ashcroft por su carácter histórico.

En el caso de asignación de N máquinas de este tipo a un operario, la interferencia no sólo aumenta con el número de máquinas, sino también con el grado y tiempo de atención que se requiera en cada ciclo. Por consiguiente, al aumentar la relación $P=MP/TM$ aumentan las interferencias y disminuye la producción (se supone que todo el servicio se presta a máquina parada).

Las tablas de Ashcroft.

Los estudios de H. Ashcroft acerca de la productividad de varias máquinas al cuidado de un mismo operario (1950) contribuyeron decisivamente a los conocimientos en ese campo y sus tablas permitían un cálculo rápido de la efectividad de las máquinas y de su producción, a partir de la relación P definida antes.

Para elaborar sus tablas, Ashcroft realizó las siguientes hipótesis:

1. las máquinas se detienen y requieren atención de forma imprevisible. La probabilidad de que una máquina se pare en el futuro es independiente del tiempo transcurrido desde la última vez que la máquina precisó cuidados.
2. El tiempo de servicio del operario es constante.

No hace falta resaltar que en la práctica rara vez se cumplen estos supuestos. Si una máquina se para y se suprime la causa de la avería es de suponer que funcione satisfactoriamente durante un tiempo antes de volver a pararse, etc.

Si las máquinas se paran al azar, y sus averías futuras no dependen de su última reparación, la probabilidad de que una máquina siga funcionando durante un período t es de e^{-kt} (una ley aleatoria exponencial), donde k es un coeficiente que depende del número de máquinas.

A partir de estos supuestos Ashcroft elaboró sus tablas (ver anexo) que permiten obtener el número de Ashcroft (A_N). Este número se define como el promedio de horas de máquina efectivas (o de funcionamiento) por hora, cuando se asignan N máquinas a la supervisión de un operario; en otras palabras el número de Ashcroft es una medida de la producción esperada de las N máquinas.

Supongamos el siguiente ejemplo. Sea una máquina cuya relación P es 0,18 y su capacidad promedio es de 100 unidades por hora de funcionamiento. El número ideal de máquinas para un operario sería:

$$N^* = \frac{MP + TM}{MP} = \frac{1 + P}{P} = \frac{1,18}{0,18} = 6,56$$

A partir de las tablas se obtienen los correspondientes valores de A_N de la siguiente forma:

N	A_N	Producción (unid. por hora)	Rendimiento $A_N/N \times 100$
1	0,85	85	85
2	1,67	167	83,5
3	2,48	248	82,7
4	3,22	322	80,5
5	3,90	390	78
6	4,48	448	74,7

La última columna de la tabla indica el rendimiento del centro de producción. La máxima producción se alcanza cuando las N máquinas funcionan continuamente, y como se suponen iguales, la producción máxima equivale a N veces la de una máquina, mientras que la efectiva es solamente igual a A_N veces la de una máquina. Por lo que el rendimiento de la producción será A_N/N .

6. EQUILIBRADO DE LA CAPACIDAD.

En *Vicens-Salort, E. y otros* (2010), en el estudio del diseño de Puestos de Trabajo Simples, se trató la situación de puestos de trabajo en serie. La desigualdad entre los diferentes tiempos de ciclo de esos puestos de trabajo en serie, y por consiguiente de las capacidades, implica la aparición de demoras en los recursos involucrados en los puestos de trabajo. En definitiva, implica la existencia de tiempo improductivo, Demoras Inherentes (DI) para las personas y Demoras de Máquina (DM) en los demás recursos. En las conclusiones del documento se indicaba que como forma de incremento de la productividad se deben eliminar estos tiempos improductivos por ejemplo “equilibrando al máximo los puestos de trabajo, y en algunos casos incluso incrementando los tiempos de ciclo”.

Este equilibrado se debe de hacer entre los diferentes puestos de trabajo situados en serie por supuesto. Pero qué sucedería si el tiempo de ciclo resultante o la capacidad (su inversa) fuera superior a los requerimientos de los clientes (externos o internos). Bien aparecerían inventarios (y por lo tanto ineficiencias) o bien se debería de parar la fabricación (demoras) hasta consumir lo fabricado. Luego el equilibrado también debe de hacerse respecto a lo que se demanda del sistema de fabricación.

Para ello se hace necesario definir el concepto de Tiempo de Ciclo Requerido (TCR) o Tiempo de Tacto (Takt-Time)

6.1. Tiempo de ciclo requerido o tiempo de tacto (Takt Time).

Takt time (tiempo de tacto o tiempo de ciclo requerido), que deriva de la palabra alemana “taktzeit”, y que significa entre otras cosas ritmo, compás..., se define como la cadencia (o tasa) a la cual un producto debe ser fabricado para satisfacer la demanda del cliente. Por ejemplo, el cliente quiere comprar 10 unidades por semana, si las unidades se construyen durante una semana laboral de 40 horas, el tiempo promedio necesario para construir una unidad debe ser 4 horas (o menos). Las líneas de fabricación industrial deben tener ciclos de producción por lo menos tan cortos como el tiempo de tacto para que la producción pueda satisfacer la demanda del cliente. Este 'tiempo del ciclo' de producción debe ser menor o igual al tiempo de tacto.⁴⁵

Suponiendo que se fabrica una unidad cada vez de un producto y a una tasa constante durante el tiempo de trabajo disponible del sistema, el tiempo tacto es la cantidad de tiempo que debe transcurrir entre dos terminaciones de unidad consecutivas con el fin de satisfacer la demanda.

⁴ Some of the early literature uses cycle time for takt time.

⁵ Puede consultarse el objeto de aprendizaje UPV de José Pedro García Sabater <http://www.youtube.com/watch?v=GNEYz6Ixykk>

El Tiempo de Ciclo Requerido (TCR) o Takt-Time puede determinarse con la fórmula:

$$TCR = \frac{T_a}{D}$$

Donde

TCR = Tiempo de Ciclo Requerido, es decir, tiempo entre dos unidades consecutivas.

Ta = Tiempo disponible neto para trabajar, es decir, tiempo de trabajo por período.

D = Demanda (demanda del cliente), es decir, unidades requeridas por período.

El tiempo disponible neto es la cantidad de tiempo disponible para el trabajo a realizar. Esto excluye los tiempos de descanso y cualquier tiempo de parada esperado (por ejemplo, programas de mantenimiento, reuniones de equipos, etc.).

Ejemplo:

Si hay un total de 8 horas (o 480 minutos) en un turno (tiempo bruto) menos 30 minutos para comida, 30 minutos para descanso en dos paradas (2 × 15 mins), 10 minutos para una reunión de equipo y 10 minutos pruebas básicas de mantenimiento, entonces:

Tiempo neto disponible para trabajo = 480 - 30 - 30 - 10 - 10 = 400 minutos.

Si la demanda del cliente fuera, digamos, 400 unidades por día y se está trabajando a un turno, se necesitaría que la línea obtuviera una tasa de salida como mínimo de una unidad por minuto para poder cumplir con la demanda del cliente.

Si tenemos un puesto o una línea o un taller... que produce a una tasa inferior a la del cliente, es decir que el tiempo de ciclo es superior al tiempo de tacto, necesitaremos horas extras, turnos adicionales... para poder conseguir la producción que el cliente nos pide.

Si por el contrario producimos a una tasa superior a la del cliente, es decir que el tiempo ciclo es inferior al tiempo de tacto tendremos tiempos de espera, o tendremos que desplazar a los operarios a otros puestos y estaremos generando producción de más (inventarios).

Por tanto nuestro objetivo al organizar la producción y diseñar un puesto de trabajo es hacer coincidir al máximo el tiempo de ciclo con el tiempo de tacto.

Dado que las demandas de producción son cambiantes a lo largo del tiempo deberemos definir formas de trabajo flexibles que mantengan su eficacia al acoplarse a los cambios, permanentes o cíclicos, previsibles o imprevisibles del tiempo de tacto o demanda del cliente.

En la fabricación de automóviles, los coches se montan en una línea, en un determinado tiempo de ciclo, e idealmente se pasan a la siguiente estación dentro del tiempo de tacto, de tal forma que nunca se produce ni en más ni en menos. El tiempo de ciclo para completar el trabajo en cada estación suele ser menor que el tiempo de tacto para garantizar que al cliente nunca le falta el producto. Aunque teóricamente se desea que coincidan el ciclo de tiempo y el tiempo tacto, para evitar la aparición de inventarios y equipos de tamaño excesivo, la realidad es que la demanda es dinámica y no precisamente conocida y también pueden ocurrir interrupciones del proceso como roturas o paros no planificados. Así, en la práctica, generalmente se asume que el tiempo de ciclo debe ser ligeramente menor que el tiempo de tacto.

En realidad, a largo plazo las personas y las máquinas no pueden mantener 100% de eficiencia y también puede haber paros por otras razones. Deben darse suplementos por estos casos y así la línea se diseñaría para actuar a un tasa más rápida para hacer frente a estas ineficiencias. Además, el tiempo de tacto puede ajustarse según los requisitos de dentro de la empresa. Por ejemplo, si un departamento entrega piezas a varias líneas de fabricación, a menudo tiene sentido usar tiempos de tacto similares en todas las líneas para suavizar el flujo de la estación anterior. La demanda del cliente todavía puede satisfacerse mediante el ajuste de tiempo de trabajo diario o el tiempo de inactividad de las máquinas y así sucesivamente.

En la implantación del “lean manufacturing” la aplicación del concepto de “takt-time” y la nivelación (HEIJUNKA) son básicos.

6.2. Eliminación de la Demora Inherente y de la Demora de Máquinas por equilibrado del sistema.

Supóngase el siguiente ejemplo:

Se requiere la fabricación de 123 unidades al día de una determinada pieza. En la empresa se trabaja a dos turnos diarios de 8 horas, con una parada a medio turno de 30 minutos para comida y dos paradas intermedias de 10 minutos cada una para café y necesidades personales.

El proceso de fabricación de la pieza consiste en tres operaciones que se realizan en tres puestos de trabajo en serie según la figura 15. En cada uno de ellos se realizan por los operarios los elementos en Máquina Parada, los elementos Máquina en Marcha, y los ciclos automáticos de las máquinas con su Tiempo de Máquina. Según el método actual de trabajo hay asignados un operario a cada puesto.

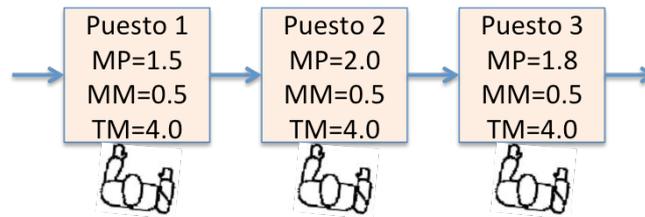


Figura 15. Tres puestos de trabajo en serie

En el cálculo de los parámetros característicos de ese sistema de producción se tendrá lo siguiente:

Puesto de trabajo 1:

$TC_1=5,5$ min/pieza; $Cap_1=10,91$ piezas/h;
 $QT_1=2,0$ min.h/pieza; $DP_1=3,5$ min.h/pieza; $DI_1=0,5$ min.h/pieza; $WS_1=6$ min.h/p.
 $MS_1=6$ min.maq/pieza

Puesto de trabajo 2:

$TC_2=6$ min/pieza; $Cap_2=10$ piezas/h;
 $QT_2=2,5$ min.h/pieza; $DP_2=3,5$ min.h/pieza; $DI_2=0$ min.h/pieza; $WS_2=6$ min.h/p.
 $MS_2=6$ min.maq/pieza

Puesto de trabajo 3:

$TC_3=5,8$ min/pieza; $Cap_3=10,34$ piezas/h;
 $QT_3=2,3$ min.h/pieza; $DP_3=3,5$ min.h/pieza; $DI_3=0,2$ min.h/pieza; $WS_3=6$ min.h/p.
 $MS_3=6$ min.maq/pieza

De acuerdo con lo visto en *Vicens-Salort, E. y otros (2010)*, el puesto de trabajo 2 será el cuello de botella del sistema y los parámetros característicos de la línea son los siguientes:

$$TC_L = \max_i TC_i = 6 \text{ min/pieza}; Cap_L = \min_i Cap_i = 10 \text{ piezas/hora}$$

$$QT_L = \sum_i QT_i = 2 + 2,5 + 2,3 = 6,8 \text{ min.h/pieza}$$

$$DP_L = \sum_i DP_i = 3,5 + 3,5 + 3,5 = 10,5 \text{ min.h/pieza}$$

$$DI_L = \sum_i DI_i = 0,5 + 0 + 0,2 = 0,7 \text{ min.h/pieza}$$

$$WS_L = 6,8 + 10,5 + 0,7 = 18,0 \text{ min.h/pieza}$$

$$MS_L = 18,0 \text{ min.maq/pieza}$$

Con este método de trabajo se podrían fabricar hasta 10 piezas/hora de trabajo efectivo, que en los dos turnos diarios serían:

$$(480 - 30 - 2 \times 10) \times 2 \times \frac{10}{60} = 143,33 \text{ piezas/día}$$

Si las piezas requeridas al día son sólo 123, se tendrá que el tiempo de ciclo requerido o tiempo de tacto (takt time) es:

$$TCR = \frac{(480 - 30 - 2 \times 10) \times 2}{123} = 6,99 \approx 7 \text{ min/pieza}$$

Si no se cambia el método de trabajo y se ajusta el sistema al tiempo de tacto (no fabricando más de las piezas necesarias) aparece por cada pieza una Demora Inherente adicional debido a la diferencia entre el tiempo de ciclo de la línea y el tiempo de tacto. Los nuevos parámetros de la línea serán:

$$TC_L = 7 \text{ min/pieza}; Cap_L = 8,57 \text{ piezas/hora}$$

$$QT_L = \sum_i QT_i = 2 + 2,5 + 2,3 = 6,8 \text{ min.h/pieza}$$

$$DP_L = \sum_i DP_i = 3,5 + 3,5 + 3,5 = 10,5 \text{ min.h/pieza}$$

$$DI_L = \sum_i DI_i = 0,5 + 0 + 0,2 + 1 + 1 + 1 = 3,7 \text{ min.h/pieza}$$

$$WS_L = 6,8 + 10,5 + 3,7 = 21,0 \text{ min.h/pieza}$$

$$MS_L = 21,0 \text{ min.maq/pieza}$$

Como se observa la productividad de los operarios es de:

$$P = \frac{1}{WS} = \frac{60}{21} = 2,86 \text{ piezas/hora.h}$$

y la eficiencia de los operarios es de:

$$E = \frac{QT}{WS} = \frac{6,8}{21} = 32,38\%$$

Lo que se puede observar en la figura 15.

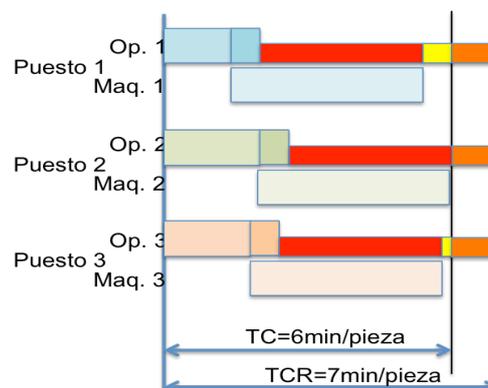


Figura 16. Diagrama hombre máquina de los tres puestos de trabajo en serie

¿Cómo se pueden mejorar la productividad de los diferentes recursos y su eficiencia? Definiendo un nuevo método de trabajo que permita reducir la demora inherente y la demora de proceso ajustándose al TCR o tiempo de tacto.

Supóngase que los desplazamientos de los operarios entre los diferentes puestos de trabajo representan un tiempo de 0.05 min. Un mismo operario podría operar los tres puestos de trabajo de acuerdo con el siguiente método:

1. Realiza el MP del puesto 1, pone en funcionamiento la Maq. 1, realiza el MM del puesto 1. Se desplaza al puesto 2.
2. Realiza el MP del puesto 2, pone en funcionamiento la Maq. 2, realiza el MM del puesto 2. Se desplaza al puesto 3.
3. Realiza el MP del puesto 3, pone en funcionamiento la Maq. 3, realiza el MM del puesto 3. Se desplaza al puesto 1.
4. Repite el ciclo.

El diagrama de actividades múltiples correspondiente a este nuevo método será:

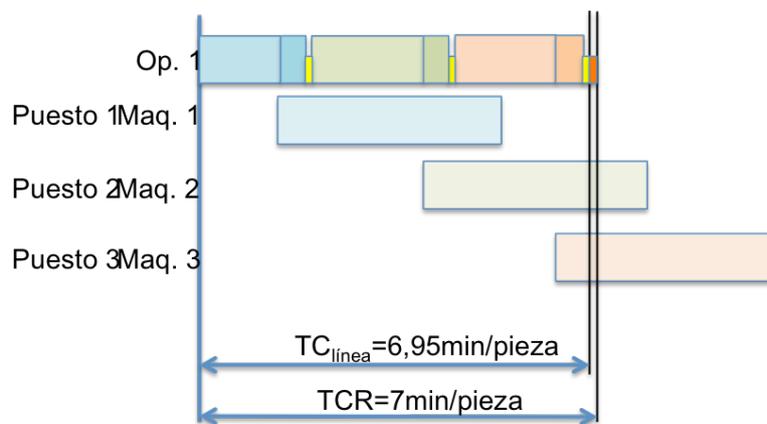


Figura 17. Diagrama de actividades múltiples de los tres puestos de trabajo en serie con el método mejorado

Los nuevos parámetros de la línea serán:

$$TC_L = 7 \text{ min/pieza}; Cap_L = 8,57 \text{ piezas/hora}$$

$$QT_L = \sum_i QT_i = 2 + 2,5 + 2,3 + 0,05 + 0,05 + 0,05 = 6,95 \text{ min.h/pieza}$$

$$DP_L = \sum_i DP_i = 0 + 0 + 0 = 0 \text{ min.h/pieza}$$

$$DI_L = \sum_i DI_i = 0 + 0 + 0 + 0,05 = 0,05 \text{ min.h/pieza}$$

$$WS_L = 6,95 + 0 + 0,05 = 7,0 \text{ min.h/pieza}$$

$$MS_L = 21,0 \text{ min.maq/pieza}$$

Y como se observa la nueva productividad de los operarios es de:

$$P = \frac{1}{WS} = \frac{60}{7} = 8,57 \text{ piezas/hora.h}, \text{ que se ha incrementado en un } 199,65 \%,$$

siendo la nueva eficiencia de los operarios del:

$$E = \frac{QT}{WS} = \frac{6,95}{7} = 99,29\%$$

Todo ello sin modificar la utilización y productividad de las máquinas.

Continuando con el mismo ejemplo, supóngase ahora que se requieren del sistema 148 piezas diarias.

El nuevo tiempo de tacto será:

$$TCR = \frac{(480 - 30 - 20) \times 2}{148} = \frac{860}{148} = 5,81 \text{ min/ pieza}$$

(equivalente a una capacidad de 10,33 piezas/hora)

A partir de ese dato se pueden determinar el mínimo número necesario de puestos de trabajo 1, 2 y 3 con el objeto de cumplir el tiempo de tacto. Este número mínimo será el que consiga el mejor equilibrio del sistema.

$$\text{Número.puestos1} = \frac{TC_1}{TCR} = \frac{5,5}{5,81} = 0,947 \approx 1$$

$$\text{Número.puestos2} = \frac{TC_2}{TCR} = \frac{6}{5,81} = 1,033 \approx 2$$

$$\text{Número.puestos3} = \frac{TC_3}{TCR} = \frac{5,8}{5,81} = 0,998 \approx 1$$

La nueva distribución será la de la figura 18

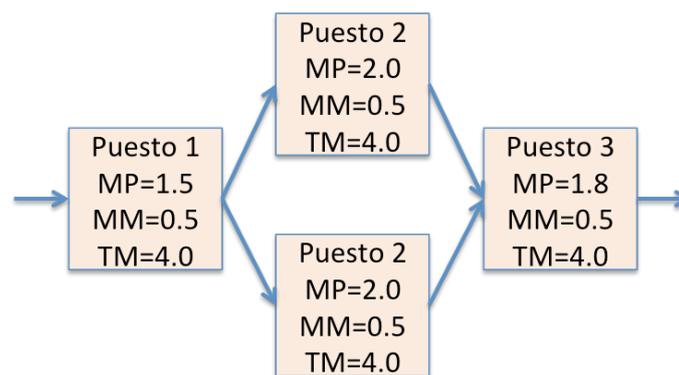


Figura 18. Nueva distribución para un tiempo de tacto inferior

Con el método inicial, asignando un operario a cada puesto de trabajo, se pueden obtener rápidamente las características del sistema aplicando lo expuesto en Vicens-Salort, E. y otros (2010): primero agregación de dos puestos de trabajo en

paralelo, y después agregación de tres puestos de trabajo en serie. El nuevo cuello de botella será el puesto de trabajo 3. De acuerdo con ello se tendrá:

Puesto de trabajo 1:

$TC_1=5,5$ min/pieza; $Cap_1=10,91$ piezas/h;
 $QT_1=2,0$ min.h/pieza; $DP_1=3,5$ min.h/pieza; $DI_1=0,3$ min.h/pieza; $WS_1=5,8$ min.h/p.
 $MS_1=5,8$ min.maq/pieza

Puesto de trabajo 2 agregado:

$TC_{2,2}=3$ min/pieza; $Cap_{2,2}=20$ piezas/h;
 $QT_{2,2}=2,5$ min.h/pieza; $DP_{2,2}=3,5$ min.h/pieza; $DI_{2,2}=5,6$ min.h/pieza; $WS_{2,2}=11,6$
min.h/p.
 $MS_{2,2}=11,6$ min.maq/pieza

Puesto de trabajo 3:

$TC_3=5,8$ min/pieza; $Cap_2=10,34$ piezas/h;
 $QT_3=2,3$ min.h/pieza; $DP_3=3,5$ min.h/pieza; $DI_3=0$ min.h/pieza; $WS_3=5,8$ min.h/p.
 $MS_3=5,8$ min.maq/pieza

Como se observa en la figura:

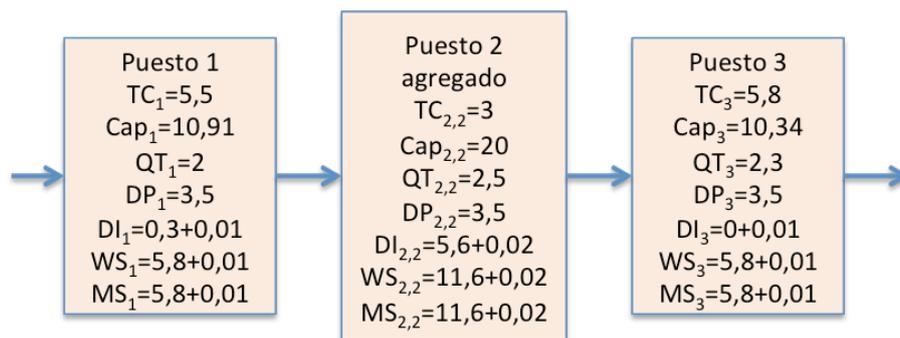


Figura 19. Primer paso en el cálculo de parámetros

Y para el nuevo tiempo de ciclo requerido de 5,81 min/pieza:

Parámetros de la línea agregada ajustada al TCR de 5,81:

$TC_{1,2,2,3}=5,81$ min/pieza; $Cap_{1,2,2,3}=10,33$ piezas/h;
 $QT_{1,2,2,3}=6,8$ min.h/pieza; $DP_{1,2,2,3}=10,5$ min.h/pieza; $DI_{1,2,2,3}=5,94$ min.h/pieza;
 $WS_{1,2,2,3}=23,24$ min.h/p.
 $MS_{1,2,2,3}=23,24$ min.maq/pieza

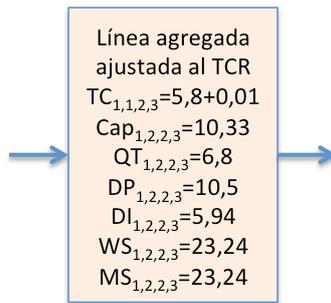


Figura 20. Parámetros de la línea agregados y ajustados al nuevo TCR

Al analizar los resultados se observa que una gran parte de la ineficiencia de la mano de obra (y de las máquinas) es debida a la demora inherente producida por el desequilibrio de las capacidades entre los puestos.

Igualmente se observa que otra gran parte se produce por la demora de procesos en cada una de las máquinas. Para resolver esto último debemos proceder a definir un nuevo método en el que un operario maneje varias máquinas. El primer análisis sería si es posible con un único operario manejar todas las máquinas consiguiendo el TCR definido. Para ello se comprobará si el trabajo que hay que realizar por parte del operario cabe dentro del TCR.

Así pues el operario debería realizar

$$QT_1 + QT_2 + QT_3 + \text{Desplazamientos} = 6,8 + \text{Desplazamientos},$$

que es superior al TCR de 5,81, y por lo tanto no es posible conseguir ese TCR con un operario.

Con dos operarios existen varias alternativas. La que se analiza es aquella en la que un primer operario maneja las dos máquinas del puesto 2, y un segundo operario maneja las máquinas del puesto 1 y del puesto 3.

Este caso se puede analizar como dos puestos de trabajo complejos en serie. Se pueden estudiar los diagramas hombre máquina correspondientes incluyendo los desplazamientos y se tendrá:

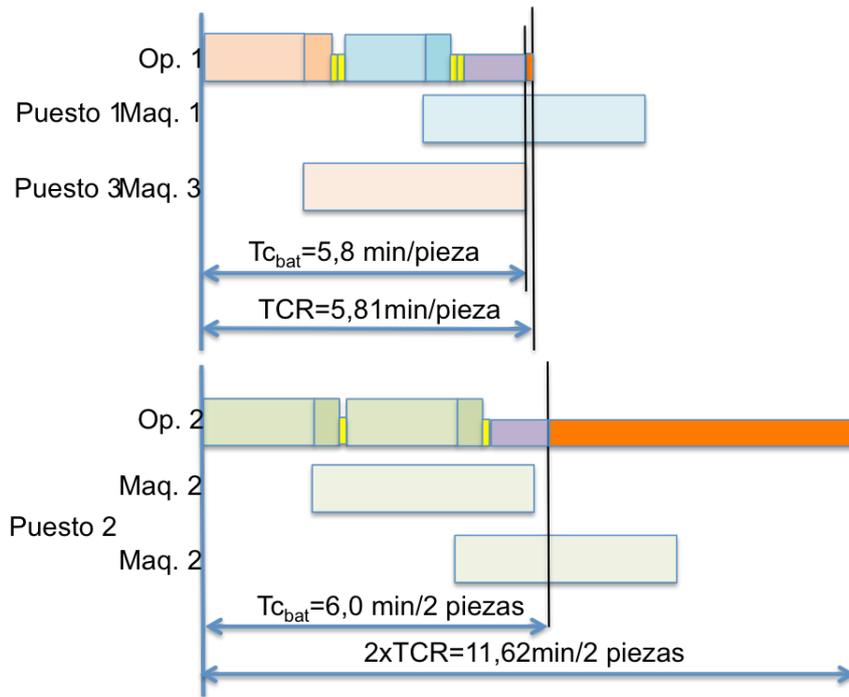


Figura 21. Parámetros de la línea agregados, ajustados al nuevo TCR, con un nuevo método de trabajo de dos operarios

$TC_{1,2,2,3} = 5,81 \text{ min/pieza}$; $Cap_{1,2,2,3} = 10,33 \text{ piezas/h}$;
 $QT_{1,2,2,1} = 6,8 + 0,25 = 7,05 \text{ min.h/pieza}$;
 $DP_{1,2,2,3} = 1,3 + 0,9/2 = 1,75 \text{ min.h/pieza}$;
 $DI_{1,2,2,3} = 0,01 + 5,62/2 = 2,82 \text{ min.h/pieza}$;
 $WS_{1,2,2,3} = 7,05 + 1,75 + 2,82 = 2 \times 5,81 = 11,62 \text{ min.h/p}$.
 $MS_{1,2,2,3} = 4 \times 5,81 = 23,24 \text{ min.maq/pieza}$

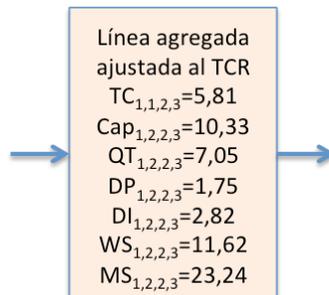


Figura 22. Parámetros de la línea agregados, ajustados al nuevo TCR, con un nuevo método de trabajo de dos operarios

6.3. Conclusiones.

Del análisis de los ejemplos anteriores cabe reforzar las conclusiones que se obtuvieron en *Vicens-Salort, E. y otros (2010)*:

Se puede incrementar la productividad de los operarios disminuyendo la demora de proceso al asignar la operación de varios equipos a un mismo operario.

Se puede incrementar la productividad de los operarios disminuyendo la demora inherente al equilibrar los tiempos de ciclo de las diferentes etapas entre si y estas ajustarlas al Tiempo de Tacto o Tiempo de Ciclo Requerido (TCR).

7. Bibliografía

- Industrial Engineering Training Courses. Planta de Ford España. Almusafes. 1985.
- Introducción al Estudio del Trabajo. Oficina Internacional del Trabajo. Ginebra. 1983. ISBN 92-2-301939-7.
- Manual de Ingeniería de la Producción Industrial (Industrial Engineering Handbook). H.B. Maynard, Editor. Editorial Reverté, SA. Barcelona. 1975. ISBN 84-291-2670-8.
- Handbook of Industrial Engineering. Vol. 2: Performance Improvement Management; Management, Planning, Design, and Control. G. Salvendy, Editor. John Wiley & Sons, Inc. New York. 2001. ISBN 978-0-470-24182-0.
- Ingeniería Industrial. Métodos, Tiempos y Movimientos. B.W. Niebel. Ediciones Alfaomega, SA. México. 1990. ISBN 968-6223-26-6.
- La producción: Planificación, organización y control. S. Eilon. Editorial Labor, SA. Barcelona. 1976. ISBN 84-335-6560-5.
- Conceptos de organización industrial. A. Alonso García. Colección Productica. Marcombo, SA. Barcelona. 1998. ISBN 84-267-1139-1.
- Fabricación libre de despilfarro: Ruta rápida para la reconversión de fábricas. J.W. Davis. TGP Hoshin. Madrid. 2003. ISBN 84-95605-06-8.
- La meta: un proceso de mejora continua. E.M. Goldratt, J. Cox. Ediciones Díaz de Santos, SA. Madrid. 1993. ISBN 84-7978-095-9.
- Diseño de células de fabricación: Transformación de las fábricas para la producción en flujo. K. Sekine. Productivity Press. TGP. Madrid. 1993. ISBN 84-87022-03-0.
- Vicens-Salort, E.; Miralles-Insa, C.; Andrés-Romano, C.: "Diseño de puestos de trabajo simples. Diagramas hombre-máquina y cálculo de la capacidad y de la productividad". Ed. Universitat Politècnica de València, RIUNET, 2010. Disponible en <http://hdl.handle.net/10251/8953>

Tabla 12-1
Números de Ashcroft, 1.ª parte

$n = 1$ a 10 , $p = 0,01$ a $1,0$. Promedio de horas de máquina por hora, A , para un operario encargado de n máquinas semiautomáticas. La relación p del ciclo es la relación a/t .

p	$n = 1$	$n = 2$	$n = 3$	$n = 4$	$n = 5$	$n = 6$	$n = 7$	$n = 8$	$n = 9$	$n = 10$	p
0,00	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	6,00	7,00	8,00	9,00	10,00	0,00
0,01	0,99	1,98	2,97	3,96	4,95	5,94	6,93	7,92	8,91	9,90	0,01
0,02	0,98	1,96	2,94	3,92	4,90	5,88	6,85	7,83	8,81	9,78	0,02
0,03	0,97	1,94	2,91	3,88	4,84	5,81	6,77	7,74	8,70	9,66	0,03
0,04	0,96	1,92	2,88	3,84	4,79	5,74	6,69	7,64	8,58	9,52	0,04
0,05	0,95	1,90	2,85	3,79	4,74	5,67	6,61	7,53	8,45	9,37	0,05
0,06	0,94	1,88	2,82	3,75	4,68	5,60	6,51	7,42	8,31	9,19	0,06
0,07	0,93	1,86	2,79	3,71	4,62	5,52	6,42	7,29	8,15	8,90	0,07
0,08	0,93	1,85	2,76	3,67	4,56	5,44	6,31	7,16	7,98	8,76	0,08
0,09	0,92	1,83	2,73	3,62	4,50	5,36	6,20	7,01	7,78	8,50	0,09
0,10	0,91	1,81	2,70	3,58	4,44	5,28	6,08	6,85	7,57	8,21	0,10
0,11	0,90	1,79	2,67	3,53	4,38	5,19	5,96	6,68	7,33	7,89	0,11
0,12	0,89	1,77	2,64	3,49	4,31	5,10	5,83	6,50	7,08	7,55	0,12
0,13	0,88	1,76	2,61	3,44	4,24	5,00	5,69	6,31	6,81	7,19	0,13
0,14	0,88	1,74	2,58	3,40	4,18	4,90	5,55	6,10	6,53	6,83	0,14
0,15	0,87	1,72	2,55	3,35	4,11	4,80	5,40	5,90	6,25	6,48	0,15
0,16	0,86	1,71	2,52	3,31	4,04	4,70	5,25	5,68	5,97	6,14	0,16
0,17	0,85	1,69	2,50	3,26	3,97	4,59	5,10	5,47	5,70	5,82	0,17
0,18	0,85	1,67	2,48	3,22	3,90	4,48	4,94	5,26	5,44	5,52	0,18
0,19	0,84	1,66	2,44	3,17	3,83	4,37	4,79	5,05	5,19	5,24	0,19
0,20	0,83	1,64	2,41	3,12	3,75	4,26	4,63	4,85	4,95	4,99	0,20
0,21	0,83	1,62	2,38	3,08	3,68	4,15	4,48	4,66	4,73	4,75	0,21
0,22	0,82	1,61	2,35	3,03	3,61	4,04	4,33	4,47	4,53	4,54	0,22
0,23	0,81	1,59	2,33	2,98	3,53	3,94	4,18	4,30	4,34	4,34	0,23
0,24	0,81	1,58	2,30	2,94	3,46	3,83	4,04	4,13	4,16	4,16	0,24
0,25	0,80	1,56	2,27	2,89	3,39	3,72	3,90	3,98	4,00	4,00	0,25
0,26	0,79	1,55	2,24	2,85	3,31	3,62	3,77	3,83	3,84	3,84	0,26
0,27	0,79	1,53	2,22	2,80	3,24	3,52	3,65	3,69	3,70	3,70	0,27
0,28	0,78	1,52	2,19	2,75	3,17	3,42	3,53	3,56	3,57	3,57	0,28
0,29	0,77	1,51	2,16	2,71	3,10	3,33	3,42	3,44	3,45	3,45	0,29
0,30	0,77	1,49	2,14	2,67	3,03	3,23	3,31	3,33	3,33	3,33	0,30
0,31	0,76	1,48	2,11	2,62	2,97	3,14	3,21	3,22	3,22	3,22	0,31
0,32	0,76	1,46	2,09	2,58	2,90	3,06	3,11	3,12	3,12	3,12	0,32
0,33	0,75	1,45	2,06	2,53	2,84	2,98	3,02	3,03	3,03	3,03	0,33
0,34	0,75	1,44	2,03	2,49	2,77	2,90	2,93	2,94	2,94	2,94	0,34
0,35	0,74	1,42	2,01	2,45	2,71	2,82	2,85	2,86	2,86	2,86	0,35
0,40	0,71	1,36	1,89	2,25	2,43	2,49	2,50	2,50	2,50	2,50	0,40
0,45	0,69	1,30	1,78	2,07	2,19	2,22	2,22	2,22	2,22	2,22	0,45
0,50	0,67	1,24	1,67	1,90	1,98	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	0,50
0,55	0,64	1,19	1,57	1,76	1,81	1,82					
0,60	0,62	1,14	1,48	1,63	1,66	1,67					
0,65	0,61	1,10	1,40	1,51	1,54	1,54					
0,70	0,59	1,05	1,32	1,41	1,43	1,43					
0,75	0,57	1,01	1,25	1,32	1,33	1,33					
0,80	0,55	0,97	1,19	1,24	1,25	1,25					
0,85	0,54	0,94	1,13	1,17	1,17	1,18					
0,90	0,53	0,91	1,07	1,11	1,11	1,11					
0,95	0,51	0,87	1,02	1,05	1,05	1,05					
1,00	0,50	0,84	0,98	1,00	1,00	1,00					

Reproducido con autorización de *Productivity and Probability*, de T. F. O'Connor, publicado por Emmott & Co. Ltd., Manchester, 1952.

Tabla 12-2
Números de Ashcroft, 2.^a parte

$n = 11$ a 20 , $p = 0,005$ a $0,27$. Para $n = 17$ hasta $n = 20$, y los valores de p comprendidos entre $0,145$ y $0,27$ se pueden tomar como si $n = 16$.

p	$n = 11$	$n = 12$	$n = 13$	$n = 14$	$n = 15$	$n = 16$	$n = 17$	$n = 18$	$n = 19$	$n = 20$	p
0,000	11,00	12,00	13,00	14,00	15,00	16,00	17,00	18,00	19,00	20,00	0,000
0,005	10,94	11,94	12,93	13,93	14,92	15,92	16,91	17,91	18,90	19,89	0,005
0,010	10,88	11,87	12,86	13,85	14,84	15,83	16,82	17,80	18,79	19,78	0,010
0,015	10,82	11,80	12,79	13,77	14,75	15,73	16,71	17,69	18,69	19,65	0,015
0,020	10,76	11,73	12,71	13,68	14,65	15,62	16,59	17,56	18,53	19,50	0,020
0,025	10,69	11,66	12,62	13,58	14,54	15,50	16,46	17,41	18,37	19,32	0,025
0,030	10,62	11,57	12,53	13,48	14,42	15,37	16,31	17,24	18,17	19,10	0,030
0,035	10,54	11,48	12,42	13,36	14,29	15,21	16,13	17,04	17,94	18,82	0,035
0,040	10,46	11,39	12,31	13,23	14,13	15,03	15,92	16,79	17,64	18,48	0,040
0,045	10,37	11,28	12,18	13,08	13,95	14,82	15,66	16,48	17,27	18,03	0,045
0,050	10,27	11,16	12,04	12,91	13,75	14,57	15,35	16,10	16,81	17,45	0,050
0,055	10,17	11,04	11,89	12,71	13,51	14,27	14,98	15,64	16,23	16,75	0,055
0,060	10,05	10,90	11,71	12,49	13,23	13,92	14,54	15,09	15,56	15,93	0,060
0,065	9,93	10,74	11,51	12,24	12,91	13,52	14,04	14,47	14,80	15,04	0,065
0,070	9,80	10,57	11,29	11,96	12,55	13,06	13,47	13,78	14,00	14,14	0,070
0,075	9,65	10,38	11,05	11,65	12,15	12,56	12,87	13,08	13,20	13,28	0,075
0,080	9,50	10,18	10,79	11,30	11,72	12,03	12,25	12,38	12,45	12,48	0,080
0,085	9,33	9,96	10,50	10,94	11,27	11,49	11,63	11,71	11,74	11,76	0,085
0,090	9,15	9,72	10,19	10,55	10,80	10,96	11,05	11,09	11,10	11,11	0,090
0,095	8,96	9,47	9,87	10,16	10,34	10,45	10,49	10,52	10,52	10,52	0,095
0,100	8,76	9,21	9,54	9,76	9,89	9,96	9,98	9,99	10,00	10,00	0,100
0,105	8,55	8,94	9,21	9,38	9,46	9,50	9,52	9,52	9,52	9,52	0,105
0,110	8,34	8,67	8,88	9,00	9,06	9,08	9,09	9,09	9,09	9,09	0,110
0,115	8,12	8,39	8,56	8,64	8,68	8,69	8,69	8,69	8,69	8,69	0,115
0,120	7,89	8,12	8,24	8,30	8,32	8,33	8,33	8,33	8,33	8,33	0,120
0,125	7,67	7,85	7,94	7,98	7,99	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	0,125
0,130	7,44	7,59	7,65	7,68	7,69	7,69	7,69	7,69	7,69	7,69	0,130
0,135	7,22	7,34	7,38	7,40	7,41	7,41	7,41	7,41	7,41	7,41	0,135
0,140	7,01	7,09	7,13	7,14	7,14	7,14	7,14	7,14	7,14	7,14	0,140
0,145	6,80	6,86	6,89	6,89	6,90	6,90	6,90	6,90	6,90	6,90	0,145
0,150	6,59	6,64	6,66	6,66	6,67	6,67	6,67	6,67	6,67	6,67	0,150
0,160	6,21	6,24	6,25	6,25	6,25	6,25	6,25	6,25	6,25	6,25	0,160
0,17	5,86	5,88	5,88	5,88	5,88	5,88	5,88	5,88	5,88	5,88	0,17
0,18	5,55	5,55	5,55	5,55	5,55	5,55	5,55	5,55	5,55	5,55	0,18
0,19	5,26	5,26	5,26	5,26	5,26	5,26	5,26	5,26	5,26	5,26	0,19
0,20	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	0,20
0,21	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76	4,76	0,21
0,22	4,54	4,54	4,54	4,54	4,54	4,54	4,54	4,54	4,54	4,54	0,22
0,23	4,35	4,35	4,35	4,35	4,35	4,35	4,35	4,35	4,35	4,35	0,23
0,24	4,17	4,17	4,17	4,17	4,17	4,17	4,17	4,17	4,17	4,17	0,24
0,25	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	0,25
0,26	3,85	3,85	3,85	3,85	3,85	3,85	3,85	3,85	3,85	3,85	0,26
0,27	3,70	3,70	3,70	3,70	3,70	3,70	3,70	3,70	3,70	3,70	0,27

Reproducido con autorización de *Productivity and Probability*, de T. F. O'Connor, publicado por Emmott & Co. Ltd., Manchester, 1952.