

UNA MEJORA DE PROCESO POR TÉCNICAS DE SIMULACIÓN DISCRETA: REDUCCIÓN DE “MURA” (2ª 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).

3.3 Construcción y verificación del modelo¹

La construcción de un modelo de simulación consiste en capturar lo más relevante del sistema real para comprender cómo el sistema trabaja. Para ello identificaremos los elementos, las variables y los eventos relevantes en cuanto al objeto del estudio. En cualquier caso, este proceso de abstracción debe ser lo suficientemente detallado como para que la información que se extraiga del modelo sea la misma que se extraería del sistema real si hubiéramos experimentado con él. De manera simultánea a la construcción del modelo

realizamos la verificación² del mismo, comprobando su idoneidad. Comprobamos que su arquitectura está libre de errores lógicos y de problemas de conducta, es decir, que el modelo se comporta de la manera que queremos que se comporte, llevando al usuario a un nivel de confianza adecuado [1].

Con esta metodología, hacemos crecer el modelo sobre un sustrato cada vez más grueso y confiable, ya que es verificado progresivamente. Los fallos a depurar sólo estarán, presumiblemente, en la capa que estamos añadiendo y/o en los acoplamientos. Para este último caso, se ha intentado diseñar acoplamientos muy robustos (*weak coupling*), es decir, se ha intentado que entre unos componentes y otros exista nula intrusión, lo cual es una muy importante característica de calidad en el diseño de sistemas complejos. Podemos ver en la Figura 4 el *TOP LEVEL* del modelo³ del caso expuesto en la 1ª parte (ver DYNA de agosto de 2011).

Antes de comenzar con la construcción del modelo, queremos resaltar en este punto el empleo de una estrategia de modelado incremental, de forma que en cada versión vamos agregando grado de detalle para ganar precisión y de técnicas de modelado inverso (modelado hacia atrás). Estas técnicas se caracterizan por estudiar los flujos desde la perspectiva del cliente y viajando aguas arriba (contra el flujo en vez de a favor de flujo). Su principal ventaja es que

en todo momento mantenemos al cliente a la vista. Cada vez que remontamos corriente arriba, ganamos el foco sobre el cliente, el cual ya está implementado. Además, ha sido implementado para satisfacer sus necesidades, no las necesidades de los proveedores.

De esta manera, cuando en el *TOP LEVEL* sólo tengamos implementado lo que podemos

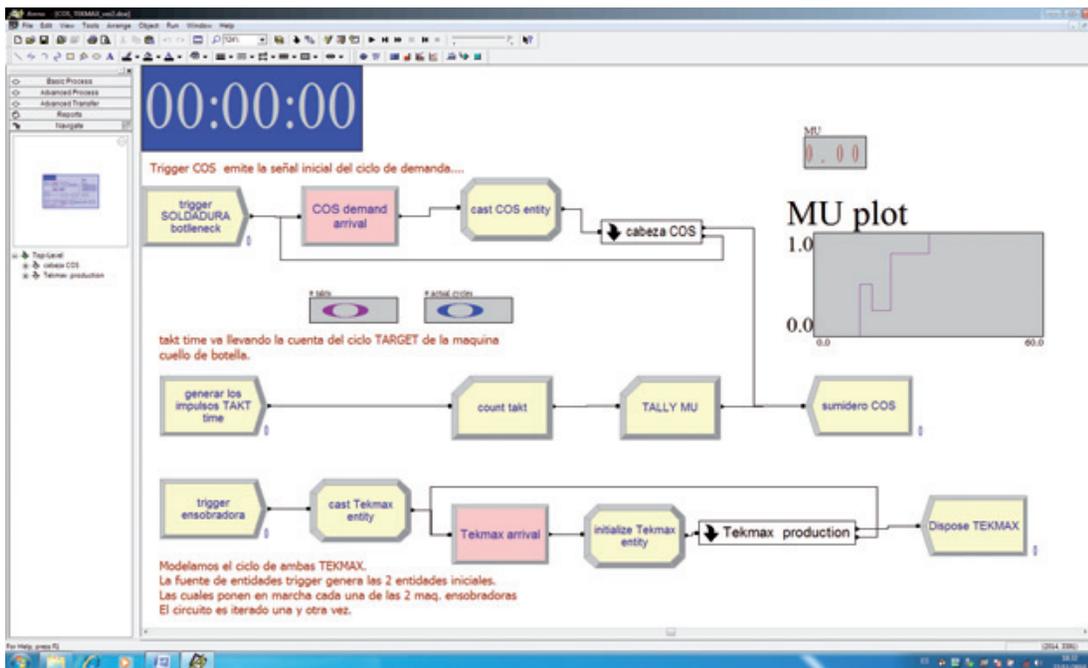


Figura 4: *TOP LEVEL* del modelo (elaboración personal).

¹ Para la construcción y verificación del modelo se ha utilizado el software ARENA® v.11 por tratarse de una de las herramientas más utilizadas en la industria para aplicaciones de simulación por eventos discretos.

² Para facilitar la verificación, se han utilizado ayudas visuales en las diferentes pizarras de construcción del modelo.

³ Para obtener el código del modelo contactar con los autores del trabajo.

ver representado en la Figura 4 (sin profundizar en los subsistemas), vamos a poder ejecutar el modelo y revisar el funcionamiento de este nivel inicial. Para ello se utilizarán componentes simples desechables, que posteriormente serán eliminados del modelo y que nos van a permitir adaptar las partes que faltan en dicho modelo aguas arriba.

Después de esta puntualización, comenzamos con la construcción del modelo. La primera hebra del modelo (parte superior de la Figura 4) representa el funcionamiento de la máquina de soldadura que precisamente, es el cuello de botella del sistema. Es un sistema iterativo que utiliza el subsistema cabeza COS para representar la propia máquina de soldadura. En este subsistema, se extrae una pieza de la cinta de transporte y se despacha en la máquina de soldadura durante un determinado tiempo de ciclo. Posteriormente se libera la máquina de soldadura y se incrementa el número de productos fabricados en cada unidad de tiempo.

La siguiente hebra (parte central de la Figura 4) tiene como cometido gestionar el *takt time*. En cada periodo de tiempo marcado como *takt time*, se incrementa en uno el recuento de los *takt times* transcurridos.

Por último, la hebra de la parte inferior de la Figura 4 tiene por objeto poner en marcha el sistema de las dos máquinas de ensobrado. Seguimos con la política de crear una entidad dedicada a gobernar el flujo por cada agente productivo. En este caso, una entidad por cada máquina de ensobrado. Estas dos entidades circulan de manera cíclica por la hebra utilizando el subsistema Tekmax *production*, el cual representa a las máquinas de ensobrado. Las máquinas de ensobrado deben ser capaces de mantener el stock en la cinta de transporte para nutrir a la máquina de soldadura. La lógica que sigue este subsistema es capturar los recursos para depositar una pieza en la cinta de transporte a la espera de que la máquina de soldadura la requiera, demorar el tiempo de la operación y por último, liberar los recursos.

Completamos así el modelo de un sistema en el que dos máquinas aguas arriba cooperan aportando caudal hacia una máquina consumidora aguas abajo. El sistema está apoyado por cintas de transporte, manipuladores y una nueva cinta de transporte para el acoplamiento entre las máquinas de ensobrado y la máquina de soldadura.

3.4 Análisis de escenarios alternativos.

En este apartado, analizamos diferentes escenarios alternativos a la situación actual. Se trata de que el modelo explique con un nivel de satisfacción⁴ adecuado (típicamente se trabaja con un error alfa del 5% como valor umbral) que los cambios propuestos significan una mejora significativa con respecto a la situación actual. Este análisis se divide en tres etapas (1) diseño de experimentos, (2) ejecución de los tratamientos del diseño y (3) conclusiones o propuestas de cambios [1]. En este trabajo, debido a la sencillez de los

experimentos realizados, pasamos directamente a la etapa de ejecución de los tratamientos del diseño, la cual nos permitirá extraer conclusiones en base a los resultados obtenidos y como consecuencia apoyar la toma de decisiones.

Procedemos por tanto a ensayar los diversos tratamientos (combinaciones de parámetros) para obtener un modelo matemático del sistema. Los parámetros (espacio de decisión) seleccionados para el estudio son los siguientes:

- La posible influencia de la velocidad de ciclo de la máquina de ensobrado lenta (máquina de ensobrado#1). (A_delta_CT_TM1).
- El tamaño de la cinta transportadora que abastece la máquina de soldadura. (B_acumSize).
- La capacidad del canal que fluye desde el manipulador para extraer de la cinta de transporte hasta la máquina de soldadura. (C_channel).
- El número adicional de slots con que dotamos a la cinta de transporte de la máquina de ensobrado lenta (máquina de ensobrado #1). (D_delta_cangil_TM1).
- La política de bloqueos de los elementos mecánicos que mueven el material por la instalación. (E_policy).

A continuación, diseñamos un experimento paramétrico ortogonal (matriz L8 de Taguchi) (Tabla 1), procedemos con la recolección de resultados y los procesamos con ANOVA-GLM [4]. La métrica Y para los resultados, es elegida en función de las principales preocupaciones para los clientes. Usaremos por tanto el indicador MU (aprovechamiento de la capacidad instalada) (apartado 3.1).

Una matriz con un diseño de experimentos (*inner array*) combina niveles de diferentes factores⁵. Cada factor está en una columna de la matriz. Cada fila de la matriz (tratamiento) representa una combinación de niveles de factores a experimentar. Cada fila es ensayada varias veces (réplicas) para estimar lo que es conocido como error experimental. El efecto de los factores (*main effects*) es estimado aplicando la técnica de la tabla ANOVA-GLM (análisis de la varianza) [4].

CT_TM1	acumSize	channel	cangil_TM1	policy
2	4	2	0	Débil
2	4	2	7	Fuerte
2	9	7	0	Débil
2	9	7	7	Fuerte
6	4	7	0	Fuerte
6	4	7	7	Débil
6	9	2	0	Fuerte
6	9	2	7	Débil

Tabla 1: Matriz L8 de Taguchi⁶ (elaboración personal).

⁵ Tales matrices están definidas en la literatura y en los productos de software estadístico.

⁶ Genichi Taguchi, ingeniero japonés creador, entre otros, de un método reducido de experimentos, expresado en matrices que representan los factores y niveles a considerar para los parámetros del proceso que se estudia optimizar.

⁴ Error alfa o error de 1ª especie que mide el riesgo de rechazar la hipótesis nula de un test, si en realidad la hipótesis nula fuera cierta.

El gráfico de efectos principales (Figura 10) muestra que la política de bloqueo es un factor aparentemente muy influyente en el modelo.

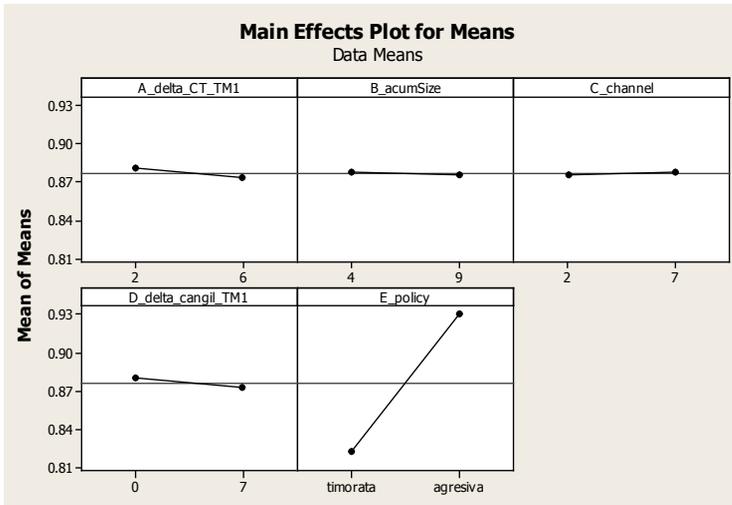


Figura 10: Gráfico de efectos principales (elaboración personal).

Y la tabla ANOVA-GLM lo confirma (Tabla 2).

Analysis of Variance for Y_MU, using Adjusted SS for Tests						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
A_delta_CT_TM1	1	0.0001125	0.0001125	0.0001125	9.00	0.095
B_acumSize	1	0.0000125	0.0000125	0.0000125	1.00	0.423
C_channel	1	0.0000125	0.0000125	0.0000125	1.00	0.423
D_delta_cangil_TM1	1	0.0001125	0.0001125	0.0001125	9.00	0.095
E_policy	1	0.0231125	0.0231125	0.0231125	1849.00	0.001
Error	2	0.0000250	0.0000250	0.0000125		
Total	7	0.0233875				

S = 0.00353553 R-Sq = 99.89% R-Sq(adj) = 99.63%

Tabla 2: Tabla ANOVA-GLM (elaboración personal).

Al 10% de significación estadística (valor umbral usual para evaluar los experimentos diseñados), la velocidad de ciclo de la máquina de ensobrado lenta (A_delta_CT_TM1), el número adicional de slots de la cinta de transporte de la máquina de ensobrado lenta (D_delta_cangil_TM1) y la política de bloqueo de los elementos mecánicos que mueven el material por la instalación (E_policy), son factores que influyen significativamente en la respuesta MU (aprovechamiento de la capacidad). A continuación, hacemos una predicción estableciendo los parámetros a los mejores niveles para MU (Tabla 3).

Taguchi Analysis: Y_MU versus A_delta_CT_TM1, B_acumSize, C_channel, D_delta_cangil_TM1, E_policy	
Predicted values	
Mean	0.9375

Tabla 3: Predicción de la respuesta promedio con los parámetros a sus mejores niveles (elaboración personal).

3.5 Validación (escenario recomendado)

Una vez identificado este tratamiento óptimo, realizamos la validación del escenario recomendado con

un test de hipótesis que contrasta si la capacidad con este tratamiento es significativamente mayor (o no) que con el tratamiento empleado normalmente. Dicho test de hipótesis nos ha permitido confirmar la hipótesis de partida ($H_A =$ La reducción de MURA en las líneas de fabricación, provoca un efecto favorable sobre la capacidad disponible), es decir, la capacidad de línea es superior con el tratamiento optimizado obtenido por diseño paramétrico versus el tratamiento ordinario utilizado en dicha línea.

4. CONCLUSIONES

Uno de los problemas más complicados de resolver en las líneas de fabricación, y que afecta claramente a su eficiencia, es la aparición de desperdicios (siguiendo la terminología del *Toyota Production System*). Dichos desperdicios se clasifican en tres grandes categorías según sea su naturaleza: MURI, MUDA y MURA. Este último, MURA, hace referencia a la falta de balance o mal equilibrado de las cargas de trabajo en las diferentes estaciones de una línea de fabricación. El equilibrado consiste principalmente en asignar las diferentes tareas a la secuencia ordenada de estaciones de trabajo, de tal manera que se satisfagan las relaciones de precedencia entre tareas

y se optimice una función objetivo. En este trabajo, la función objetivo ha sido alcanzar una explotación óptima de la capacidad disponible de la línea de fabricación.

Hemos utilizado técnicas de simulación discreta para mostrar el efecto favorable que la reducción de MURA provoca sobre la capacidad disponible en una línea de fabricación y como consecuencia en la productividad

de la cadena de valor. Concretamente, hemos empleado el diseño paramétrico para encontrar la combinación de parámetros de equilibrado de la línea de producción que mejora el resultado en términos de capacidad. En el apartado 3.4 indicábamos los factores considerados para el estudio del equilibrado de línea.

Con el diseño paramétrico, hemos encontrado el mejor tratamiento o la mejor combinación de niveles de los factores utilizados para equilibrar la línea. Una vez identificado este tratamiento óptimo, hemos realizado su validación con un test de hipótesis que contrasta si la capacidad con este tratamiento es significativamente mayor (o no) que con el tratamiento empleado normalmente. Dicho test de hipótesis nos ha permitido confirmar la hipótesis de partida ($H_A =$ La reducción de MURA en las líneas de fabricación, provoca un efecto favorable sobre la capacidad disponible), es decir, la capacidad de línea es superior con el tratamiento optimizado obtenido por diseño paramétrico versus el tratamiento ordinario utilizado en dicha línea.

La valoración de estas mejoras, se ilustra con el siguiente test de la mejora-verificación (Tabla 4). Es conocido

como test BEST versus CURRENT, es decir, compara los resultados con la configuración óptima contra los resultados de la configuración ordinaria. Hemos realizado una réplica de N = 30 repeticiones del proceso con los parámetros ordinarios, midiendo la KPI utilizada (MU en este caso). Posteriormente, se configuran los parámetros con sus nuevos valores, valores óptimos, y se replica el mismo número de veces. Se mide de nuevo la KPI utilizada. Esta cantidad de réplicas nos permite confiar en la no causalidad de los datos obtenidos. Por último, comparamos los datos obtenidos para la línea de base previa a la mejora con los datos obtenidos después de la mejora y verificamos si hay una diferencia significativa en la respuesta promedio de antes contra después. Para esta verificación se ha utilizado un test de medias 2-sample t.

ser aprovechado para evitar despilfarros en incrementar capacidad allí donde no se justifica, en ganar velocidad allí donde no es factible convertirla en caudal (flujo de bienes producidos) o en cuidar el diseño de las políticas de bloqueo (previsión de colisiones) estableciendo semáforos, pausas en los mecanismos seguidas de reactivaciones que logran la eficacia de proteger personas e instalaciones con la menor penalización posible en los rendimientos.

Por último, queremos finalizar planteando una serie de áreas de interés para examinar en trabajos futuros. En primer lugar, pretendemos producir modelos similares al construido para líneas de fabricación con diversas topologías (distribución en planta de medios de producción, materiales y utilidades), diversas operaciones, diversas condiciones de proceso y diversos ámbitos, para fortalecer la confirmación

Configuración ordinaria			Configuración óptima		
1	oct 10, 2009	82,0	1	nov 9, 2009	94,3
2	oct 11, 2009	85,5	2	nov 10, 2009	94,5
3	oct 12, 2009	81,5	3	nov 11, 2009	95,3
4	oct 13, 2009	88,1	4	nov 12, 2009	94,3
5	oct 14, 2009	86,4	5	nov 13, 2009	93,9
6	oct 15, 2009	85,1	6	nov 14, 2009	94,3
7	oct 16, 2009	87,9	7	nov 15, 2009	94,8
8	oct 17, 2009	84,1	8	nov 16, 2009	94,4
9	oct 18, 2009	80,9	9	nov 17, 2009	93,9
10	oct 19, 2009	84,8	10	nov 18, 2009	94,1
11	oct 20, 2009	85,1	11	nov 19, 2009	95,5
12	oct 21, 2009	81,3	12	nov 20, 2009	93,9
13	oct 22, 2009	86,4	13	nov 21, 2009	94,4
14	oct 23, 2009	86,2	14	nov 22, 2009	93,6
15	oct 24, 2009	81,6	15	nov 23, 2009	94,8
16	oct 25, 2009	82,3	16	nov 24, 2009	94,6
17	oct 26, 2009	84,5	17	nov 25, 2009	93,9
18	oct 27, 2009	88,5	18	nov 26, 2009	95,1
19	oct 28, 2009	87,4	19	nov 27, 2009	94,2
20	oct 29, 2009	86,5	20	nov 28, 2009	94,2
21	oct 30, 2009	83,8	21	nov 29, 2009	94
22	oct 31, 2009	83,0	22	nov 30, 2009	94,6
23	nov 1, 2009	82,7	23	dic 1, 2009	92,2
24	nov 2, 2009	86,2	24	dic 2, 2009	91,1
25	nov 3, 2009	85,1	25	dic 3, 2009	93,6
26	nov 4, 2009	83,1	26	dic 4, 2009	94,8
27	nov 5, 2009	84,4	27	dic 5, 2009	93,5
28	nov 6, 2009	82,8	28	dic 6, 2009	93,7
29	nov 7, 2009	82,3	29	dic 7, 2009	94,5
30	nov 8, 2009	84,8	30	dic 8, 2009	94

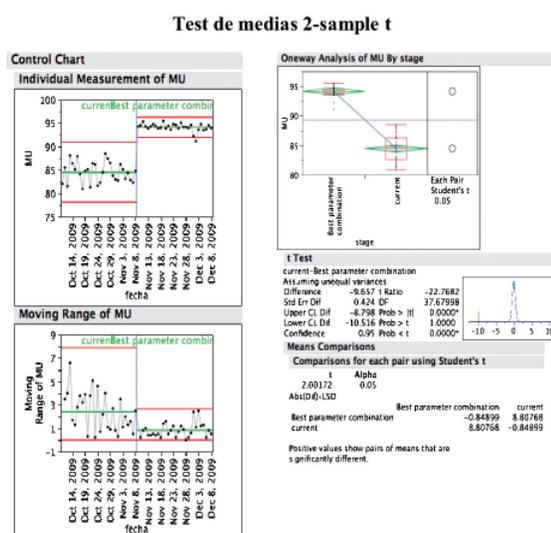


Tabla 4: Verificación de las mejoras aportadas por la nueva configuración (elaboración personal).

Esta confirmación complementa y refuerza la importancia del equilibrado de las líneas de fabricación, ampliamente estudiado por otros autores. El hecho de poner una línea a trabajar maximizando el flujo por el cuello de botella de la línea es un criterio de eficacia demostrada [7] y en el caso que nos ocupa, se ha tomado este criterio en combinación con el principio *Kanban* (reposición) del sistema *Toyota Production System*.

Vale la pena también destacar una segunda aportación de nuestro trabajo. Las enormes posibilidades que genera la combinación de técnicas estadísticas y experimentales con el modelado de sistemas mediante simuladores de eventos discretos. De hecho, uno de los valores más sustanciales de la simulación consiste en la ganancia de perspectiva y de examen de los detalles a los que nos obliga el proceso de modelado. Este conocimiento puede

de la hipótesis de partida. En segundo lugar, pretendemos incluir en otros trabajos todas las etapas definidas en la metodología para el estudio de un sistema real mediante técnicas de simulación discreta (Figura 2). Para ello será necesario encontrar un mundo del problema que sea poco sensible a las consecuencias de publicar los hallazgos encontrados.

PARA SABER MÁS

- [1] Banks J, Carson JS, Nelson BL. (1995). *Discrete Event Systems Simulation*. 2nd edition. Prentice-Hall.
- [4] Box G, Hunter W, Hunter J. (1978). *Statistics for Experimenters. An Introduction to Design, Data Analysis, and Model Building*. John Wiley & Sons, Inc.
- [7] Goldratt EM, Cox J. (2004). *The goal: a process of ongoing improvement*. 3rd Revised Edition. North River Press.