

UNA MEJORA DE PROCESO POR TÉCNICAS DE SIMULACIÓN DISCRETA: REDUCCIÓN DE “MURA” (1ª PARTE)

Julio César Puche-Regaliza

(Escuela de Ingenierías Industriales de la Universidad
de Valladolid).

José Costas-Gual

(Fundación Parque Científico de la Universidad de
Valladolid).

1. INTRODUCCIÓN

Las líneas de fabricación que forman parte de un sistema productivo están compuestas por un conjunto finito de estaciones de trabajo y de tareas que tienen asignado un tiempo de proceso y un conjunto de relaciones de precedencia que especifican el orden de proceso permitido de dichas tareas. Estas líneas de fabricación se ven afectadas por numerosos problemas de eficiencia. Siguiendo la terminología del *Toyota Production System*, los problemas de eficiencia se denominan desperdicio y se clasifican en tres grandes categorías según sea su naturaleza: (1) MURI, que agrupa aquellos problemas que atentan contra la estabilidad de las operaciones generando una alto nivel de agobio y una pérdida de motivación; (2) MUDA, que es un término muy general en el que englobamos la sobreproducción, el sobre-proceso, el exceso de inventarios, los transportes, los movimientos de los operarios y un largo etcétera de despilfarro esencial, es decir, lo que ocurre cuando estamos cumpliendo los estándares operacionales; y (3) MURA, que significa falta de balance o mal equilibrio de las cargas de trabajo en las diferentes estaciones de dicha línea de fabricación [9].

La ausencia de MURI, MUDA y MURA es una utopía, pues supondría un flujo optimizado de tal modo que agotáramos toda la capacidad instalada entregando cada producto al ritmo exacto de la demanda de los clientes. Por este motivo, *Toyota Production System*, que es un sistema de fabricación modelo, incorpora la filosofía KAIZEN¹

¹ El término japonés KAIZEN significa mejora continua progresiva y ordenada. La filosofía KAIZEN establece un desafío permanente al “status quo”, de forma que inspira a las personas a cooperar para la búsqueda de un ideal de perfección inalcanzable, pero al que nos vamos aproximando una y otra vez en cada ciclo PDCA. Adoptar la filosofía KAIZEN supone la continua reducción de los 7 tipos de desperdicio que siempre existen en toda cadena de valor. Además, supone apostar por una organización que aprende, que se ocupa de una forma estructurada de la capacitación permanente a todos los niveles, y que promueve una actitud de pensamiento crítico. Precisamente es esa actitud de pensamiento crítico la que busca no sólo eliminar el desperdicio evidente (como la chatarra, el retrabajo, etc.), sino el desperdicio

(mejora continua), cuyo efecto es la reducción permanente del desperdicio esencial (inherente al estándar del proceso) [9].

Es posible demostrar, mediante técnicas de simulación discreta, el efecto favorable que la reducción de MURA provoca sobre la capacidad disponible de una línea de fabricación y como consecuencia en la productividad de la cadena de valor. Nos centramos por lo tanto en el problema de un mal equilibrado de las líneas de fabricación (ALBP: *Assembly Line Balancing Problem*). Básicamente, este problema consiste en asignar las tareas a la secuencia ordenada de estaciones, de tal manera que se satisfagan las relaciones de precedencia y se optimice una función objetivo, como por ejemplo, alcanzar una explotación óptima de la capacidad disponible en dichas líneas de fabricación [2] [6].

En primer lugar, vamos a justificar la utilización y mostrar los conceptos generales de las técnicas de simulación discreta. Con esa base, será posible desarrollar el modelo de un sistema real que nos permita simular su comportamiento y como consecuencia confirmar o refutar la hipótesis de partida, es decir, si efectivamente, la reducción de MURA en las líneas de fabricación provoca un efecto favorable en la capacidad disponible. Las conclusiones nos indicarán líneas de trabajo futuras a seguir.

2. TÉCNICAS DE SIMULACIÓN DISCRETA.

Para simplificar, diremos que existen dos caminos para llevar a cabo el estudio de un sistema. O bien se experimenta con el propio sistema, o bien se experimenta con un modelo del sistema. Dicho modelo puede ser un modelo físico o un modelo matemático en el que encontramos un conjunto de supuestos, estructurales y cuantitativos, acerca del modo en el que el sistema trabaja. Desde un modelo matemático podemos alcanzar una solución analítica o desarrollar un modelo de simulación o conjunto de algoritmos software que imitan la conducta del sistema real, permitiéndonos observar su conducta (características relevantes) a lo largo del tiempo. Por último, los modelos de simulación pueden dividirse en modelos de simulación continua y modelos de simulación discreta en función del sistema que queramos simular. El primer caso, contiene variables preponderantemente de tiempo continuo, que pueden cambiar en cualquier momento. Los cambios se expresan mediante ratios empleando ecuaciones diferenciales y los resultados se obtienen en el largo plazo. Por otra parte, la simulación de sistemas discretos, contiene variables preponderantemente de tiempo discreto, que pueden cambiar en momentos discretos de tiempo. Interesa el seguimiento de los cambios de estado del sistema como consecuencia de la

esencial (que es el que ocurre cuando hacemos las cosas bien a la primera, de acuerdo con el estándar vigente).

ocurrencia de sucesos o eventos. Las ecuaciones del modelo son las relaciones lógicas que determinan la ocurrencia de un suceso o evento [1] (Figura 1).

La simulación se utiliza como paradigma para analizar sistemas complejos. Se aconseja su aplicación por ejemplo, cuando no existe una completa formulación matemática del

En cualquier caso, debemos tener claro que la simulación no resuelve los problemas por sí misma, sino que ayuda a identificar los problemas relevantes y evaluar cuantitativamente las soluciones alternativas. Permite responder a preguntas del tipo ¿qué pasaría en el sistema si se hiciera tal o cual cosa?, desarrollar sistemas que necesitan

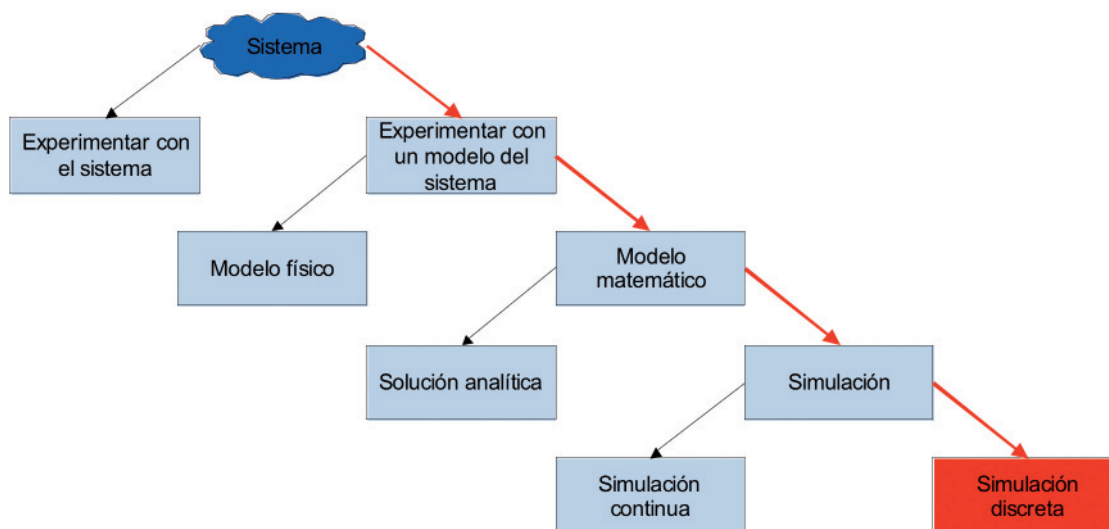


Figura 1: Estudio de la conducta de un sistema real (basado en [8])

problema (líneas de espera, problemas nuevos, etc.), cuando el sistema aún no existe (aviones, carreteras, etc.), cuando es necesario desarrollar experimentos pero su ejecución en la realidad es difícil o imposible (armas, medicamentos, campañas de marketing, etc.), cuando se requiere cambiar el periodo de observación del experimento (cambio climático, migraciones, población, etc.) o cuando no se puede interrumpir la operación del sistema actual (plantas eléctricas, carreteras, hospitales, etc.). Por el contrario, es desaconsejable su utilización cuando el desarrollo de la simulación es costoso comparado con sus beneficios o cuando la simulación es imprecisa y no se puede medir su imprecisión (el análisis de sensibilidad puede ayudar) [8].

Ante esta situación, parece clara la justificación de la utilización de técnicas de simulación discreta en este trabajo, apoyándonos además en la mejora de los ratios rendimiento-precio de los computadores y en los avances en la potencia, flexibilidad y facilidad de uso de programas informáticos de simulación. Estos avances han conducido a una mayor utilización de la simulación frente a otros métodos tradicionales en investigación de operaciones como los análisis estadísticos, las series temporales, la programación lineal, la programación no lineal, las redes PERT/CPM, la teoría de inventarios o la teoría de colas. Este incremento de su utilización a lo largo de los años se ve reflejado por una serie de ventajas que superan claramente a los inconvenientes que produce [8] [1].

estar en una situación bajo control, etc. No habrá ningún daño en el sistema real y la libertad para probar cualquier idea en el modelo puede descubrir alternativas atractivas que no habríamos sido capaces de poner en marcha con el sistema real. Por lo tanto, en esta forma de estudiar un sistema real, partiremos del propio sistema real y de un sistema simulado. El sistema simulado imita las operaciones del sistema real sobre el tiempo [8].

3. VALIDACIÓN DEL EFECTO FAVORABLE DE LA REDUCCIÓN DE MURA EN LAS LÍNEAS DE FABRICACIÓN SOBRE EL INCREMENTO DE LA CAPACIDAD DISPONIBLE²

Vamos a intentar validar el efecto favorable de la reducción de MURA en las líneas de fabricación sobre el incremento de la capacidad disponible. Para ello emplearemos técnicas de simulación discreta, lo que nos permitirá estudiar la conducta del sistema de producción antes y después de aplicar dicha reducción sin someternos al coste experimental que supondría una experimentación en la realidad.

² Aunque el caso está inspirado en un sistema real, todos los datos han sido alterados para proteger su confidencialidad.

Aula DYNA

De manera resumida, el estudio de un sistema real mediante técnicas de simulación discreta, nos obliga en primer lugar a construir y verificar un modelo de simulación y en segundo lugar, a analizar diferentes escenarios alternativos con el modelo construido. En la Figura 2, podemos ver de manera detallada todas las etapas necesarias para completar este tipo de estudios [1].

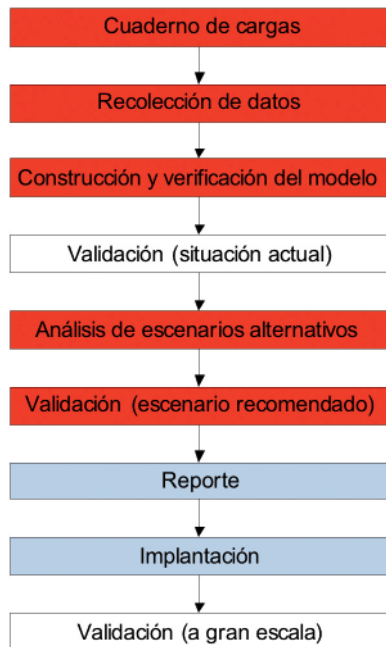


Figura 2: Etapas del estudio de un sistema real mediante técnicas de simulación discreta (basado en [1])

A continuación, desarrollaremos las etapas señaladas en color rojo (Figura 2) en diferentes subapartados intentando

confirmar la hipótesis de partida: $H_A =$ La reducción de MURA en las líneas de fabricación, provoca un efecto favorable sobre la capacidad disponible. Omitiremos el resto de etapas en este trabajo.

3.1. Cuaderno de cargas

En esta etapa definimos el sistema que queremos estudiar. Para ello, en primer lugar elaboramos un esquema del proceso a alto nivel, obteniendo así una primera perspectiva global. Este esquema nos permitirá definir los objetivos del sistema, sus fronteras, su alcance y sus limitaciones. A continuación examinamos las preocupaciones de los clientes internos y externos del sistema y por último definimos una serie de indicadores cuantitativos que nos permitan evaluar dichas preocupaciones [1].

El sistema a estudio (universo del problema) (Figura 3) es una línea de fabricación de piezas discretas. En este trabajo modelaremos una versión simplificada, dos máquinas de ensobrado (máquinas que forman un sobre en cuyo interior está una placa de plomo) vierten cada una de ellas sobre una cinta de transporte. Una máquina de soldadura se alimenta (aguas abajo) desde una tercera cinta de transporte. El diseño es una clásica disposición en V, en la que las máquinas de ensobrado vierten cada una de ellas por arriba de un vértice de la V y el flujo se acumula en el valle de la V, desde donde se alimenta la máquina de soldadura. Las máquinas de ensobrado hacen un trabajo equivalente y permutable de una a otra, pero son de diferentes tecnologías. La máquina de ensobrado#1 es más antigua, por lo que conviene trabajar con ella estableciendo tiempos de ciclo más largos para prevenir atascos (fallos por el arrastre de placas en los rodillos a alta velocidad). Por su parte, la máquina de soldadura es el cuello de botella de toda la línea de fabricación. Además es el activo más caro de la línea.

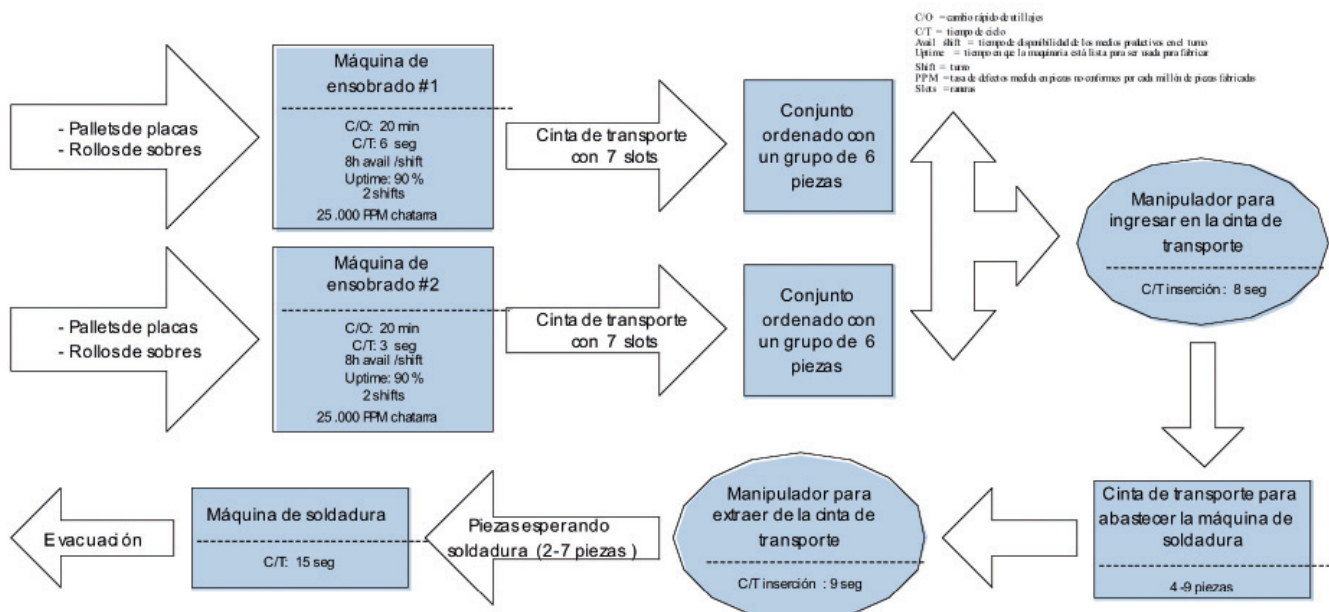


Figura 3: Esquema del proceso a alto nivel (elaboración personal)

Como hemos dicho, la máquina de ensobrado#1 es más lenta, tarda 6 segundos en completar una pieza, por lo que tardará $6 * 6 = 36$ segundos en completar un conjunto ordenado de 6 piezas. Por su parte, la máquina de ensobrado#2, más moderna y rápida, tarda 3 segundos por pieza, luego $3 * 6 = 18$ segundos. Por lo tanto, entre las dos máquinas, podrán ingresar $1,67 + 3,34 = 5,01$ conjuntos ordenados de 6 piezas por minuto en la cinta de transporte. Por su parte, el ritmo de consumo de la máquina de soldadura (aguas abajo) es de $60 / 15 = 4$ conjuntos ordenados de 6 piezas por minuto.

Una vez situado el universo del problema, examinamos las preocupaciones de los clientes internos y externos de esta línea de fabricación de piezas discretas. Vamos a suponer que hemos seleccionado las siguientes CTS (*critical-to-customer satisfaction*), es decir, aquellas características que preocupan a las personas:

- Maximizar el flujo que atraviesa la máquina de soldadura. Queremos explotar la capacidad de esta máquina al máximo.
- Minimizar los problemas de atascos en la máquina de ensobrado#1. Queremos dosificar el ritmo de las máquinas de ensobrado explotando el ritmo de la máquina de ensobrado#2 (la más rápida) a su máximo. De este modo, podemos dejar la máquina de ensobrado#1 al menor ritmo posible, siempre que sea suficiente para mantener el *takt time*³ en el cuello de botella.

La siguiente tarea, una vez seleccionados los CTS, es asociarlos a diferentes indicadores de gestión cuantitativos (métricas). Estas métricas o KPI's (*Key Performance Indicator*), nos permitirán estudiar el rendimiento del sistema.

- Recuento del volumen de producción (unidades producidas).
- Medición del tiempo que hemos tardado en producir dicho volumen de producción (calculado en *takt times*).

Para demostrar la hipótesis de partida (apartado 3), emplearemos como función objetivo el rendimiento del sistema, que evaluaremos a través del indicador:

MU (*Machine Utilization*) = recuento del volumen de producción / medición del tiempo que hemos tardado en producir dicho volumen de producción (calculado en *takt times*). El óptimo de este indicador es alcanzar el 100%.

3.2. Recolección de datos

Para abordar el ejercicio de simulación recopilamos datos de la realidad con el fin de determinar la situación de partida, obteniendo las leyes de llegada de los eventos al sistema y de los tiempos de servicio de las estaciones de

valor añadido, de los canales de transporte, etc. [1]. Para ello, se diseñan procedimientos y formularios normalizados para la recogida de datos [3] y se lleva a cabo dicha recogida de datos empleando técnicas de muestreo [5], ofreciendo así una aceptable consistencia científica y una aceptable validación de los datos de entrada. Para profundizar en temas relacionados con control estadístico de proceso utilizado a lo largo de este trabajo puede consultarse [10].

En primer lugar, consideramos como fuente de datos la demanda derivada desde el cliente externo para las piezas que producimos en la cadena de valor (línea de montaje). La demanda externa llega granulada en periodos de tiempo diarios. Tomamos la explosión que hace el MRP (*Material Requirements Planning*). Los datos obtenidos para la demanda derivada y los resultados del procesamiento de la muestra permiten estimar la ley de distribución asociada a este evento del sistema.

En segundo lugar, la estación de trabajo. Elegimos el *break event*, es decir, el evento que vamos a observar para pulsar el cronómetro en cada ciclo y así medir la duración del ciclo como el tiempo entre dos *break event* consecutivos. Siempre teniendo en cuenta una situación de régimen permanente, lo que significa no incluir en el estudio los casos en que la muestra está viciada por un evento extraño al proceso. Los datos obtenidos para el tiempo de ciclo de una estación de trabajo medido en minutos y los resultados del procesamiento de la muestra para estimar la ley de distribución asociada a este evento del sistema.

De esta manera, demostramos que los datos recogidos se ajustan a determinadas leyes de distribución que serán las empleadas en el modelo de simulación. En particular, para los ejemplos mostrados, tanto la demanda derivada como el tiempo de ciclo de la estación de trabajo puede ser estimada mediante una ley de distribución Normal.

(Concluirá en el próximo número)

4. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Banks J, Carson JS, Nelson BL. (1995). *Discrete Event Systems Simulation*. 2nd edition. Prentice-Hall.
- [2] Baybars I. (1986). "A survey of exact algorithms for the simple assembly line balancing problem". *Management Science*. August. Vol. 32 N° 8 p. 909-932.
- [3] Bicheno J. (2002). *The quality 75: Towards Six Sigma performance in service and manufacturing*. PICSIE Books.
- [5] García-Pérez A. (1992). *Estadística aplicada: Conceptos básicos*. Universidad Nacional de Educación a Distancia.
- [6] Ghosh S, Gagnon R. (1989). "A comprehensive literature review and analysis of the design, balancing and scheduling of assembly systems". *International Journal of Production Research*. April. Vol. 27 N° 4 p. 637-670.
- [8] Kelton D, Sadowski R, Sturrock D. (2004). *Simulation with ARENA*. 3th edition. McGraw-Hill.
- [9] Liker J, Meier D. (2006). *The Toyota Way Fieldbook*. McGraw-Hill.
- [10] Thompson J, Koronacki J. (2002). *Statistical Process Control: The Deming Paradigm and Beyond*. Second Edition. Chapman and Hall/CRC.

³ Representa el intervalo de tiempo en que debemos producir una unidad para alcanzar el ritmo de la demanda del cliente. Si el tiempo de producción por jornada son 800 minutos y la demanda son 400 piezas, entonces el *takt time* es de 2 minutos por pieza.