

El diagrama O-T. Una herramienta visual para la optimización de procesos en entornos *Lean*

Lluís Cuatrecasas Arbós¹, Jordi Fortuny Santos²

¹ Dpto. de Organización de Empresas. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación. Universidad Politécnica de Cataluña. Calle Jordi Girona, 1-3. 08034. Barcelona lluis.cuatrecasas@upc.edu

² Dpto. de Organización de Empresas. Escuela Politécnica Superior de Ingeniería de Manresa. Universidad Politécnica de Cataluña. Avda. Bases de Manresa, 61-73. 08242 Manresa (Barcelona) Jordi.Fortuny@upc.edu

Resumen

El presente trabajo pretende mostrar la utilidad del diagrama O-T (operaciones-tiempo), versión actualizada e informatizada del gráfico de Gantt, para simular el desarrollo de procesos productivos. De una forma fácil, permite obtener los parámetros clave del proceso como su lead time real o el número de unidades heterogéneas de semielaborados, permitiendo sintetizar la expresión analítica de dichas magnitudes (que se incluyen en el artículo), en los casos más simples, y analizar las relaciones entre ellas, para poder proceder a la mejora de procesos. En el caso más complejo, la simulación alcanza fácilmente donde el cálculo analítico ya no puede. Como ejemplo, se muestra la aplicación de esta herramienta en el análisis de un proceso productivo y su transformación según la filosofía de la producción ajustada o lean.

Palabras clave: proceso, lead time, despilfarro, producción ajustada, stocks

1. Introducción

Henry L. Gantt creó su famoso diagrama de barras en 1917. Su uso se ha conservado hasta la utilidad como una manera de programar la producción, planificar la realización de proyectos (conviviendo con los diagramas tipo PERT/CPM desde los años 60) y controlar la realización de tales actividades. La longevidad de esta herramienta se basa en su facilidad de uso, ya que no requiere cálculos, y en el hecho que la información ofrecida es completamente visual, lo que se interpreta como más agradable.

En este trabajo, recuperamos los gráficos de Gantt, convertidos en diagramas Operación-Tiempo (diagrama O-T), con un soporte informático programado sobre hoja de cálculo, que facilita el uso del instrumento como simulador visual, en un contexto determinista, de complejos procesos de producción (Poler, Lario y Doumeings, 2002).

La simulación permite extraer los parámetros principales del proceso como pueden ser el *lead time* real (tiempo desde que empieza a procesarse una orden de producción o un lote de proceso hasta que se completa), el tiempo de ciclo o el stock de productos semielaborados. La obtención de dichas variables sería muy compleja por medios analíticos en el caso de procesos complejos con subprocesos, relaciones de precedencia entre operaciones, cambios en los lotes de transferencia, etc. que ahora se obtienen visualmente. La simulación de dos procesos alternativos permite decidir cual es el mejor en términos de productividad, rapidez, etc.: La simulación permite ver la relación que existe entre las variables clave del proceso y parámetros como el tamaño de lote de transferencia y por lo tanto permite optimizar los procesos y optar por la implantación más conveniente.

2. El contexto lean management

La filosofía de la producción ajustada (*Lean*) se centra en la eliminación de todas las actividades que no añaden valor, con la finalidad de lograr la producción requerida en clase, cantidad, calidad y plazo con el mínimo consumo de recursos posible, con la flexibilidad necesaria para adaptarse a las necesidades cambiantes de los clientes. De este modo se convierte en una filosofía centrada en lo que para muchas empresas son los pilares de su competitividad: la calidad, el coste y la respuesta rápida (Shah y Ward, 2002). Dentro de las actividades a eliminar (despilfarros o *muda* en japonés), se identifican los tiempos de espera (para personas y para los productos), sobreproducción y tiempos de proceso excesivos, manipulaciones y desplazamientos excesivos, niveles de existencias no minimizados y reprocesos por falta de calidad. No obstante, en el presente trabajo, nos centramos en la reducción de tiempos y stocks.

A la hora de mejorar una planta productiva, el sistema de gestión lean se centra en el estudio de los procesos, en la minimización de tiempos, la reducción de manipulaciones y la sincronización de sus operaciones en lugar de basarse en la optimización individual de operaciones productivas que a veces no llevan a la mejora de la eficiencia global.

Por ejemplo, el sistema de gestión de la producción *Lean* elimina los lotes de productos semielaborados que se mueven por la planta de uno a otro lugar de trabajo y forman cola delante de éstos esperando ser procesados puesto que la producción en lotes y los desequilibrios en los tiempos de los procesos son responsables de los stocks en proceso, los cuales generan esperas o tiempos muertos. En su lugar, se instaura un sistema basado en el flujo pieza a pieza, entre puestos de trabajo cercanos, que minimiza las esperas, los tiempos de flujo y los niveles de stocks de productos semielaborados (WIP).

Cuando se trata de planificar y controlar, la filosofía lean prefiere las herramientas visuales (como el diagrama *value stream map* (Hines y Rich, 1997) o la metodología de las 5 S (Hirano, 1995)) por lo que se ha optado por resolver el problema por medio del diagrama O-T, implementado por uno de los autores.

3. Interdependencia entre tamaño de lote, nivel de stock y el *lead time* del proceso

Según la filosofía lean, existencias y tiempos muertos se alimentan recíprocamente: la producción en lotes crea unas existencias de piezas que se acumulan ante las máquinas o puestos de trabajo esperando ser procesadas. Esta relación también favorece que al reducir uno de los parámetros mejoren todos (Cuatrecasas, 1998), pero para poder mejorar un proceso, se debe poder conocer la relación entre estas variables y los valores que toman en el proceso. Una vez comprendida esta relación podrá procederse a reducir los valores del WIP, que antaño eran considerados como un escudo protector para la producción -aunque a costa de su eficiencia (White y Prybutok, 2000)- mientras que hoy en día se consideran un indicador de la mala gestión porque reflejan los problemas que no han sido resueltos (mal aprovisionamiento, mala planificación, mala calidad...) (Ohno, 1991).

Para el cálculo de la relación entre estos parámetros, se utiliza un diagrama O-T (operaciones-tiempos) implementado sobre una hoja de cálculo y una aplicación (macro) en lenguaje Basic. Manualmente (Figura 1), en él representamos las operaciones de un proceso por medio de flechas a distinto nivel con una longitud igual a su tiempo de proceso, medido en una escala de tiempos en el eje horizontal del diagrama. A su vez, las transferencias de materiales entre operaciones, se representan por medio de líneas discontinuas verticales situadas en el momento del tiempo correspondiente a dicha transferencia.

Para empezar, se considera un proceso equilibrado, constituido por N operaciones con el mismo tiempo de ciclo C , en el que se obtiene un lote de producción de Q unidades de producto, compuesto de n lotes de transferencia (con Q/n unidades cada uno), el diagrama O-T (Figura 1) permite apreciar que en un momento en el que todas las operaciones se hallan trabajando, el stock total en proceso WIP , es el de cualquiera de ellas (Q/n), multiplicado por el número de operaciones (Ecuación 1).

El *lead time*, llamado tiempo de proceso o tiempo de paso, para el primer lote de transferencia (LT) es el tiempo transcurrido desde que se inicia la primera operación hasta que finaliza la última. Puede expresarse como el tiempo de proceso del mismo en una operación, por el número de éstas (Ecuación 2). Aplicando la ecuación 2 en la ecuación 1, se obtiene la relación entre el stock en proceso con el *lead time* (Ecuación 3). De ella se deduce que la duración total del proceso es proporcional al stock en proceso y que la reducción del *lead time* (por ejemplo, reduciendo el número de operaciones necesarias o su duración o el tamaño de los lotes de transferencia) comporta la del WIP , de forma automática.

$$WIP = \frac{Q}{n} \cdot N \quad (1)$$

$$LT = \left[C \cdot \frac{Q}{n} \right] \cdot N \quad (2)$$

$$WIP = \frac{LT}{C} \quad (3)$$

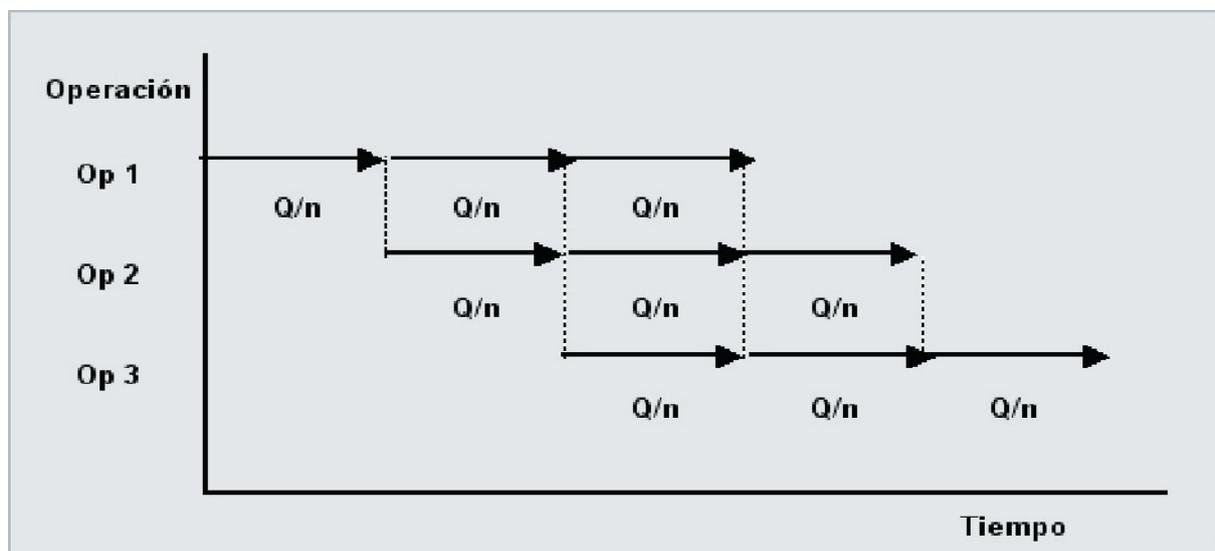


Figura 1. Diagrama O-T manual mostrando un proceso equilibrado y sincronizado.

A continuación, podemos pasar a un caso general, con un proceso no equilibrado donde los ciclos de trabajo C_i ya no son iguales y por tanto tampoco lo es el *lean time* para cada lote de transferencia (LT_i). Intuitivamente, esto produce un aumento del WIP ya que el producto semielaborado saliente de un lugar de trabajo puede tener que esperar para entrar en el siguiente (como el tiempo tc_2 en la Figura 2). El modelo también puede incluir tiempos de preparación (TP_i) y lotes de transferencia distintos en distintas operaciones (aunque de momento no se han considerado). Visualmente, el modelo se representa en la Figura 2.

queda limitado a Q unidades.

La Ecuación 4 permite conocer el stock en proceso generado por el primer lote de transferencia. Con los lotes siguientes, a partir del instante LT_1 , el valor del WIP sufrirá un incremento por la diferencia entre el material que entra en el sistema al ritmo del ciclo de la primera operación C_1 y el material que sale, al ritmo C_M de la operación condicionante o cuello de botella. La simulación determinista también nos permite evaluar la expresión de dicho incremento y elaborar una ecuación para hallar el valor del WIP en cualquier instante T (Ecuación 5).

$$\begin{aligned} WIP &= WIP_1 + \Delta WIP = \frac{LT_1}{C_1} + (T - LT_1) \cdot \left(\frac{1}{C_1} - \frac{1}{C_M} \right) = \\ &= T \cdot \left(\frac{1}{C_1} - \frac{1}{C_M} \right) + \frac{LT_1}{C_M} \cdot T \cdot \left(\frac{1}{C_1} - \frac{1}{C_M} \right) + \frac{Q}{n \cdot C_M} \cdot \sum_1^N C_i \end{aligned} \quad (5)$$

El valor de las existencias crecerá hasta que todo el lote de producción Q haya entrado en el sistema productivo. Esto se produce en el instante $T = C_1 \cdot Q$, por lo que si se calcula el valor del WIP para ese instante, sustituyendo T por su expresión, se obtiene el valor del stock máximo (Ecuación 6).

$$WIP = Q \cdot \left[1 - \frac{1}{C_M} \cdot \left(C_1 - \frac{1}{n} \cdot \sum_1^N C_i \right) \right] \quad (6)$$

La expresión entre corchetes, debido a las restricciones del modelo, es menor que la unidad con lo cual el valor de las existencias en curso de producción no pueden ser mayores que el lote de producción, como debe ser. Además, si en la Ecuación 6 se consideran las condiciones de un proceso equilibrado (todos los ciclos son iguales), se obtiene la Ecuación 1.

4. Cálculo del *lead time* y diagnóstico de la eficiencia del proceso

De acuerdo con los puntos anteriores, una vez que todas las operaciones están ocupadas (finalizado el primer lote de transferencia) el stock en proceso aumenta progresivamente y el *lead time* también debido a las esperas en las estaciones de trabajo. Para el resto de lotes, el producto avanza y sale al ritmo de la operación más lenta, con lo que el *lead time* del lote de producción (LTT) puede determinarse según la Ecuación 7.

$$LTT = LT_1 + C_M \cdot \frac{Q}{n} (n-1) = \frac{Q}{n} \sum_1^N C_i + C_M \cdot \frac{Q}{n} (n-1) = \frac{Q}{n} \left[\sum_1^N C_i + C_M \cdot (n-1) \right] \quad (7)$$

Dado que el último lote de transferencia entra en proceso en $t_n = C_1 \cdot (Q/n) \cdot (n-1)$, el tiempo que se hallará en proceso (LT_n) será el descrito por la Ecuación 8.

$$LT_n = LTT - t_n = LT_1 + C_M \cdot \frac{Q}{n} (n-1) - C_1 \cdot \frac{Q}{n} (n-1) = LT_1 + (C_M - C_1) \cdot \frac{Q}{n} (n-1) \quad (8)$$

A partir de esta expresión podemos comparar el tiempo de flujo de último lote de transferencia con el del primero, que no había sufrido ningún tipo de retraso, lo que nos permite conocer los tiempos perdidos por esperas por este último lote (Ecuación 9), que resulta ser la diferencia

entre los ritmos de salida y entrada al proceso, por el número de unidades afectadas al iniciarse el último lote.

$$D_n = LT_n - LT_1 = (C_M - C_1) \cdot \frac{Q}{n} (n-1) \quad (9)$$

Dicha expresión coincide con el retraso acumulado en el total del lote, lo cual puede verse suponiendo en la Ecuación 7 que el ciclo máximo coincide con el de la primera operación. De este modo, los lotes entran y salen del proceso sin ningún retraso. Entonces, puede compararse este *lead time* sin retrasos LTT_0 con el *lead time* real LTT (Ecuación 10).

$$D = LTT - LTT_0 = \left[LT_1 + C_M \cdot \frac{Q}{n} (n-1) \right] - \left[LT_1 + C_1 \cdot \frac{Q}{n} (n-1) \right] = (C_M - C_1) \cdot \frac{Q}{n} (n-1) \quad (10)$$

En sucesivos apartados, la investigación muestra cómo se modifican las fórmulas para situaciones más complejas (tiempos de ciclo distintos) y finalmente, como sólo queda recurrir al diagrama O-T para analizar un proceso real pues la formulación analítica es insuficiente.

5. Optimización de un proceso mediante el diagrama O-T

Vamos ahora a abordar un modelo para la optimización de sistemas productivos con una complejidad mayor, compuesto de varios procesos interconectados, con lotes de transferencia distintos y con operaciones integradas por varios puestos en paralelo. La complejidad de tales sistemas, aconseja llevar a cabo el análisis y diagnóstico por medio de la simulación, para lo que utilizaremos el diagrama O-T. Mediante la versión informatizada del diagrama, podremos evaluar todas las magnitudes que precisemos, estableciendo el diagnóstico correspondiente e, incluso, se podrá realizar un análisis de sensibilidad que facilitará la optimización del sistema productivo.

El sistema productivo que vamos a utilizar está destinado a la fabricación de aparatos reproductores de DVD (Cuatrecasas, 2006), con dos procesos (uno de fabricación de placas de circuito impreso P y uno de premontaje de dispositivos D) que entregan componentes a un tercero (de montaje final M). El proceso de montaje final M no puede comenzar hasta que todos los que deben enviarle producto lo hayan hecho. Los datos de las operaciones, tiempos de proceso, número de puestos y tamaños de lote de transferencia del sistema productivo son los reproducidos en la tabla 1.

Tabla 1. Parámetros de la implantación funcional del proceso de fabricación de DVD.

| Proceso | Operación | Tiempo (s) | Puestos | Lote |
|--|---|------------|---------|------|
| P: Fabricación placas circuito impreso | P1. Inserción automática de componentes | 180 | 3 | 100 |
| | P2. Soldadura automática | 90 | 1 | 250 |
| | P3. Inserción manual. Conexionado | 120 | 2 | 150 |
| D: Montaje previo de componentes | D1. Montaje dispositivos mecánicos | 60 | 1 | 200 |
| | D2. Montaje dispositivos eléctricos | 48 | 1 | 250 |
| | D3. Ajustes | 84 | 2 | 250 |
| M: Montaje final del DVD | M1. Montaje panel electrónico | 60 | 1 | 10 |
| | M2. Montaje puertos de entrada/salida | 84 | 1 | 5 |
| | M3. Montaje final | 108 | 2 | 10 |

Con estos datos puede construirse el diagrama O-T, a partir del cual obtendremos los valores de las magnitudes que interesa conocer y controlar, así como llevar a cabo el análisis de sensibilidad del comportamiento del sistema productivo. La Figura 3 muestra este diagrama para un lote de producción de 500 unidades de producto. La operación P-3 condiciona la entrega a montaje, ya que el ritmo de todo el conjunto de procesos viene condicionado por el de P-2 cuyo ciclo es de 90 segundos (el mayor de todos), lo que el diagrama refleja con flechas integradas por líneas dobles. La operación P-2 y, con ello el proceso P, serán lo que denominaremos condicionantes del sistema productivo y el ritmo final de obtención de producto lo determinará su tiempo de ciclo. Por otra parte, la Figura 4 con los resultados elaborados por la aplicación basada en el diagrama O-T, muestra gráficamente la evolución del nivel de stock de materiales en proceso (WIP) y de producto para entregar a montaje o acabado, a lo largo del tiempo de duración de los procesos. También muestra la evolución de las entregas de producto para montaje y de producto acabado y, en su parte superior, recoge las magnitudes clave del proceso.

Los resultados muestran un largo plazo de entrega, mucho tiempo perdido en esperas y un elevado valor del stock de productos semielaborados. Para corregir estas deficiencias, se puede simular una implantación distinta. Por ejemplo, modificando parámetros para ver la influencia de un cambio de método que reduce un tiempo de ciclo o bien realizando una reingeniería del proceso. Se ha escogido una implantación celular (Cuatrecasas, 2006) con flujo de piezas unidad a unidad, típico de la filosofía lean: Un mismo operario atiende las necesidades de las operaciones automatizadas P1 y P2; las operaciones P3, D1 y D2 se organizan en una célula en U atendida por cinco operarios en *nagare*; la operación D3 cuello de botella, se deja aislada y marca el tiempo de ciclo de todo el proceso; las operaciones M1, M2 y M3 se implantan en una célula rotativa atendida por tres personas, dos de ellas en *nagare* para equilibrar sus cargas de trabajo e igualarlas lo más posible al tiempo de ciclo. Los lotes de transferencia para las operaciones P1, P2, P3, D1 y D2 es de 10 unidades; para D3 es de 5 unidades y para las operaciones M es de una sola unidad. A continuación, se representa el diagrama O-T para esta nueva configuración. En el presente artículo no se muestra el diagrama O-T de nuevo, si no que se presenta ya la Tabla 2 que compara los resultados obtenidos para los dos tipos de implantaciones.

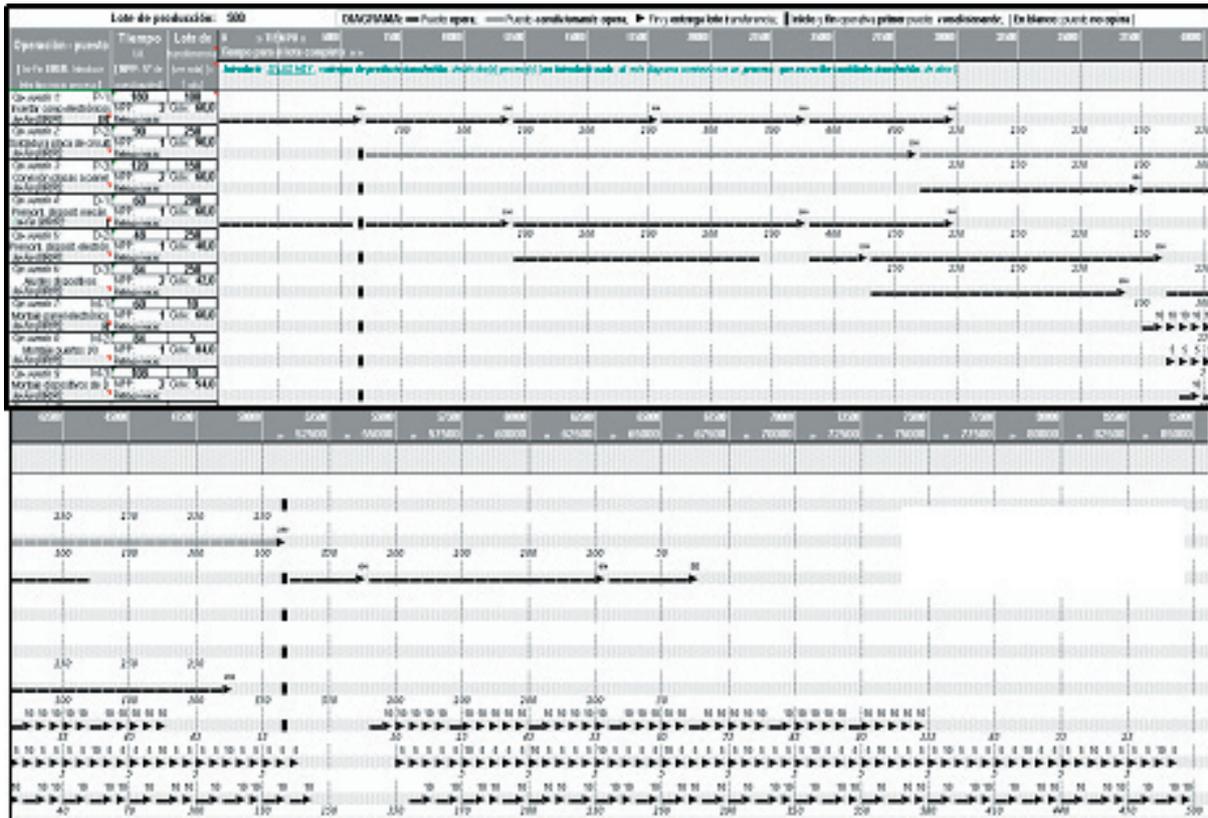


Figura 3. Diagrama O-T correspondiente al proceso de fabricación de reproductores DVD en una disposición funcional.

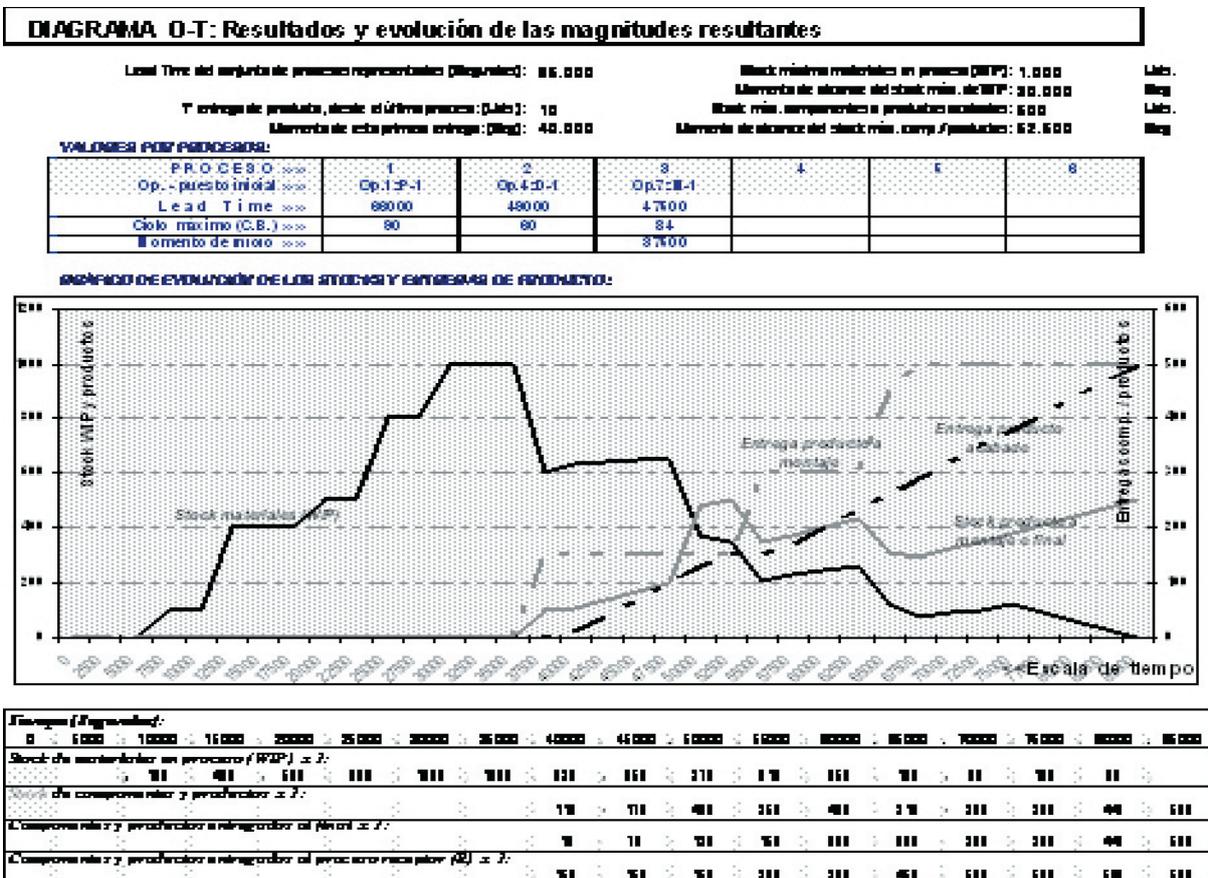


Figura 4. Resultados deducidos del Diagrama O-T aplicado al proceso de reproductores de DVD

Tabla 2. Comparación entre las magnitudes clave del proceso de producción de DVD con distribución funcional y el mismo proceso bajo una filosofía *lean management* y layout celular.

| Magnitudes clave | Implantación | | Mejora Lote 500 u |
|-------------------------------|--------------|-------------|-------------------|
| | Funcional | Celular | |
| Lead time real (h) | 23,6 | 12,2 | -48% |
| Lead time primera unidad (h) | 11,1 | 0,4 | -96% |
| Stock promedio (unidades) | 885 | 10 | -99% |
| Tiempo de espera (h) | 11,6 | 0,08 | -99% |
| Rango del tiempo de ciclo (s) | 90 - 42 = 48 | 84 - 83 = 1 | -98% |
| Personal | 14 | 10 | -29% |
| Producción (unidades/h) | 40 | 43 | +7,5% |
| Productividad (unidades/Hh) | 2,9 | 4,3 | +48% |

6. Conclusiones

El trabajo muestra la utilidad del diagrama O-T informatizado para obtener los principales parámetros de un proceso. Así mismo, muestra los efectos de la filosofía *Lean*, que, al reducir tamaños de lote y equilibrar los tiempos de ciclo, contribuye a la reducción de tiempos de flujo y de stocks.

Los desajustes en la implantación de un sistema productivo, que dan lugar a distintas variantes de *muda* y, por tanto, de ineficiencia, terminan manifestándose en forma de stock acumulado y retrasos en el *lead time* de entrega, lo que supondrá pérdidas de competitividad en costes y plazos.

En los epígrafes anteriores hemos podido evaluar estas pérdidas (valores del stock en proceso máximo, del *lead time* total y de los retrasos producidos por pérdidas de tiempo) para un proceso con desequilibrios con tamaño constante de sus lotes de transferencia. Las expresiones obtenidas para las magnitudes de stock en proceso, *lead time* y tiempo perdido, permiten determinar con exactitud los valores correspondientes, para cada caso y situación, así como identificar con precisión los factores de los que dependen. Esto, a su vez, permite adoptar para cada situación, la estrategia más adecuada.

Un análisis de la expresión correspondiente al nivel de stock en proceso, nos permite identificar las magnitudes que influyen en la generación del mismo y de qué forma lo hacen. Concretamente: i) El tamaño del lote de producción Q , influye de forma directa aumentando el WIP en la misma proporción.; ii) El tiempo de ciclo máximo C_M de la operación condicionante y la suma de todos ellos $\sum C_i$ afectan de forma indirecta, aumentando el stock en proceso; iii) El tamaño del lote de transferencia (cuando disminuye, se reduce también el valor del WIP).

En relación con el *lead time* total, las magnitudes que influyen y el modo en que lo hacen es muy similar: i) El tamaño del lote de producción (Q) y el del lote de transferencia aumentan de forma directa el valor del *lead time*; ii) El tiempo de ciclo máximo C_M de la operación condicionante y la suma de todos ellos $\sum C_i$, aumentan asimismo el *lead time*.

Finalmente, los tiempos de espera acumulados, varían de forma que: i) El tamaño del lote de producción (Q) y el del lote de transferencia aumentan de forma directa el valor de tales esperas; ii) La diferencia entre el ciclo de la operación condicionante y el de la primera operación (que no es otra cosa que el desequilibrio) afecta directamente a los tiempos de espera, que aumentan

al hacerlo esta diferencia.

En conclusión, en un proceso productivo con desequilibrios y tamaños de lote de transferencia iguales, los lotes de producción y transferencia deben ser lo más pequeños posible, ya que aumentan los desajustes que se manifiestan en forma de stock y esperas y, además, alargan el tiempo de entrega. Asimismo los tiempos de ciclo y las diferencias entre ellos, deben minimizarse, para mejorar la eficiencia del proceso, de forma que el tiempo total de entrega y los tiempos perdidos en esperas sean lo menores posible.

La simulación muestra como la implantación lean posee ventajas sobre la funcional: no solo se reduce el *lead time*, si no que también se entrega mucho antes el primer lote de producto, con menores valores del stock en curso y menos personal. Además, destaca la fluidez en el avance de componentes y productos, con regularidad y prontitud en la entrega de los mismos debido al equilibrado de la implantación celular.

Referencias

- Cuatrecasas, L. (1998). Gestión competitiva de stocks y procesos de producción. Gestión 2000.
- Cuatrecasas, L. (2006). Claves de Lean management. Un enfoque para la alta competitividad en un mundo globalizado. Gestión 2000.
- Goldratt, E.; Cox, J. (1984). The goal: a process of ongoing improvement. North River Press.
- Hines, P.; Rich, N. (1997). The Seven Value Stream Mapping Tools. International Journal Of Operations And Production Management, vol. 17, No. 1, pp. 46-64.
- Hirano, H. (1995). 5 Pillars of the visual workplace. Productivity Press.
- Ohno, T. (1991). El sistema de producción Toyota. Gestión 2000.
- Poler, R.; Lario, F.C.; Doumeingts, G. (2002). Dynamic modelling of Decision Systems (DMDS). Computers In Industry, No. 49, pp.175-193.
- Rachna S.; Ward, P.T. (2002). Lean manufacturing context, practice bundles, and performance. Journal Of Operations Management, Vol. 21, No. 2, pp. 129-149.
- White, R.E.; Prybutok, V. (2000). The relationship between JIT practices and type of production system. Omega, Vol. 29, No. 2, pp. 113-124.