

El Efecto Favorable del Paradigma Lean Manufacturing sobre la Reducción de Defectos. Técnicas de Simulación Discreta

Julio César Puche Regaliza¹, José Costas Gual²

¹ *Departamento de Organización de Empresas y Comercialización e Investigación de Mercados, Universidad de Valladolid, Valladolid, España*

² *Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones e Ingeniería Telemática, Universidad de Valladolid, Valladolid, España*

Resumen De manera general, los sistemas de producción buscan optimizar su rendimiento minimizando todas las posibles fuentes de desperdicio en la cadena de valor sobre la que actúan. Una fuente de desperdicio clásica son los defectos. Para disminuir la tasa de defectos y como consecuencia aumentar el rendimiento de los sistemas de producción, en este trabajo proponemos la utilización del paradigma Lean Manufacturing (Fabricación Flexible) como alternativa a otros paradigmas de comportamiento empleados habitualmente en dichos sistemas de producción. Más concretamente, en este trabajo pretendemos demostrar mediante técnicas de simulación discreta, el efecto favorable que el paradigma Lean Manufacturing y particularmente el empleo de uno de sus principios, el principio Jidoka (calidad en origen), provoca sobre la reducción de defectos en los sistemas de producción.

Correspondencia a: Julio César Puche Regaliza (e-mail: puche@uva.es), José Costas Gual (e-mail: jose.costas@parquecientifico.uva.es)

Palabras clave Toyota Production System, Fabricación Flexible, Simulación Discreta, Sistemas de Producción, Desperdicio, Defectos.

Clasificación JEL D24, C51.

1. Introducción

De manera general, los sistemas de producción buscan optimizar su rendimiento minimizando todas las posibles fuentes de desperdicio, es decir, reduciendo tanto como sea posible todo aquello que no añada valor para el cliente. Una fuente de desperdicio clásica son los defectos, los cuales ocasionan o bien un retrabajo para recuperar la pieza del sistema de producción o bien chatarra si esta decisión es más económica que el propio retrabajo o simplemente no somos capaces de subsanar el defecto (Liker/Meier, 2006).

En este trabajo pretendemos demostrar, mediante técnicas de simulación discreta, el efecto favorable que el paradigma *Lean Manufacturing* (Fabricación Flexible) y particularmente el empleo de uno de sus principios, el principio *Jidoka*, provoca sobre la reducción de defectos en los sistemas de producción y como consecuencia sobre los efectos negativos asociados a dichos defectos.

En los dos siguientes apartados justificamos la utilización y mostramos los conceptos generales del paradigma *Lean Manufacturing* y de las técnicas de simulación discreta. A continuación, desarrollamos un modelo de simulación discreta que nos permitirá confirmar o refutar la hipótesis de partida, es decir, si efectivamente, la aplicación del principio *Jidoka* provoca un efecto favorable sobre la reducción de defectos en los sistemas de producción. Por último, mostramos una serie de conclusiones y líneas de trabajo futuras a seguir.

2. Lean Manufacturing

El paradigma *Lean Manufacturing*, cuyo origen podemos encontrarlo en la filosofía *Toyota Production System*¹, ofrece como característica esencial y diferenciadora,

¹ Para profundizar en la filosofía *Toyota Production System* puede consultarse Liker/Meier (2006).

situar al cliente al mando del sistema productivo. Se trata de entender sus preocupaciones, especialmente a través de la observación crítica de la interacción de los clientes con los productos y los servicios. Esta actitud crítica se extiende al juicio sobre el estado en curso de la cadena de valor y el esfuerzo reiterado en la continua reducción de desperdicio, requiriendo para ello, el cultivo de destrezas en la resolución de problemas. En búsqueda del ideal de producir al ritmo exacto de la demanda, cada cliente, con cada orden, está halando de la línea de fabricación (hacia atrás, de forma reiterada, en cada paso de proceso) (Womack et al., 1990).

Esta situación conduce a un ambiente de trabajo donde el desafío de nuevos retos es bien recibido, y por lo tanto, a una organización que aprende (abordando los problemas en lugar de esconderlos) y que cada día es más eficaz en satisfacer a los clientes y más eficiente en realizar su actividad (menos desperdicio). Los operarios aprenden, los directivos estimulan el ensayo y la verificación, se incrementa el compromiso con los clientes y los canales existentes entre los diferentes componentes de la organización incrementan su nivel de competencia, agilidad, eficacia y resultados en lugar de operar sólo bajo la premisa de “regulación”. Se deriva por tanto, un cambio de actitud en las personas que forman parte de la organización (Liker/Meier, 2006).

Para lograr estas características, el paradigma *Lean Manufacturing* se apoya en cuatro pilares básicos (ver Figura 1) (Liker/Meier, 2006):

- El pilar de la filosofía o los grandes principios, extendido a crear valor para los clientes, los empleados, la cadena de suministro y para la comunidad en general.
- El pilar de los procesos, entendido en el sentido de que los resultados (productos o servicios) son consecuencia de la naturaleza de los procesos. Este pilar se despliega en las reglas de *One-Piece-Flow*, que se opone a stock; *Pull*, que sitúa al cliente y la demanda al mando del proceso; *Standards*, que enfatiza la aplicación del método científico en la definición cuidadosa y detallada al establecer cómo se han de establecer las cosas y de *Kaizen*,

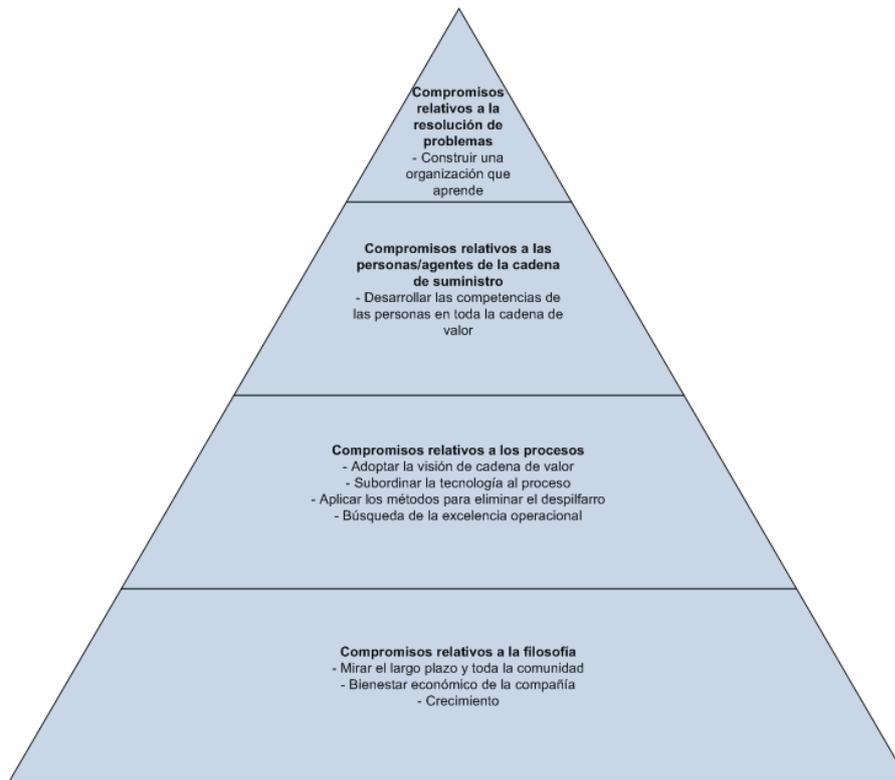


Figura 1: Compromisos que el *management* tiene que asumir con respecto a los 4 pilares básicos del paradigma *Lean Manufacturing* (basado en Liker/Meier, 2006).

que niega la complacencia y aboga por el desafío continuo ante niveles más altos del estándar.

- El pilar de las personas (empleados, proveedores, etc.), que establece el valor de hacer crecer continuamente a las personas en su dimensión humana, social y técnica.
- El pilar de solución de problemas, que crea la cultura de ir en busca de desafíos cada vez más difíciles en vez de huir de los problemas y conformarse con soportar los mismos problemas una y otra vez. Por lo tanto, un problema es visto como un signo de una patología del sistema actual, y como consecuencia, presenta la oportunidad de diagnosticar las causas raíces

del mismo a fin de transformar el sistema hacia otro cuya naturaleza global es superior. Los defectos son atrapados en origen.

En este trabajo hacemos especial hincapié en los efectos drásticos que proporciona la regla *One-Piece-Flow* y particularmente uno de sus principios, el principio *Jidoka* (calidad en origen). El principio *Jidoka* consiste en que cuando sucede una anomalía en el proceso, se detiene la línea, se investiga la causa raíz de dicha anomalía, se ensayan contramedidas y se aplica la más eficaz, simple y de menor coste para erradicar del sistema esa causa raíz. Esta actitud es completamente diferente a la adoptada típicamente en los sistemas de producción actuales, que consiste en evitar parar el flujo o restablecerlo tan pronto como sea posible si se ha detenido y apartar el problema para resolverlo fuera o más tarde (Womack et al., 1990).

La elección de centrar este trabajo en el principio *Jidoka* queda justificada por ser una de las grandes innovaciones de la filosofía *Toyota Production System*, rompiendo con la creencia de que es mejor que la línea no pare nunca ya que está en juego la productividad. Naturalmente, adoptar este principio supone obligarse a construir la cultura de una organización que aprende, y esto es precisamente otro de los 4 pilares que sustentan el paradigma *Lean Manufacturing* (Figura 1), dejando entrever el enfoque sistémico que dicho paradigma promueve (Womack et al., 1990).

3. Técnicas de Simulación Discreta

De manera general, existen dos caminos para llevar a cabo el estudio de un sistema. Por una parte, se puede experimentar con el propio sistema y por otra, se puede experimentar 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 bien 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 preponderadamente 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 ocurrencia de sucesos o eventos. Las ecuaciones del modelo son las relaciones lógicas que determinan la ocurrencia de un suceso o evento (Banks et al., 1995) (Figura 2).

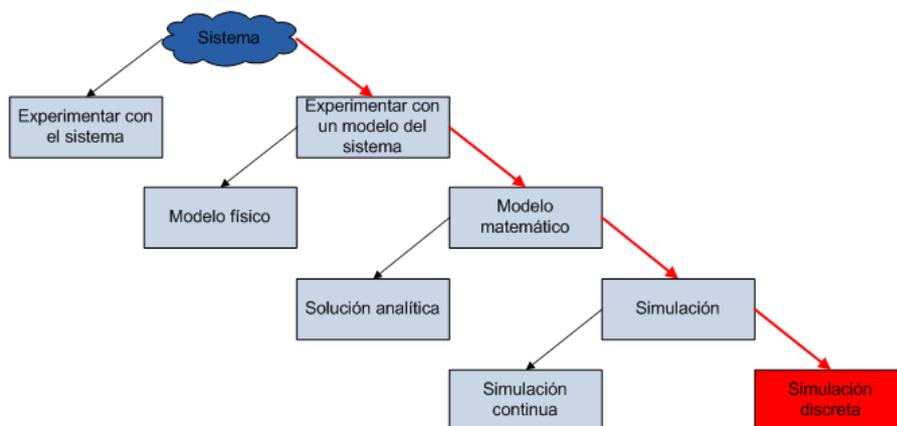


Figura 2: Estudio de la conducta de un sistema real (basado en Kelton et al., 2004).

La simulación se utiliza como paradigma para analizar sistemas complejos. Se aconseja su aplicación por ejemplo, cuando no existe una completa formulación matemática del 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) (Kelton et al., 2004).

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 del *software* de simulación. Los avances en *hardware* y *software* 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 produce².

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 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 (Kelton et al., 2004).

² Para profundizar en las ventajas e inconvenientes de la simulación, puede consultarse Kelton et al. (2004) y Banks et al. (1995).

4. Validación del Efecto Favorable del Principio Jidoka sobre la Reducción de Defectos

En este apartado vamos a intentar validar el efecto favorable de la utilización del paradigma *Lean Manufacturing*, y más concretamente del principio *Jidoka*, sobre la reducción de defectos³ en un sistema de producción (ver apartado 2). Para validar esta propuesta vamos a emplear técnicas de simulación discreta, lo que nos permitirá estudiar la conducta del sistema de producción antes y después de aplicar dicho principio sin someternos al coste experimental que supondría una experimentación en la realidad (ver apartado 3).

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 3, podemos ver de manera detallada todas las etapas necesarias para completar este tipo de estudios (Banks et al., 1995).

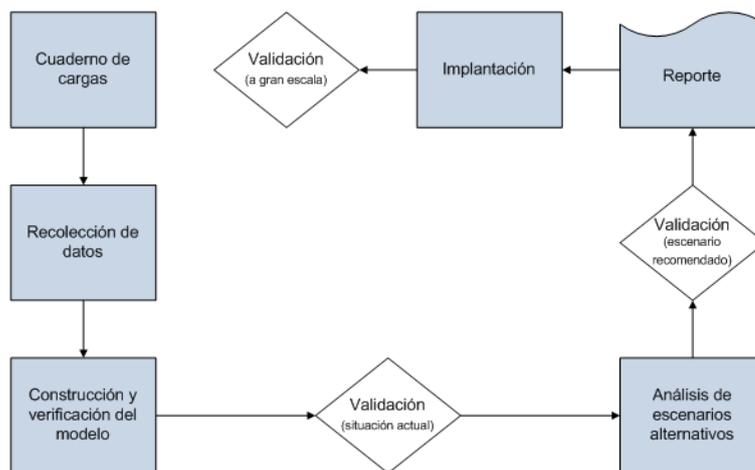


Figura 3: Etapas del estudio de un sistema real mediante técnicas de simulación discreta (basado en Banks et al., 1995).

³ Aunque el caso está inspirado en un sistema real, todos los datos han sido alterados para proteger su confidencialidad.

A continuación, vamos a desarrollar cada una de estas etapas en diferentes subapartados intentando confirmar la hipótesis de partida: $H_A = El\ empleo\ del\ principio\ Jidoka\ en\ un\ sistema\ de\ producción,\ implica\ la\ reducción\ de\ defectos\ en\ dicho\ sistema.$

4.1. Cuaderno de Cargas

En esta etapa definimos el sistema que queremos estudiar. Para ello, en primer lugar mapeamos el sistema a alto nivel obteniendo así una primera perspectiva global. Este mapeo 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 (Banks et al., 1995).

El sistema a estudio (universo del problema) es una línea de fabricación de piezas discretas (producción de baterías). De manera simplificada, en esta línea tenemos solamente dos estaciones⁴. La estación COS (*cast on strap*) produce tiras de plomo para formar las conexiones de una batería con tecnología plomo-ácido. Su tiempo de ciclo (C/T) es de 17 segundos. La estación HEAT SEALING (C/T = 10 segundos) hace el pegado de la tapa de la batería con el fin de dejarla sellada. Estas dos estaciones se hallan conectadas a través de un *Conveyor* (elemento de transporte de materiales en un taller) de 8 nichos (ver Figura 4).

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 los siguientes CTS (*critical-to-customer satisfaction*):

- *Capacity utilization*: el supervisor y los operarios de la línea quieren cumplir los objetivos de *throughput* (caudal que pasa a través de una línea en un

⁴ La sensibilidad del estudio al número de estaciones de la línea, su topología y otras características del sistema productivo pueden plantearse como trabajos futuros.

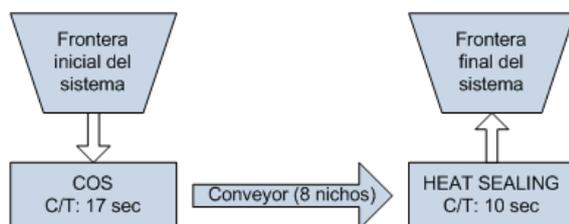


Figura 4: Mapa de alto nivel del universo del problema (*elaboración personal*).

periodo de tiempo. Mide el uso de la capacidad instalada). Es decir, quieren alcanzar una cantidad determinada de piezas producidas por cubo de tiempo comparada con el máximo de piezas que el sistema teóricamente puede producir en ese cubo de tiempo. Vamos a tomar el turno de 8h como cubo de tiempo.

- *Yield*: los operarios de estaciones de trabajo corriente-abajo de la frontera final del sistema quieren recibir sólo piezas conformes (adherencia a las especificaciones).

La siguiente tarea, una vez seleccionados los CTS, es asociarlos a diferentes indicadores cuantitativos (métricas).

- Para evaluar el aprovechamiento de la capacidad instalada decidimos utilizar la métrica C/U (*Capacity Utilization*). Es una métrica de tipo LTB (*Larger The Better*), luego su valor ideal es 100%. Indica el número de unidades de proceso de un sistema de fabricación discreta (por ejemplo, en una prensa, cada vez que baja y sube decimos que ha habido una unidad de proceso) respecto al número de unidades de proceso estándar que se pueden hacer en el sistema en un cubo de tiempo dado (por ejemplo, un turno).
- Para juzgar el rendimiento de la línea utilizaremos la métrica RTY (*Rolled Throughput Yield*) o rendimiento atravesando la línea de fabricación. También es una métrica del tipo LTB. Indica la cantidad de piezas conformes que llegan al final de línea de fabricación en un turno con respecto a la cantidad de piezas ingresadas en dicha línea en ese mismo periodo de tiempo.

Para demostrar la hipótesis de partida (apartado 4), pretendemos demostrar el incremento de la métrica C/U sin perjudicar el RTY actual.

4.2. Recolección de Datos

Recopilamos datos de la realidad con el fin de determinar la situación de partida (Banks et al., 1995). Para ello se han empleado formularios normalizados para la recogida de datos (Bicheno, 2002). En este sentido, en primer lugar se ha diseñado un procedimiento y un formulario para a continuación pasar a la recogida de datos propiamente dicha. Esta última fase ha sido realizada aplicando técnicas de muestreo (García Pérez, 1992), ofreciendo así una aceptable consistencia científica y una aceptable validación de los datos de entrada.

Las trayectorias temporales estables obtenidas (Figura 5 y Figura 7), nos permiten utilizar la muestra recogida para caracterizar las dos métricas enunciadas en el apartado 4.1. Para profundizar en temas relacionados con control estadístico de proceso utilizado a lo largo de este trabajo puede consultarse Thompson/Koronacki (2002).

Respecto a la primera métrica (C/U), obtenemos un valor de 73,49 %, dividiendo el caudal promedio de piezas reales conformes fabricadas por turno obtenido de la muestra (1.245) (Figura 5) entre el caudal teórico (cifra que supondría el 100 % de rendimiento). Para calcular el caudal teórico, es necesario conocer el cuello de botella de la línea de fabricación. Como indicamos en el apartado 4.1, el tiempo de ciclo teórico de la estación COS es de 17 segundos y el de la estación *HEAT SEALING* es de 10 segundos. Ante esta situación, la estación COS marca el caudal máximo que podemos esperar de la línea de fabricación en un turno de 8 horas. Será $8 \text{ horas} * 3.600 \text{ segundos horas}^{-1} / 17 \text{ segundos} = 1.694 \text{ piezas por turno}$.

Para completar la validez de la situación de partida, procedemos con un *Capability Analysis*, consistente en calcular un índice en base a una ley de probabilidad y en los límites de tolerancia marcados por el cliente (decisiones de naturaleza económica). Para ello elaboramos en primer lugar el histograma y la curva de

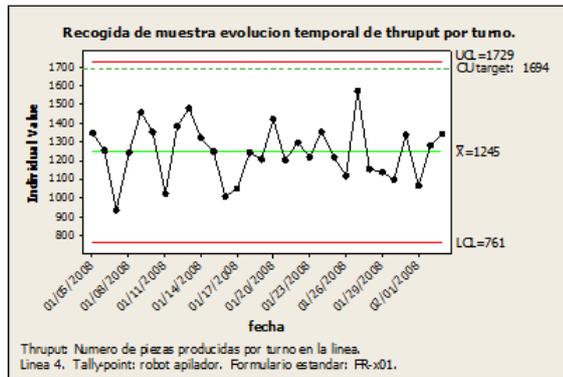


Figura 5: Trayectoria temporal (IR chart) sobre el caudal de producción por turno (*elaboración personal*).

densidad estimada de la población a partir de la muestra de C/U asociado a cada turno. Posteriormente, con dicha curva de densidad y los límites de tolerancia definidos, se determina el indicador de capacidad P_{pk} , el cual toma un valor, en este caso, de 0,13, tomando un LSL (*Lower Spec Limit*) lograr un C/U de al menos el 70%⁵. Valores de P_{pk} por debajo de 1,33 indican que el sistema es pobre en satisfacer los requerimientos⁶ (Figura 6).

Respecto a la segunda métrica (RTY), en primer lugar contabilizamos las piezas rechazadas en la línea por turno. En segundo lugar, el valor obtenido se compara con el caudal de la producción, obteniendo el estimador de la proporción de piezas no conformes a la primera, lo que indicará la conducta del proceso. Por último, calculamos su complemento a la unidad, obteniendo un valor para RTY de 0,96901 (Figura 7).

⁵ Este valor debe establecerse por los ingenieros de proceso que han diseñado la línea, considerando tiempos a liberar de la producción para mantenimiento así como tiempos a reservar para los arranques, paradas, ajustes y cambios de utillaje.

⁶ Como C/U es una métrica del tipo LTB (mayor es mejor), no tenemos límite de tolerancia superior. Sólo decimos que está mal por debajo de un cierto C/U límite inferior de aceptación.

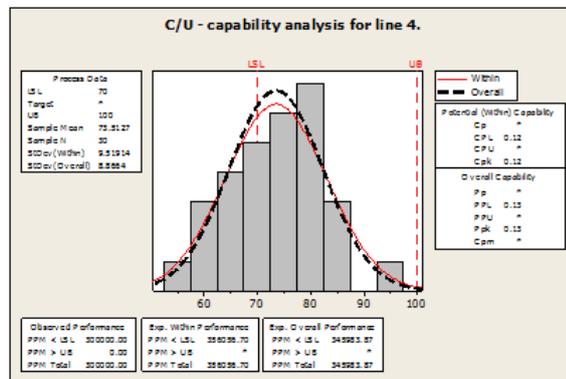


Figura 6: Capability Analysis (*elaboración personal*).

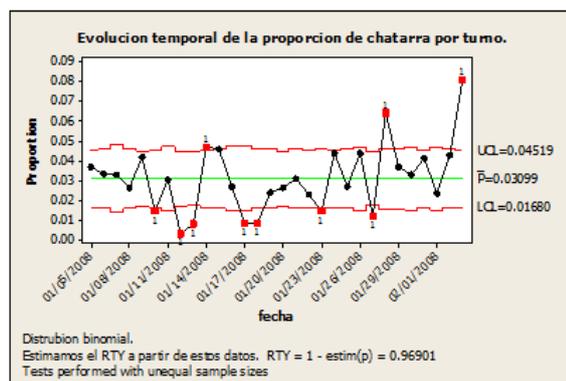


Figura 7: Trayectoria temporal (carta de control p por atributos) sobre el rendimiento de la línea de fabricación (*elaboración personal*).

4.3. Construcción y Verificación del Modelo

La construcción del modelo⁷ de simulación consiste en capturar lo más relevante del sistema real para comprender su función de transferencia, es decir, completar un proceso de abstracción mediante el cual se representen ciertos aspectos de la realidad. En este proceso de reducción o abstracción del sistema real a un diagrama de flujo lógico, identificaremos los elementos, las variables y los eventos

⁷ 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.

importantes para cumplir el objetivo 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 verificación 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 (Banks et al., 1995). Podemos ver en la Figura 8 el *TOP LEVEL* del modelo⁸.

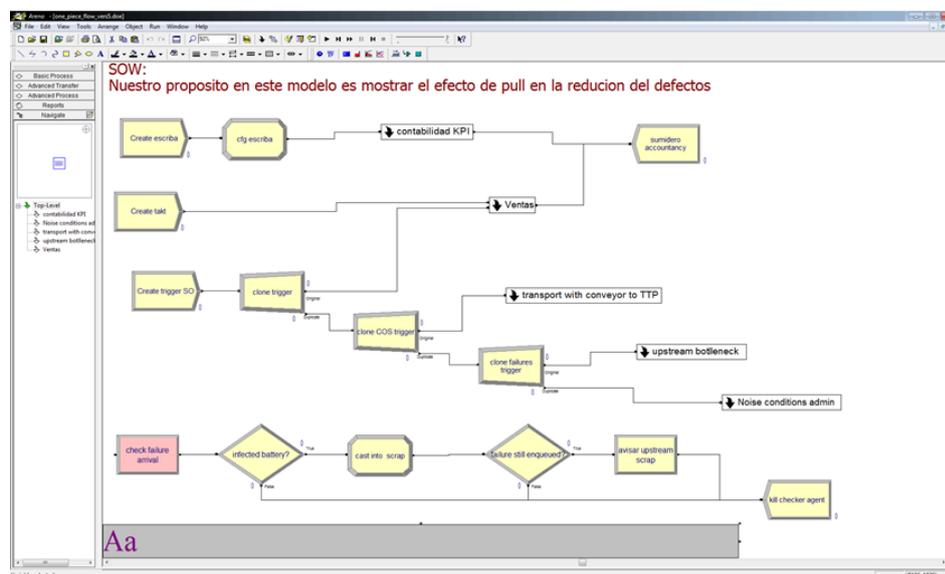


Figura 8: *TOP LEVEL* del modelo (elaboración personal).

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 *upstream* (contra el flujo en vez de a favor de flujo). Su principal ventaja es que permiten una verificación

⁸ Para obtener el código del modelo contactar con los autores del trabajo.

progresiva del modelo. Podríamos decir que se trata de técnicas basadas en los principios de *Lean Manufacturing* (apartado 2).

De esta manera, cuando en el *TOP LEVEL* sólo tengamos implementado lo que podemos ver representado en la Figura 8 (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 *upstream*. Por ejemplo, el subsistema Ventas, que simula en una de sus hebras la estación *HEAT SEALING*, necesita una pieza que viene de la estación COS. Esta parte del modelo aún no habrá sido creada. Para suplir esta carencia emplearemos una fuente (módulo *create*) que genere dicha pieza, permitiéndonos así comprobar el funcionamiento del modelo construido hasta este momento.

Después de esta puntualización, comenzamos con la construcción del modelo. En la primera hebra del modelo (parte superior de la Figura 8) ponemos una entidad en circulación mediante un módulo *create* de la parte izquierda. Posteriormente configuramos atributos (propiedades) a esta entidad mediante un módulo *assign* (cfr escriba). Seguidamente, la entidad accede en el subsistema contabilidad KPI que detallaremos más adelante. Por último, cuando la entidad regresa del subsistema anterior, llega al sumidero (módulo *dispose*) que la elimina del sistema.

El propósito de esta hebra que acabamos de describir es llevar la cuenta de los KPI (*Key Performance Indicators*) o variables clave sobre el rendimiento en cada cubo de tiempo. Una entidad brota con el módulo *create* una vez en cada turno. Para fijar su ventana de tiempo de trabajo dentro de una jornada, lo que hacemos es que la entidad capture (módulo *seize*) un recurso (módulo de datos *resource*) que tiene asignado un horario de trabajo (módulo de datos *schedule*).

La siguiente hebra (bajando en vertical por la Figura 8) tiene como cometido marcar el *takt time*⁹ en todo momento. Para una demanda dada en un cubo de tiempo de trabajo (turno de 8 horas), el *takt time* representa el tiempo de ciclo

⁹ Ritmo de la demanda. 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.

teórico en el cuello de botella, es decir, el tiempo que disponemos para fabricar una pieza, simulando la cadencia de la demanda. En nuestro caso, como anticipamos en el apartado 4.2, se trata de 17 segundos.

Esta estrategia de modelado es muy eficaz, pues nos simplifica el cálculo de los tiempos de ciclo reales así como los *lead time*¹⁰ reales. Por ejemplo, imaginemos que el turno de trabajo es de 6:00 a 14:00 y que 10 segundos antes del final del turno se completa la producción de una pieza. La siguiente pieza se completa 12 segundos después de comenzar el siguiente turno. En este caso, el tiempo de ciclo último habrá sido de $10+12=22$ segundos, mientras que en el reloj del simulador han pasado además otras 16 horas (el tiempo de paro si sólo trabajamos un turno en el día). Por otra parte, conocer el *takt time* también nos resulta de utilidad para verificar la consistencia lógica del modelo al visualizarlo durante el *runtime* y poder compararlo con el *throughput* real.

Como podemos ver en la Figura 8, esta segunda hebra tiene un subsistema (Ventas) con dos puertas de entrada. La primera acaba de ser explicada (*takt time*), mientras que la segunda maneja el ciclo de terminación de productos en la estación *HEAT SEALING*.

Superados los *tests* que indican el correcto tratamiento que el subsistema Ventas hace del *takt time* del cliente final y de la producción de la estación *HEAT SEALING*, continuamos incrementando el modelo añadiendo una tercera hebra en *TOP LEVEL*. En esta nueva hebra, un módulo *create* instancia una única entidad. Dicha entidad es clonada en cascada para mover el flujo de cada uno de los tres subsistemas adicionales. Veamos brevemente la funcionalidad de cada uno de estos tres subsistemas:

- Un subsistema será el *Conveyor* que trae piezas para la estación *HEAT SEALING*. Como anteriormente, para comprobar su funcionamiento emplearemos modelado inverso, lo que nos permitirá ir ingresando en la cola

¹⁰ En el caso de una orden de fabricación, es el intervalo de tiempo que transcurre desde su ingreso en el sistema hasta que está completada.

del *Conveyor* conforme el material va siendo consumido por la estación *HEAT SEALING* desde la cabeza de aquel.

- Una vez verificado que el *Conveyor* funciona, procedemos *upstream* nuevamente implementando la estación COS, la cual arroja su producción a la cola del *Conveyor* cuando éste tiene vacío el nicho de cabeza. En este punto, verificamos el sistema global. De esta manera hacemos crecer el modelo sobre un substrato cada vez más grueso y confiable ya que es verificado progresivamente. Con esta metodología, los fallos a depurar sólo estarán, presumiblemente, en la capa que estamos añadiendo y/o en los acoplamientos. Para este último caso, intentamos diseñar acoplamientos muy robustos (*weak coupling*), es decir, intentamos que entre unos subsistemas y otros exista nula intrusión.
- Cuando tenemos el sistema moviendo piezas desde el origen, atravesando las estaciones COS y *HEAT SEALING*, hasta el sumidero, añadimos la capa que aporta las condiciones de ruido en el sistema. Es decir, aquellos problemas que nacen en la estación COS (*upstream*) y en función del modo de trabajo son detectables *downstream* (modo de trabajo con detección tardía) o son detectables en el origen (modo de trabajo con detección temprana).

La última hebra del *TOP LEVEL* (parte inferior de la Figura 8) tiene la función de establecer el sistema de avisos al sistema de gestión de fallos, bien sean tempranos o tardíos¹¹. La lógica de esta hebra indica que si la pieza no es portadora de defecto, se dirige al sumidero y finaliza el proceso. En otro caso, averiguamos si el sistema de fallos aún tiene en su cola de espera la entidad que representa el curso de fallo-reparación. Si la respuesta es no, indica que una entidad defectuosa anterior ya lo ha disparado. Si la respuesta es sí, indica que es la primera vez que este fallo es detectado y por lo tanto, debemos activar una señal para el agente de reparación.

Para continuar con la construcción del modelo, vamos a detallar cada uno de los subsistemas indicados en el *TOP LEVEL* y que han sido tratados como

¹¹ En función del modo configurado por parámetro en *runtime*.

cajas negras hasta este momento. Comenzamos por el subsistema contabilidad KPI (Figura 9). En él, la entidad escriba accede por el puerto de la parte izquierda y queda en espera de su ventana horaria de trabajo. Posteriormente completa los registros (módulos *record*) para el cálculo del C/U y del RTY del cubo de tiempo que acabamos de cerrar. Por último, es despachada a la secuencia de salida. La entidad abandona el subsistema a través del puerto de la parte derecha. Los gráficos indican las diversas respuestas que pueden ser interesantes para evaluar el modelo. Es necesario comprobar que capturamos las respuestas cuando hay evidencia suficiente de estabilidad y de tamaño de la muestra.

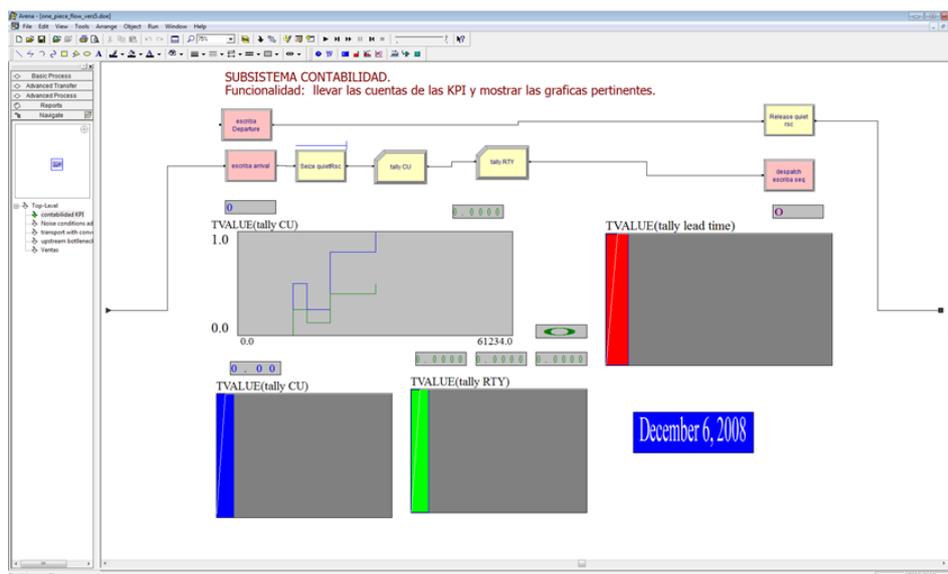


Figura 9: Subsistema contabilidad KPI del modelo (*elaboración personal*).

En el subsistema Ventas (Figura 10) tenemos dos hebras. La hebra superior se limita a avanzar el *takt time* del sistema. Por otra parte, la hebra inferior simula el ciclo de trabajo de la estación *HEAT SEALING* (*downstream*). Su lógica es la siguiente: la entidad accede por el puerto inferior de la parte derecha. En ese momento, se queda a la espera de que el *Conveyor* haya logrado depositar una pieza en la parte final de éste. Cuando esto ocurre, la pieza es extraída. La

entidad original es redirigida hacia atrás para iniciar el siguiente ciclo, mientras que la extraída es sometida a la secuencia de producción en *HEAT SEALING*, que consiste en esperar ventana horaria y recurso productivo, demorar el tiempo de ciclo actual con su variabilidad propia, liberar el recurso y por último, realizar una serie de tareas administrativas para completar el *reporting*.

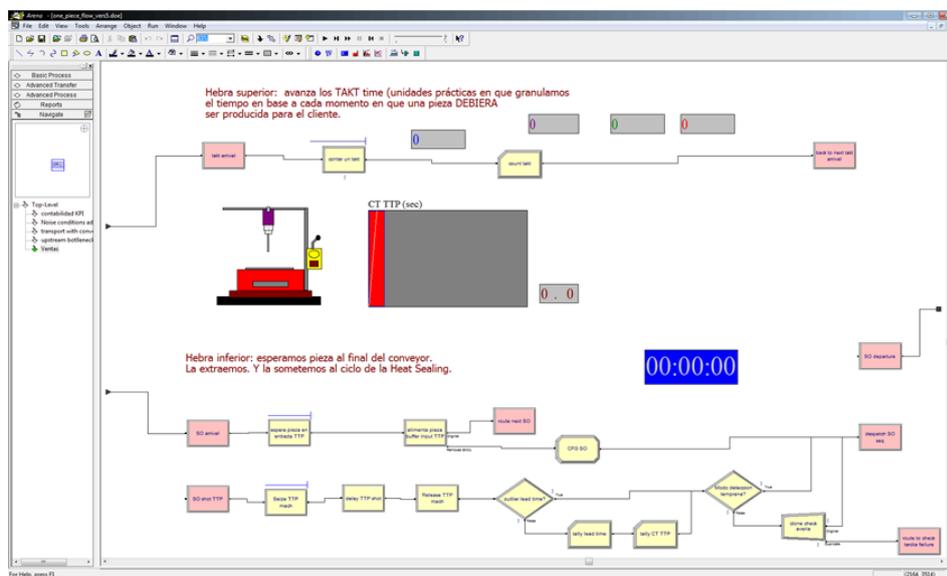


Figura 10: Subsistema Ventas del modelo (*elaboración personal*).

El siguiente subsistema que vamos a revisar es el subsistema que simula el transporte entre las dos estaciones (*transport with conveyor to TTP*). Su lógica es la siguiente (Figura 11): la entidad que accede por el puerto de la parte izquierda se queda a la espera de que la estación COS evacue una pieza y que la cabeza del *Conveyor* permanezca vacía. Posteriormente se extrae la pieza del punto de evacuación de la estación COS, se registra el ingreso en *Conveyor* con un módulo *store* y se reenvía a la estación de procesado. La entidad original vuelve a posicionarse en la cola para esperar el siguiente ciclo. La entidad extraída de COS pasa a través de un conjunto (*set*) de colas en el que se implementa una regla de succión desde *downstream*. Cuando el nicho *downstream* está vacío y hay una pieza

en el nicho inmediato *upstream* del *Conveyor*, tras la demora para mover la cinta transportadora, la pieza avanza un nicho. Debe quedar claro que esta exploración de nichos en el ciclo (modulo *decide*) se hace desde *downstream* viajando hacia *upstream*. Realizarlo en sentido inverso produciría la situación de que un nicho pudiera viajar con un solo cuanto de tiempo tantos nichos hacia *downstream* como huecos vacíos hubiera en ese momento. Para evitar esta situación, la lógica implementada hace que varias piezas diferentes que en el instante $t[j]$ están en nichos diferentes puedan avanzar (en paralelo) un nicho del *Conveyor* a su derecha (si está libre) y llegar todas ellas a la vez en $t[j+1]$. Cuando el módulo *decide* deja de iterar es debido a que una pieza en concreto acaba de alcanzar la cabeza del *Conveyor*, alojándose en espera teóricamente infinita. Será misión del subsistema Ventas desalojarla para que reanude su viaje.

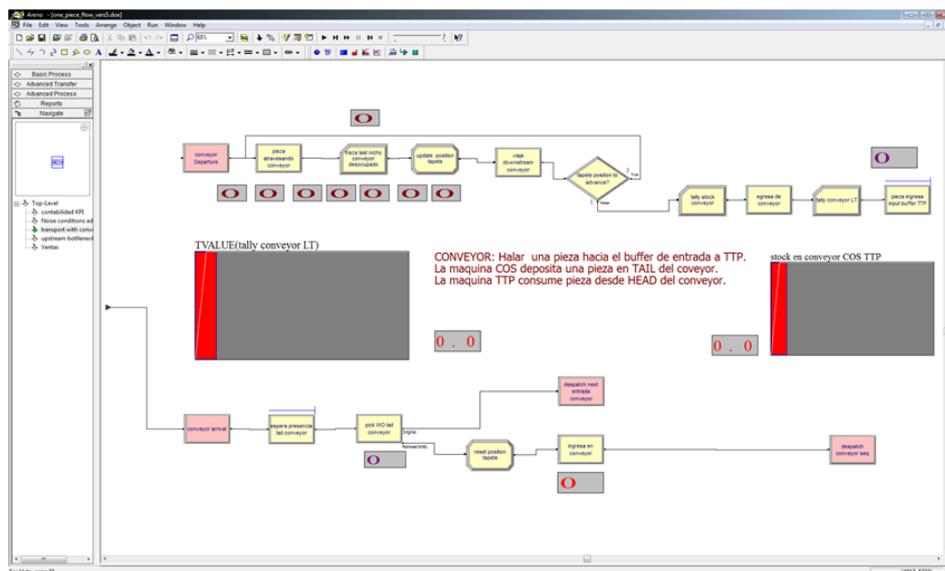


Figura 11: Subsistema *transport with conveyor to TTP* del modelo (*elaboración personal*).

Continuamos con la construcción del modelo trabajando *upstream*. Ahora es necesario alimentar el *Conveyor*. Para ello tenemos el subsistema que representa

la estación COS (subsistema *upstream bottleneck* (Figura 8)). En la Figura 12 podemos ver su lógica: la entidad llega al subsistema y queda a la espera de tener un hueco en la cola del *Conveyor*, donde posteriormente deberá alimentar la pieza. A continuación, accede al módulo *shot* donde se fabrica la pieza con la demora de su tiempo de ciclo real (estocástica). Por último, llegamos al módulo *departure*, donde un *clone* ingresa en la cola del *Conveyor* y la entidad original regresa al módulo *arrival* para tirar del siguiente ciclo.

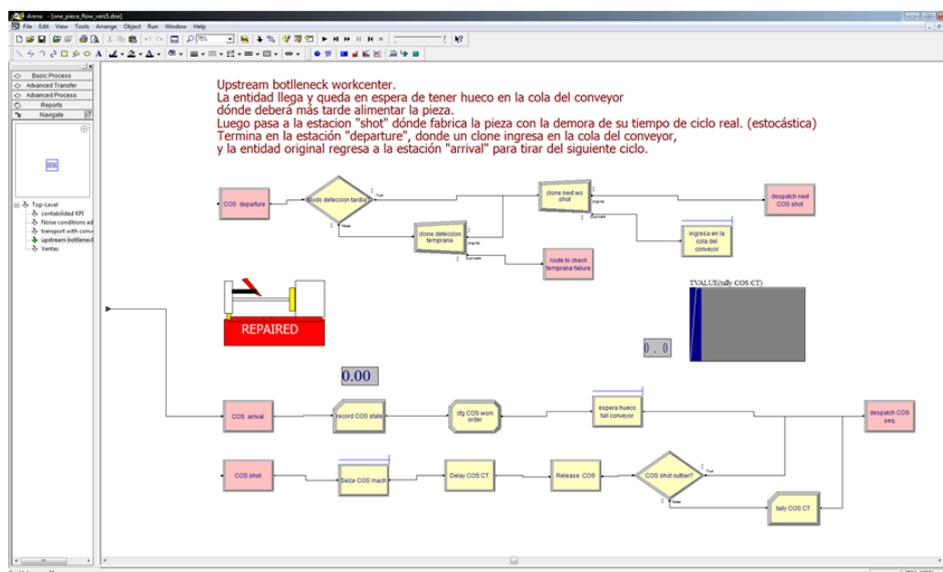


Figura 12: Subsistema *upstream bottleneck* del modelo (elaboración personal).

Por último, revisamos el subsistema que se encarga de generar ruido o variabilidad en el sistema (subsistema *Noise conditions admin* (Figura 8)). Este subsistema (Figura 13) trabaja con una función TTF o periodo entre fallos (*Time-Till-Failure*) y una función TTR o demora hasta la refacción (*Time-Till-Repaired*). La función TTF representa la sensibilidad de la tecnología conjuntamente con las políticas de limpieza y mantenimiento preventivo. Su efecto es el periodo medio entre fallos. Por su parte, la función TTR representa la competencia para resolver las averías y problemas de la instalación, es decir, para restaurar la normalidad después de que

un fallo haya ocurrido. En este trabajo, las potenciales contramedidas no están orientadas a tener un impacto sobre TTF sino sobre TTR ya que, el tiempo de solución de un problema es la suma del tiempo que tardamos en detectarlo, diagnosticarlo y aplicar dichas contramedidas.

La lógica de este subsistema es la siguiente: una entidad que es la portadora de un fallo accede al subsistema por el puerto de la parte izquierda. Se queda en espera hasta obtener vía libre para acceder. Cuando supera este semáforo de entrada, deja transcurrir un periodo de tiempo aleatorio (función de distribución cuyos parámetros estimamos a partir del historial de averías de la instalación) en el que no hay averías. Transcurrido este tiempo TTF, el sistema entra en fallo. Mientras el fallo no sea detectado, estaremos produciendo piezas defectuosas (esta condición está implementada en la lógica del subsistema que simula el centro de producción COS). En esta situación, la entidad queda a la espera de recibir la señal de fallo detectado. En el momento que esto ocurre, la entidad atraviesa el proceso de diagnóstico (cuya duración es mayor cuanto más tiempo lleve el fallo activado) y a continuación, espera el tiempo de refacción. Queremos destacar en este punto un factor determinante que debe tenerse en cuenta al caracterizar las esperas para diagnóstico. Un fenómeno es tanto más complejo de estudiar cuanto mayor sea la distancia temporal entre el suceso raíz del problema y la detección de su defecto (Liker/Meier, 2006).

4.4. Validación del Modelo (Situación Actual)

Una vez que estamos satisfechos con la construcción y la verificación del modelo y como consecuencia de su nivel de representación de la realidad, debemos pasar a la validación de la situación actual, es decir, debemos determinar si el modelo explica razonablemente bien la realidad conocida. Esto significa que la estimación que ofrece el modelo de simulación de las métricas que nos interesan (C/U y RTY) concuerda con la experiencia de los usuarios de la línea de fabricación. Tal concordancia es validada con test de hipótesis comparando los datos del modelo contra las observaciones recogidas del mundo real. Con esta validación pretendemos alcanzar

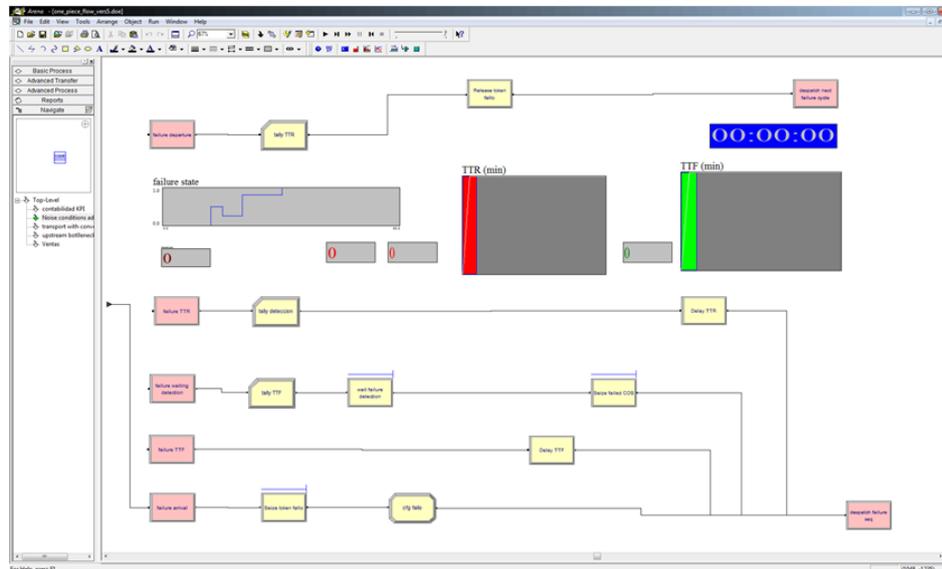


Figura 13: Subsistema *Noise conditions admin* del modelo (*elaboración personal*).

la aceptación del modelo, de manera que inspire confianza y destape las ventajas de su uso para analizar escenarios alternativos, derivando así las propuestas de cambio (Banks et al., 1995).

Para ello, vamos a explotar el modelo parametrizado para la forma de trabajo actual que en adelante nos referiremos como *BEFORE* ya que es la etapa anterior a los cambios. En primer lugar, ejecutamos el simulador en modo *current*, es decir, simulamos la situación de partida.

A continuación, comprobamos que la simulación representa bien la variabilidad del *throughput* (producción por turno) en la línea. Para ello completamos un test de igualdad de varianzas en la producción por turno que muestra el simulador contra los datos coleccionados (apartado 4.2) (Figura 14).

El Test F con un p-valor superior al 5%, indica que no tenemos evidencia para rechazar la hipótesis nula de igualdad de varianzas. Es decir, el modelo en ARENA representa bien la variabilidad de la producción por turno que ocurre en la realidad y que habíamos caracterizado con la recogida de datos por muestreo (apartado 4.2).

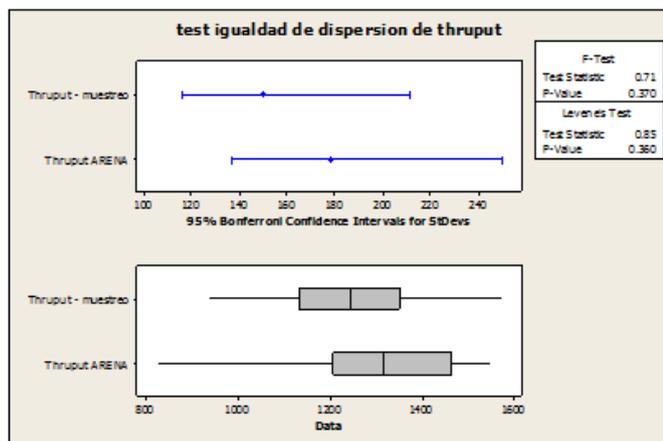


Figura 14: Test de igualdad de varianzas del throughput (*elaboración personal*).

A continuación comprobamos si el modelo en ARENA se adhiere al promedio de producción por turno estimado por muestreo en la recogida de datos reales (Figura 15).

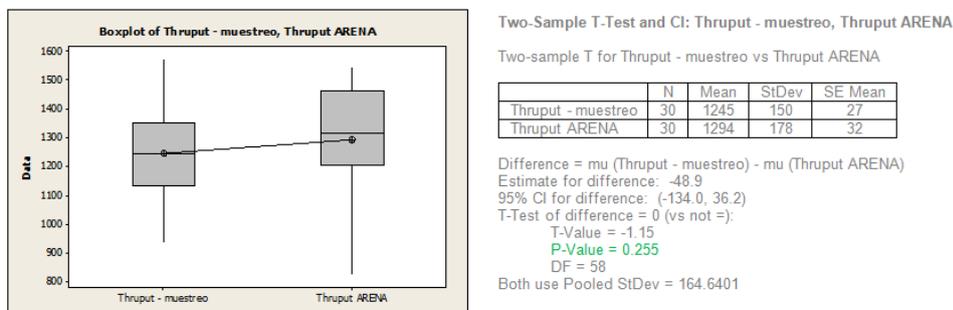


Figura 15: Test de igualdad de medias para el caudal (*elaboración personal*).

El *2-sample T* test nos revela con un p-valor superior al 5% que no tenemos evidencia para rechazar la hipótesis nula de igualdad de promedios en el *throughput* (el recogido por muestreo en la línea, y el producido con el simulador).

Recopilamos los datos ahora para comparar si tenemos adherencia suficiente entre el modelo del simulador y la realidad en cuanto a RTY (Figura 16a).

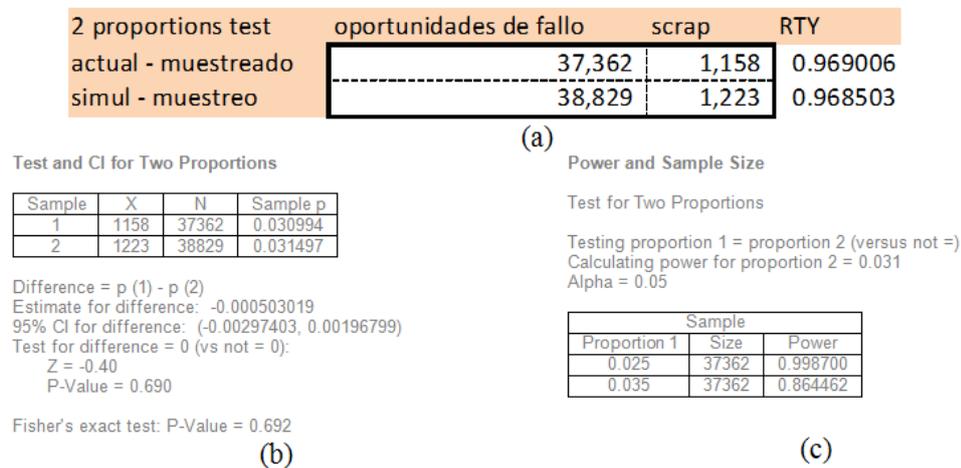


Figura 16: Análisis estadístico de los datos (*elaboración personal*).

Vemos por el p-valor del *2-proportion test* (>5%) que no tenemos evidencia estadística para rechazar la hipótesis nula de igualdad de proporciones de fallo (Figura 16b). Y por lo tanto, concluimos que el modelo de simulación representa con adecuada fidelidad la capacidad que el proceso real tiene en cuanto a fabricar piezas conformes a la primera.

Comprobamos por último la potencia del contraste (Figura 16c). Interesa comprobar que no cometemos errores superiores a 5.000 DPMO (Defectos Por Millón de Oportunidades al atravesar la línea completa). La realidad se mueve en el entorno de 30.000 DPMO. Vemos que con una potencia muy alta (>80%) podemos confiar en las conclusiones del test realizado. Por lo tanto, consideramos que nuestro modelo de simulación queda validado para el estado actual (*current status*), con lo que puede ser empleado para explorar posibles cambios a fin de mejorar el proceso y lograr el propósito de la investigación.

4.5. Análisis de Escenarios Alternativos

En este apartado, analizamos los escenarios alternativos a la situación actual que acaba de ser validada (apartado 4.4). Se trata de que el modelo explique con un

nivel de satisfacción (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) 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. De manera general, este análisis se divide en tres etapas (1) diseño de experimentos, (2) experimentación y (3) conclusiones o propuestas de cambios (Banks et al., 1995). En este trabajo, debido a la sencillez de los experimentos realizados, pasamos directamente a la etapa de experimentación, la cual nos permitirá extraer conclusiones en base a los resultados obtenidos y como consecuencia apoyar la toma de decisiones.

Procedemos por tanto a experimentar (cambio potencial) con la posible implantación de un sistema de detección temprana en la línea, es decir, cambiamos el control al final de la línea por la detección de defectos en origen (ejecutamos el simulador en modo *BEFORE*). Independientemente del análisis estadístico que desarrollamos a continuación, se puede ver en el subsistema contabilidad KPI (Figura 9), indicios de que vamos a obtener una mejora sustancial en la conducta del sistema tras implantar el paradigma *Lean Manufacturing* y más concretamente el principio *Jidoka* (calidad en origen) (apartado 2).

Para finalizar este apartado desarrollamos el tratamiento estadístico de los datos para determinar si tenemos una mejora significativa (Figura 17).

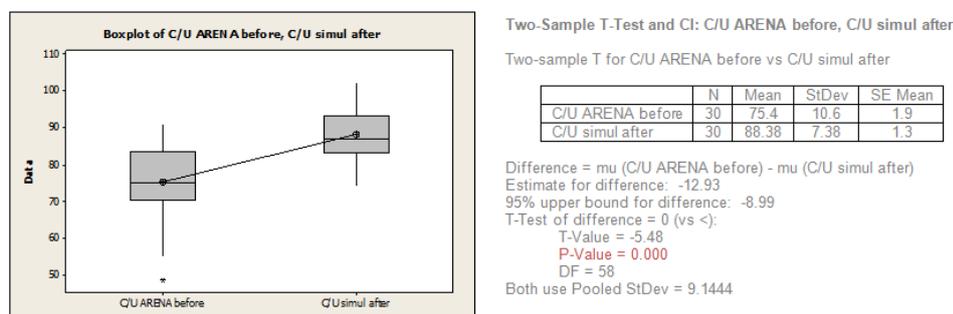


Figura 17: Test de igualdad de medias para el uso de la capacidad instalada respecto a la simulación (*elaboración personal*).

El test de hipótesis revela que, con un p-valor $< 5\%$, tenemos razones para rechazar la hipótesis nula de igualdad de C/U a favor de la hipótesis alternativa de mejora de C/U. Es decir, después de los cambios experimentados en la simulación, se obtienen valores mayores para la métrica C/U (utilización de la capacidad instalada).

Resumimos en la siguiente tabla (Figura 18) comparativa los resultados obtenidos antes y después de experimentar el modelo simulando el cambio diseñado. Estos resultados permiten concluir una clara expectativa de mejora.

Summary results	C/U	RTY	TTR (min)	TTF (min)	piezas en conveyor promedio	C/T bottleneck promedio
before (detección tardía)	75.4%	96%	20	29	4.6	21.6
AFTER (detección temprana)	88.4%	98%	7	29	4.6	18.7

Figura 18: Expectativa de mejora obtenida con el simulador (*elaboración personal*).

4.6. Validación (*Escenario Recomendado*)

Esta validación prueba la concordancia entre el desempeño del modelo experimentado y el desempeño del cambio en el sistema real, por lo que sólo puede ser llevado a cabo en la realidad. La mecánica a seguir es implantar a pequeña escala la mejora que hemos experimentado en el simulador en el sistema real. Debemos tener en cuenta que es necesario completar un proceso de entrenamiento y certificación de los agentes implicados en el cambio. Posteriormente se analizan los resultados de dicha implantación (procedemos a recoger una nueva muestra para validar la mejora) y en base a este análisis se toma una decisión (Banks et al., 1995) (Figura 19).

Aplicamos de nuevo teoría de muestras para dejar establecida la validez de la mejora. Un *2-sample T test* nos indica con un p-valor inferior al 5% que tenemos razones para descartar la hipótesis nula (de igualdad de C/U entre el antes y el después de implantados los cambios al sistema), a favor de que la situación de

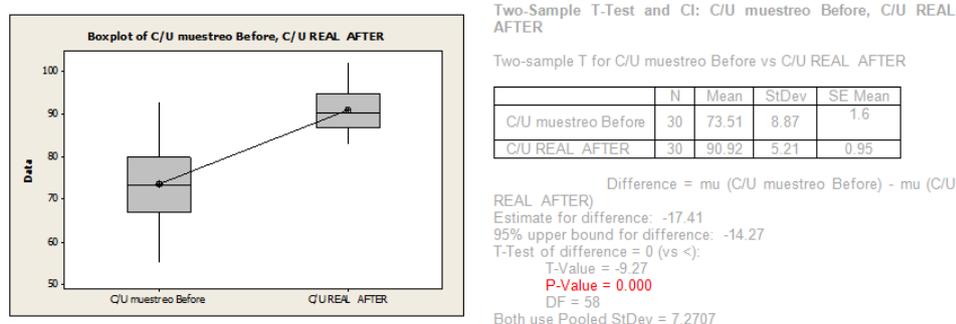


Figura 19: Test de igualdad de medias para el uso de la capacidad instalada respecto al muestreo (*elaboración personal*).

después tiene un C/U más alto (lo cual es mejor) que la situación de antes de los cambios.

5. Conclusiones

Los sistemas de producción buscan optimizar su rendimiento minimizando todas las posibles fuentes de desperdicio en una cadena de valor. Una fuente de desperdicio clásica son los defectos. Para disminuir la tasa de defectos y como consecuencia aumentar el rendimiento de los sistemas de producción, en este trabajo proponemos la utilización del paradigma *Lean Manufacturing* (Fabricación Flexible) como alternativa a otros paradigmas de comportamiento empleados habitualmente en dichos sistemas de producción.

Más concretamente, en este trabajo hemos demostrado mediante técnicas de simulación discreta, el efecto favorable que el paradigma *Lean Manufacturing* y particularmente el empleo de uno de sus principios, el principio *Jidoka* (calidad en origen), provoca sobre la reducción de defectos en los sistemas de producción. Queremos destacar que de las etapas definidas para completar el estudio de un sistema real mediante técnicas de simulación discreta (Figura 3), hemos dejado algunas sin completar (reporte, implantación y validación a gran escala) debido a diferentes restricciones tanto temporales como económicas.

El resultado positivo de esta demostración nos permite reforzar la idea de que la implantación del paradigma *Lean Manufacturing* en un sistema de producción aporta un valioso sistema de aprendizaje en todos sus agentes, generando un incremento del TTF y una reducción del TTR.

En cualquier caso, este sistema de aprendizaje no ha sido recogido en nuestro modelo de simulación, por lo que proponemos como posibles trabajos futuros la inclusión de dicho factor en el modelo construido, utilizando para ello diferentes técnicas de modelado como dinámica de sistemas o agentes inteligentes.

Referencias

1. Banks, J., Carson, J. S., Nelson, B. L. (1995): *Discrete Event Systems Simulation*. 2nd edition. Prentice-Hall.
2. Bicheno, J. (2002): *The quality 75*. PICSIE Books.
3. García Pérez, A. (1992): *Estadística aplicada: Conceptos básicos*. Universidad Nacional de Educación a Distancia.
4. Kelton, D.W., Sadowski, R.P., Sturrock, D.T. (2004): *Simulation with ARENA*. 3th edition. McGraw-Hill.
5. Liker, J.K., Meier, D. (2006): *The Toyota Way Fieldbook*. McGraw-Hill.
6. Thompson, J.R., Koronacki, J. (2002): *Statistical Process Control: The Deming Paradigm and Beyond*. Second Edition. Chapman and Hall/CRC.
7. Womack, J.P., Jones, D.T., Roos, D. (1990): *The Machine that Changed the World*. Rawson Associates.