

Assembly plant simulation to support decision-making on Layout Design considering safety issues. A case study

Simulación de una planta de montaje para apoyar la toma de decisiones en el diseño de distribución en planta considerando aspectos de seguridad. Un caso de estudio

Aída Sáez Más^a, José P. García-Sabater^b, Joan Morant Llorca^c y Julien Maheut^d

^aUniversitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia (Spain), adsems@upv.es ^bROGLE, Dto De Organización de Empresas, Universitat Politècnica de València, (Spain), jpgarcia@upv.es ^cUniversitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia (Spain), joamollo@upv.es and ^dEDEM Escuela de Empresarios, juma1@edem.es.

Recibido: 2016-02-23 Aceptado: 2016-07-27

Abstract

This paper presents a simulation model that has been created to support decision-making during the layout redesign of an engine and transmission assembly plant in the automotive sector. The plant requires a new layout and supply logistic due to an increase in its complexity and daily production. Discrete event simulation has been used to validate an initial proposal and to propose different what-if scenarios of layout and operations management systems. These scenarios will be evaluated regarding materials flow generated throughout the plants. The main focus of the decision process was focused on safety issues related to the material handling. The simulation model and its description have been done according to the methodology proposed in Sáez Más, García Sabater, Morant Llorca, y Maheut (2016), where the simulation model is focus as a 4-layer architecture (network, logic, data-base and visual reality). The achieved model is very flexible and modular, and it allows to save modelling time because of the parameterize of different combinations in layout and operations management.

Keywords: Layout design, Material flow, Assembly plant, Discrete event simulation (DES), 4-layer architecture, Forklift free Plant.

Resumen

Este trabajo presenta un modelo de simulación, que se ha creado para apoyar el rediseño de las instalaciones de una planta de montaje de motores y transmisiones en el sector del automóvil. La planta requiere de un nuevo layout y logística de aprovisionamiento, debido a un aumento en su complejidad y su producción diaria. La simulación por eventos discretos se utiliza para validar una propuesta inicial y proponer diferentes escenarios what-if de distribución y gestión de las operaciones. Estos escenarios se evalúan considerando el flujo de material generado a lo largo de las instalaciones. El principal objetivo durante la toma de decisiones se centra en aspectos de seguridad relacionados con el movimiento de material. La construcción de modelo de simulación y su descripción en el documento se realiza según la metodología propuesta en Sáez Más, García Sabater, Morant Llorca, y Maheut (2016) donde, el modelo de simulación se enfoca como una arquitectura de 4 capas (red, lógica, base de datos y realidad visual). El modelo obtenido resulta ser muy flexible y modular, lo que permite un ahorro de tiempo de modelado considerable, al parametrizar las diferentes combinaciones de distribución y de gestión de las operaciones.

Palabras clave: Diseño de instalaciones, Flujo de materiales, Planta de montaje, Simulación por eventos discretos, Arquitectura de 4 capas, Planta libre de carretillas elevadoras.

Introducción

La necesidad de diseñar nuevos sistemas o reconfigurar el actual se ha incrementado en gran medida, debido a los cambios en la demanda de los clientes, tanto en aspectos de cantidad como de variedad. El diseño de sistemas de producción es una tarea multidisciplinar que exige un trabajo intenso, y que resulta de vital importancia para la supervivencia de fabricantes en el entorno competitivo global.

Según Sly, Grajo, y Montreuil (1996) esta tarea de diseño implica la selección y disposición de las máquinas y estaciones, y la ruta del material y de los medios de manutención. Esto supone un reto, especialmente para industrias de gran complejidad, como es la industria del automóvil en la que resulta difícil y caro adaptar el sistema de producción a la vez que se mantiene la eficiencia en sus operaciones (Tjahjono, 2008).

En esta industria, debe ser evaluado simultáneamente, no sólo el proceso productivo primario, sino también, todo el flujo de aprovisionamiento a la línea de montaje. Agnetis et al. (1997) afirman que “el manejo de materiales ha sido la principal barrera de los sistemas productivos, originando fallos de producción, baja eficiencia y bajo rendimiento”.

Para obtener diseños de sistemas de calidad se deben de tener en cuenta, no sólo consideraciones económicas, sino otras como la flexibilidad, el flujo de materiales o la seguridad, especialmente para las personas. Y, estos son los principales focos en el caso de estudio presentado en este trabajo.

Por otra parte, las herramientas de simulación han jugado un papel importante en la evaluación del diseño y rendimiento de las operaciones de los sistemas de fabricación. De acuerdo con Bennett (1995), la simulación se puede definir como “una técnica o conjunto de técnicas a través de las cuales se desarrollan modelos que ayudan a entender el comportamiento de un sistema, real o hipotético”. La simulación está ampliamente asociada con explorar posibilidades para evaluar el comportamiento del sistema mediante la aplicación de los cambios internos/externos y para apoyar el proceso de mejora de eficiencia y de organización (Banks, Carson, Nelson, y Nicol, 2004).

Concretamente, la simulación por eventos discretos (DES) es una de las más comunes para analizar y entender la dinámica de sistemas productivos. La DES ha sido satisfactoriamente utilizada en numerosos estudios relacionados con el diseño de sistemas de producción y de operaciones, facilitando la toma de decisiones en contextos de fabricación (Negahban y Smith, 2014).

Es por ello que varios investigadores la han aplicado a diferentes problemas de distribución de instalaciones. Longo, Mirabelli, y Papoff (2006) realizan un análisis del coste del flujo de materiales utilizando la simulación y algoritmos genéticos para optimizar el *layout* de un sistema de fabricación. Chan y Chan (2005) presentan un caso de estudio en el que utilizan modelos de simulación para evaluar diferentes alternativas de diseño para un nuevo sistema de fabricación. Michalos, Makris, y Mourtzis (2012) proponen un algoritmo de búsqueda inteligente para derivar las alternativas de diseño de la línea de montaje e insertarlas en un software capaz de generar automáticamente los modelos de simulación para analizar su rendimiento. Dias, Pereira, Vik, y Oliveira (2014) analizan los problemas de diseño de los sistemas de producción que se aplican a un sistema de logística interna en el sector de la automoción.

Sin embargo, durante el uso de la DES en el diseño resulta necesario un conocimiento experto que permita modelar múltiples alternativas de diseño y realizar su correspondiente evaluación. De este modo, el propósito de este trabajo es, realizar y describir en detalle un modelo de DES. Este se construye para

ayudar en la toma de decisiones en el rediseño de una compleja planta de montaje del sector del automóvil.

Para ello, se utiliza la metodología de simulación propuesta en Sáez Más et al. (2016) que enfoca la construcción del modelo como una arquitectura de 4 capas (red, lógica, base de datos y realidad visual). Al aplicar esta metodología en la construcción del modelo, se persigue alcanzar lo siguiente:

- Aplicar la metodología y la arquitectura de 4 capas propuesta en un caso de estudio, para desarrollar un modelo de simulación flexible que se pueda modificar con facilidad y rapidez.
- Describir en detalle el modelado de cada una de las capas.
- Explicar la validación de un modelo de simulación que representa una propuesta de diseño y la logística asociada.
- Ver cómo se ha desarrollado la experimentación, dónde se proponen diferentes escenarios *what-if* de distribución en planta y operaciones con el fin de mejorar la propuesta inicial desde el punto de vista del flujo de materiales y la seguridad para los operarios asociada.

El resto del trabajo está organizado del siguiente modo. En primer lugar, se plantea el problema de caso de estudio, donde se identifican las diferentes secciones existentes y se detallan las actividades realizadas en cada una de ellas. A continuación, se describe el modelo de simulación realizado siguiendo la estructura de 4 capas anteriormente comentada. Una vez finalizada la descripción del modelo, en el siguiente apartado, se describe cómo se ha llevado a cabo la validación del modelo y qué vías se han utilizado para ello. Más adelante se plantea la experimentación realizada. En el penúltimo apartado se comentan los resultados, las percepciones y las recomendaciones al caso. Se concluye el trabajo con un análisis del trabajo realizado y con las conclusiones.

Descripción del problema

Evolución del proceso del montaje

El problema se centra en el proceso de ensamblaje de motores y transmisiones de una fábrica de montaje de automóviles. En este proceso, se monta el motor junto a su transmisión y pequeñas piezas, para posteriormente ser enviado a la línea de montaje final de vehículos. Inicialmente, las operaciones ligadas a este submontaje se realizaban dentro de la planta de montaje final, junto al *Point Of Fit* (POF), con un montaje en secuencia y suministro directo. Se denomina POF al punto de entrega, en este caso, del subconjunto de motor y transmisión, para que se monte en el vehículo correspondiente.

Debido al incremento de complejidad del proceso (fundamentalmente en el incremento en el número de variantes y tamaño de los submontajes), fue necesario trasladar estas operaciones a una planta independiente de 4.000 m² llamada *Engines Building* (EB). En ella, se ensambla el subconjunto, tanto en celdas de montaje como en una línea de montaje y se almacena el material en el suelo contra las paredes.

La variedad de motores ha crecido durante las últimas décadas, por lo tanto, se ha originado también un incremento en la variedad de componentes y materia prima utilizado (García-Sabater, Maheut, y García-Sabater, 2009). Actualmente, se tiene previsto seguir incrementando tanto la variedad como la cantidad de unidades a fabricar. Se pasará a tener 35 variantes de motores y 40 variantes de transmisiones, experimentando así un incremento en (1) su complejidad de producción, ya que aumenta el número de combinaciones finales, y (2) en la producción diaria (35% más).

El aumento de variantes del subconjunto montado lleva asociado un incremento en el tráfico de carretillas elevadoras en la zona de ensamblado. La situación actual ya ha sido calificada como poco segura para las personas, y las necesidades, sin cambios de infraestructura, sólo pueden empeorarlo. Las carretillas elevadoras tienen una amplia flexibilidad, ya que se adaptan fácilmente a diferentes situaciones y ambientes. Sin embargo, también son muy ineficientes y tienden a provocar accidentes en los puestos de trabajo (Govaert, 2011).

Con el fin de aumentar la seguridad y liberar la zona de producción del movimiento de carretillas elevadoras, se persigue cumplir una restricción de seguridad de la planta: el denominado *Forklift Free Plant*, planta de producción libre de carretillas elevadoras. Esta restricción ha sido utilizado en otras investigaciones de plantas de montaje en el sector del automóvil como Cottyn, Govaert, y Van Landeghem (2008); Govaert (2011) y Bauters et al. (2015).

Para resolver este problema, se planteó la propuesta de varias opciones, como cambiar el sistema de almacenamiento actual por otros medios de almacenamiento, por ejemplo almacenes automáticos y cintas transportadoras hasta la línea o el uso de AGV (*Automated Guided Vehicle*) entre las diferentes celdas de montaje.

Después de plantear varias alternativas de rediseño, se vio necesario ampliar la superficie destinada a este proceso, para mejorar el sistema de entregas, y gestionar así, de manera más independiente, la actividad de almacenamiento de la de producción. De este modo, se ha decidido construir una nueva nave de 3.000 m^2 , *Storage Building* (SB), que se destinará exclusivamente al almacenaje y preparación de envíos de material.

El edificio EB seguirá albergando las operaciones del ensamblado, sin embargo, las carretillas elevadoras solo trabajarán en el SB. Una nueva flota de carretillas remolcadoras se encargará de recoger el material en el SB y remolcarlo hasta el EB. De este modo, trasladando todo el flujo de carretillas elevadoras al almacén (SB) y permitiendo únicamente el acceso de remolcadoras al EB, se podrían conseguir una planta completa de 4.000 m^2 como *Forklift Free*.

Así pues, se plantea la necesidad de (1) analizar la nueva distribución en dos plantas y la nueva logística de aprovisionamiento propuesta y valorar posibles mejoras, (2) verificar que se puede alcanzar que el EB sea una planta libre de carretillas elevadoras, y (3) asegurar que se alcanza la producción deseada al aumentar el dock-to-dock, ya que con el nuevo diseño existe una mayor distancia entre el almacén y el punto de uso según el recorrido de material.

Layout propuesto

La propuesta de distribución en 2 plantas (edificios SB y EB) se muestra en la figura 1. A continuación, se describen cada una de las secciones:

Storage Building

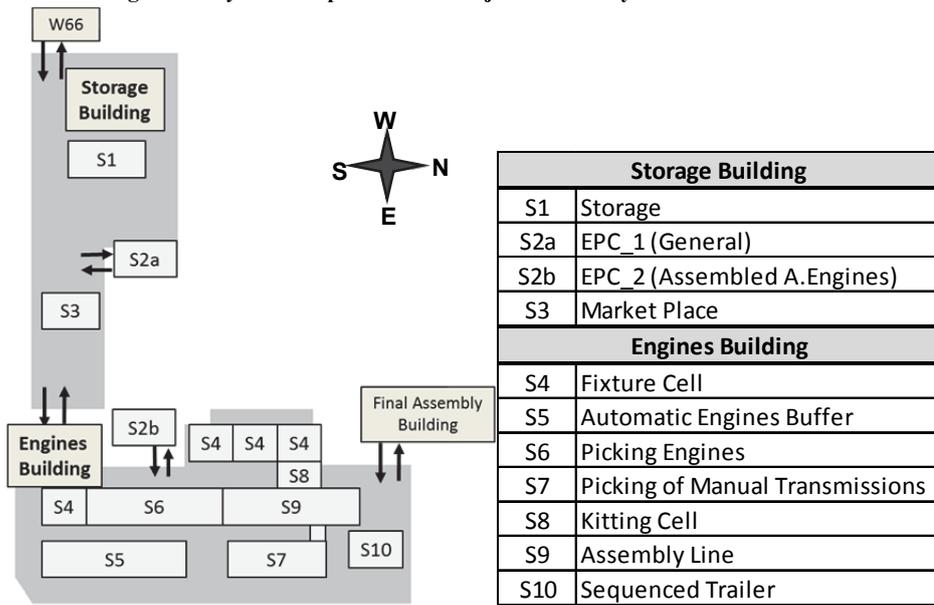
- (S1) *Storage Area*. En este almacén, se guardan los motores (automáticos y manuales) y las transmisiones (manuales) en racks de 6 unidades, y las transmisiones automáticas en racks de 20 unidades. Los racks se almacenan en bloques apilados, donde en cada ubicación se apilan 4 racks de la misma referencia. Este almacén se abastece directamente desde otro almacén externo llamado W66.

- (S2a) EPC_1. Almacén de racks vacíos generados por el consumo de motores y transmisiones dentro de la planta.
- (S2b) EPC_2. Es un almacén de racks vacíos procedentes del consumo de motores automáticos ya ensamblados dentro de la planta.
- (S3) *Market place*. Zona que actúa de unión entre las dos plantas. En ella, se preparan los racks solicitados para ser enviados dentro de la planta de montaje.

Engines Building

- (S4) *Fixture Cells*. Esta sección está formada por 4 celdas de montaje de motores y transmisiones automáticas, donde se ensambla contra *stock*. Debido a los tiempos de *setup*, el montaje de este subconjunto se realiza por lotes. Cada estación cuenta con una mesa de trabajo, una grúa, un rack de motores automáticos y uno de transmisiones automáticas, un rack vacío y un puesto con pequeñas piezas. La operación puede ser realizada por una o dos personas. En función del número de personas, el tiempo de operación puede ser distinto.
- (S5) *Automatic engines buffer*. Almacén intermedio donde se almacenan los motores automáticos ensamblados en las *fixture cells*. Desde aquí, irán a la línea de montaje final.
- (S6) *Picking engines*. Previamente a la línea de montaje, se encuentra una zona de selección con plataformas con un rack de cada referencia de motores de cambio manual.
- (S7) *Picking of manual transmissions*. Zona de selección con plataformas con un rack de cada referencia de transmisiones manuales. Los motores de cambio manual se ensamblan en la línea con la caja de transmisiones.
- (S8) *Kitting cell*. Estación donde se preparan kits de pequeñas piezas en secuencia. Los kits se colocan en la línea junto a su motor correspondiente.
- (S9) *Assembly line*. En la línea de montaje, se ensamblan las transmisiones manuales junto a su motor manual correspondiente, y a los motores automáticos ensamblados previamente se les montan unas piezas y realiza una serie de operaciones.
- (S10) *Sequenced trailer*. Una vez ensamblados los motores, se colocan sobre un tráiler. Una vez se llena el tráiler, se envía a la línea de montaje final (POF) para ser ensamblado al vehículo correspondiente.

Figura 1: *Layout* de la planta de montaje de motores y transmisiones. Fuente: Elaboración propia.

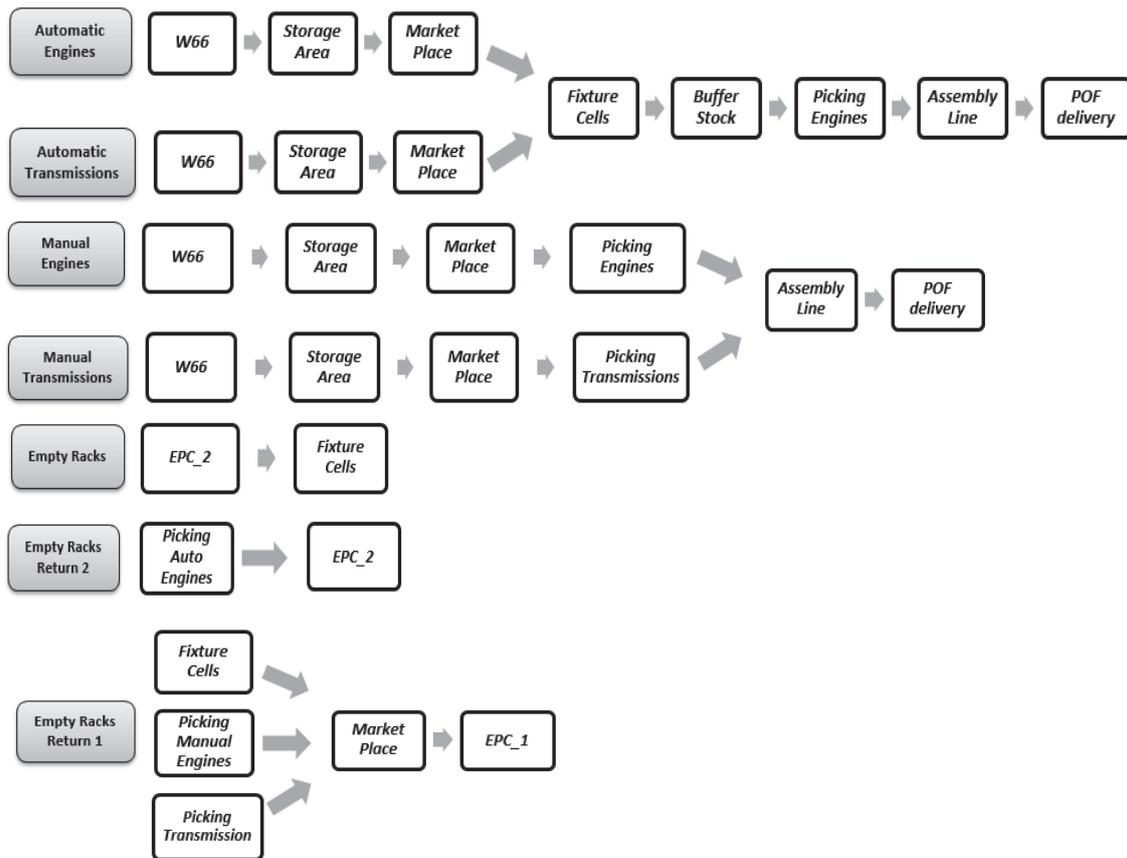


Flujo de materiales

Los motores, dependiendo de si llevan una transmisión manual o automática exigen procesos de ensamble distintos. Por ello, seguirán una ruta diferente dentro de la planta. Este flujo de material hace referencia al transporte mediante medios de manutención de los motores requeridos en cada sección. Dado el volumen de los racks, además del suministro de embalajes llenos de piezas, también se considera el flujo (tanto la alimentación como el retorno) de los racks vacíos. Tanto los motores como las transmisiones se almacenan en racks, estando los diferentes flujos representados en la figura 2. El resto de materiales se suministran mediante tarjetas kanban. Un carro inicia una ruta cada hora y realiza el reparto a las estaciones de montaje de automáticos y la celda de *kitting*.

En el almacén SB, trabajarán los siguientes medios de manutención: (1) FLT (*Forklift*) almacenando las recepciones de material y preparando pedidos para enviarlos a la planta de ensamble y (2) TT (*Tow Trucks*) transportando material desde el SB hasta el EB. Dentro del edificio de producción EB, solo circularán TT.

Figura 2: Flujo de materiales en el proceso de producción. Fuente: Elaboración propia.



Descripción de las operaciones por sección

A continuación, se detalla qué operaciones se realizan en cada una de las secciones y la relación que existe entre ellas:

- (S1) *Storage Area*. El almacén se abastece directamente desde otro almacén más alejado (W66). Cuando este almacén acumula 4 peticiones de racks, envía un tráiler con el material. Los racks se depositan en una zona de descarga. Los FLT se dedican a almacenar los racks recepcionados, a sacar del almacén los racks solicitados, y depositarlos en una plataforma libre del *market place* para su posterior envío.
- (S2a) *EPC_1*. Los FLT acuden a este almacén para dejar los racks vacíos generados en producción que han sido llevados al *market place*. Se asume que este almacén dispone de capacidad suficiente para albergar todos los racks vacíos generados. Periódicamente, acude un camión para devolver los racks vacíos a los proveedores.
- (S2b) *EPC_2*. Los TT utilizan este almacén para liberar racks vacíos procedentes del consumo de motores automáticos ya ensamblados dentro de la planta, o para abastecer de vacíos la *fixture cell*. Estos racks tienen capacidad para 3 motores y se encuentran sobre una plataforma con ruedas de manera que los TT solo los remolcan por la planta. Se asume que este almacén dispone de capacidad suficiente para albergar todos los racks vacíos generados.

- (S3) *Market place*. Los racks, tanto llenos (*storage area*) como vacíos (EPC_1), son depositados por un FLT sobre una plataforma con ruedas, a la espera de que un TT acuda a recogerlo y lo remolque hasta el punto del EB donde ha sido solicitado.
- (S4) *Fixture Cells*. Cuando se decide fabricar un determinado motor automático, la celda se suministra con (1) un rack vacío procedente de EPC_2, (2) un rack de motores automáticos y (3) un rack de transmisiones automáticos procedentes de *Storage Area*. Sobre la mesa y con ayuda de la grúa, un operario ensambla un motor y una transmisión. Los motores terminados se colocan por lotes de 3 en un rack vacío sobre una plataforma con ruedas. Una vez el rack está completo, vendrá un TT para llevárselo y traer otro vacío y poder seguir trabajando. El lote de fabricación será de 6 unidades para no generar racks parcialmente llenos.
- (S5) *Automatic engines buffer*. Los racks de motores automáticos terminados en la sección anterior son remolcados por los TT a este buffer intermedio, a la espera de que en la zona de picking se acabe dicha referencia y sea necesario abastecerla con un rack completo. Como máximo, esta zona va a albergar dos racks de 3 unidades por referencia, ya que el lote de fabricación de las fixture cells es de 6 unidades.
- (S6) *Picking Engines*. Un operario con ayuda de un puente grúa, selecciona la siguiente referencia que marca la secuencia y la deposita al inicio de la línea. Esta zona es suministrada por los TT con racks de motores manuales procedentes del market place, y con motores automáticos junto a su transmisión del buffer stock.
- (S7) *Picking of manual transmissions*. Un operario, con ayuda de un puente grúa, selecciona la siguiente referencia secuenciada y la deposita al inicio de la línea.
- (S8) *Kitting cell*. En esta estación, un operario introduce en una caja todas las pequeñas piezas necesarias para el montaje de cada motor en la línea de montaje (S9). Los kits se preparan siguiendo la secuencia de la línea. Esta celda es suministrada por cajas vacías, mediante un sistema de retorno al final de la línea, y por un sistema kanban de suministro periódico de las pequeñas piezas.
- (S9) *Assembly line*. A lo largo de la línea, los operarios ensamblan las transmisiones manuales junto a su motor correspondiente. A los motores automáticos ensamblados previamente, se les montan unas piezas y se les realizan una serie de operaciones. Las operaciones se realizan en estaciones de trabajo donde interactúan operarios y robots (Maheut, Morant Llorca, y Garcia-Sabater, 2015).
- (S10) *Sequenced trailer*. Al final de la línea, un operario, con ayuda de un puente grúa, saca los motores de la línea y los va colocando en secuencia sobre un tráiler con 4 plataformas, sobre las que se pueden colocar un máximo de 3 motores en cada una. Una vez llenado, el tráiler se envía a la línea de montaje final (POF) para ser ensamblado al vehículo correspondiente.

Modelo de simulación

Con la construcción de un modelo de simulación flexible de la planta, se busca estudiar en profundidad el problema y dar respuesta a las múltiples consideraciones que aportan complejidad al problema. Se debía tomar decisiones en cuando al dimensionamiento y gestión de la flota, las colas, tiempos de entrega y posibles retrasos en el suministro, dimensionamiento y ubicación de las células, integrar el sistema de planificación y control de producción con el de manejo de materiales, reubicar los almacenes y de las

nuevas referencias, definir el sistema de aprovisionamiento y conocer los efectos de estos cambios en todo el sistema de fabricación. Por otra parte, se quiere ver cómo funcionaría la propuesta inicial si se implementase, para así evitar situaciones no deseadas en el sistema real e invertir en la implementación de un sistema nuevo sin antes haberlo validado.

Para conseguir el modelo flexible deseado, se sigue la metodología introducida en Sáez Más et al. (2016) y se utilizará la terminología propuesta en él, como el modelo de 4 capas:

- *Network*. Red por la que moverán los elementos del sistema.
- *Logic*. Programación de la lógica de funcionamiento del modelo, como el sistema de información y manejo de materiales, procesos, eventos, variables y parámetros necesarios.
- *Database*. La lógica de simulación se apoyará en una base de datos, en la que se guardarán datos necesarios de cada una de las secciones de los productos.
- *Visual Reality*. Finalmente, se mejora el aspecto visual para que se asemeje a la realidad. Una de las partes interesantes de la simulación es poder visualizar cómo se comporta el sistema, pudiéndose detectar errores de programación a simple vista.

Las lógicas de funcionamiento se han modelado a través de la API (*Application Programming Interface*) del software de simulación. En este caso, se ha utilizado un software de simulación por eventos discretos SIMIO Simulation Software®, cuya API es C#. El modelo de simulación se ha construido sobre un fichero de tipo CAD (*Computer-Aided Design*) de la planta, con el fin de localizar correctamente las instalaciones manteniendo la escala.

El problema descrito anteriormente no fue modelado directamente en toda su complejidad final, sino que se inició como un problema inicial más sencillo, y se fue perfeccionando a través de iteraciones sucesivas. Gracias a la arquitectura de 4 capas utilizada, ha sido posible, conforme avanzaba la construcción del modelo, que este fuera adquiriendo mayor complejidad, como ha sido la construcción de una nueva nave, trasladar el almacén a otra ubicación, el diseño del *market place*, etc.

Gracias a la flexibilidad y agilidad que la aplicación de la metodología aporta al modelo de simulación flexible, ha sido posible definir diferentes alternativas de la distribución en planta y enfrentarla a diferentes estrategias de trabajo de manera rápida. Esto se ha llevado a cabo sin tener que realizar modificaciones indistintamente entre la lógica y lo físico, únicamente realizando cambios sobre parámetros. Esto ha sido posible gracias a que las estrategias de funcionamiento de la planta se han parametrizado para poder trabajar en un entorno dinámico. De este modo, se asegura que el modelo sea robusto ante posibles cambios en las alternativas y escenarios. Al mismo tiempo, este esquema de diseño ha permitido un ahorro de tiempo considerable al no tener que realizar diferentes modelos de simulación para cada alternativa y escenario.

Network

La construcción del modelo se debe iniciar con la infraestructura del modelo, es decir, la red que permite el flujo de material y el equipamiento móvil. Esta infraestructura se compone de dos tipos de elementos, simples y compuestos. Los elementos simples son los nodos, que corresponden con los puntos de paso y uso de material, caminos, las conexiones entre los nodos, maquinaria, puntos de almacenamiento y medios de mantenimiento entre otros. Por el contrario, los elementos compuestos se forman a partir de elementos simples, con el fin de representar elementos de entornos más complejos que representan procesos de

fabricación, logística, carretillas y almacenaje, o cualquier elemento simple que requiera de mayor inteligencia a la básica permitida por el software.

En esta sección, también se distingue entre el flujo de material principal (máquina-cinta transportadora y el material que es transportado) y el flujo de elementos de manutención (FLT, TT, pasillos y caminos).

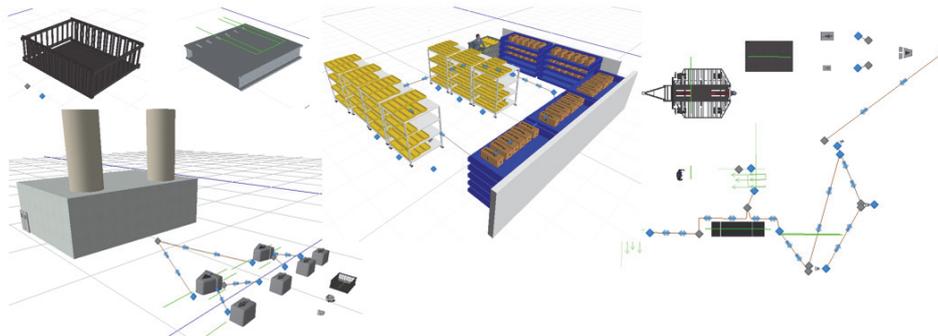
Los elementos compuestos se han simulado como pequeños submodelos del modelo general. Esto permite simplificar el ejercicio y estandarizar operaciones similares. El modelo general consta de un total de 10 elementos compuestos. En la figura 3, se pueden apreciar algunos ejemplos de estos elementos compuestos. A continuación, se describen cada uno de ellos:

- W66. Este modelo simula el comportamiento de un almacén que está formado por los siguientes elementos simples: fuentes que crean el material según las peticiones generadas por el sistema de información (SI), elementos que combinan los motores y transmisiones junto a su rack correspondiente, una estación que actúa de almacén provisional, y los diferentes caminos que enlazan y permiten el flujo de material principal entre puntos.
- Recepción de material del SB. Este modelo está formado por un único elemento simple y actúa como almacén provisional. Los tráilers procedentes del W66 descargan en esta plataforma, a la espera de que un FLT acuda, y en ese momento se libera.
- Ubicación almacén SB. Este modelo está formado por un único elemento simple y simula una posición del almacén, que alberga una referencia de material y hasta un máximo de 4.
- *Market Place*. Cada posición incluye un único elemento simple, donde cada posición de apoyo simula un pequeño almacén preparado para albergar una plataforma con un rack.
- *Storage Building*. Este edificio está a su vez formado por otros de estos submodelos que representan las secciones que la forman (recepción de material del SB, ubicación almacén SB y *market place*), así como los elementos de manutención necesarios para el transporte entre dichas secciones mediante carretillas.
- Celda de *kitting*. Esta celda está formada por una fuente que crea las cajas y estanterías con material. Un operario realiza el flujo de material principal. Finalmente, estas cajas esperan en un buffer intermedio a la espera de que sea requerido en otro submodelo.
- Línea de montaje. La línea la conforman diferentes estaciones unidas entre sí mediante un conveyor que transporta entre ellas el material.
- Posición de *Picking*. Posición de almacén de un rack de una referencia para suministrar la línea de montaje. Este modelo está formado por un único elemento simple.
- *Fixture Cell*. Esta celda está formada por unos pequeños almacenes que albergan racks vacíos y otros llenos de material. Un operario se mueve por este elemento, a través de caminos, para en una mesa de operaciones ensamblar el producto seleccionado. Finalmente, el producto se almacena en otro pequeño almacén.
- Posición *Buffer*. Esta posición está formado por un único elemento simple y simula un almacén con capacidad para un rack, que esperará a que sea requerido en la zona de picking.

Cada uno de estos submodelos ha sido dotado de autonomía en los procesos de toma de decisión. Esta inteligencia se controla mediante parámetros modificables desde la base de datos o desde el propio simulador.

Todos estos elementos compuestos se han unido entre sí y a la infraestructura de nodos y pasillos inicial, para así permitir el acceso y flujo de los medios de manutención.

Figura 3. Ejemplos de submodelos de elementos compuestos utilizados en el modelo. Fuente: Elaboración propia.



Logic

La lógica del SI de la planta de motores está formada por los procesos principales de la figura 4 y la relación entre ellos. Se podría decir que la capa lógica es en realidad el *Material Handling System* (MHS). El MHS incluye todos los procesos de toma de decisión relativos al movimiento, almacenamiento, control y protección de los materiales, bienes y productos a través del proceso de producción, distribución, consumo y venta (MHI, 2016). El SI se encarga de dar las órdenes de trabajo a los diferentes elementos del sistema. El SI lee los datos de entrada para realizar el *setup* del sistema y, a partir de ese momento, comienza el funcionamiento de la línea de montaje. Para realizar el *setup*, el modelo llena todas las ubicaciones de *picking*, *buffer* y almacén con racks.

Una vez el sistema ha sido preparado, se comienza a fabricar el siguiente motor que indica la secuencia de trabajo. A partir de este momento, en el caso en el que se alcance la situación en la que se consume el último motor del rack, se mandará una señal de llamada para retirar el rack vacío y traer otro de la misma referencia. Esta señal es captada por el sistema que gestiona el flujo de carretillas y de materiales. En la figura 5, se puede ver cómo se gestiona el flujo de material y las señales que recibe y emite el SI en cada sección.

En la sección de *Engines_Picking*, el procedimiento *Next_Engine* informa a un operario de cuál es el siguiente motor a introducir en la línea de montaje. En caso de que el motor seleccionado sea el último, se realizará la acción de *Last_Auto* o *Last_Manual*, según el motor sea automático o manual respectivamente. *Last_Manual* emitirá una señal al *TT_Manager* y *FLT_Manager* con una petición de retirar el rack vacío y traer uno nuevo de la misma referencia del almacén respectivamente. Por el contrario, el *Last_Auto* mandará una señal al *TT_Manager* solicitando dos peticiones, retirar el rack vacío y traer una de la misma referencia desde el *Auto Buffer*.

Figura 4: Procesos y eventos generales del SI y del MHS. Fuente: Elaboración propia.

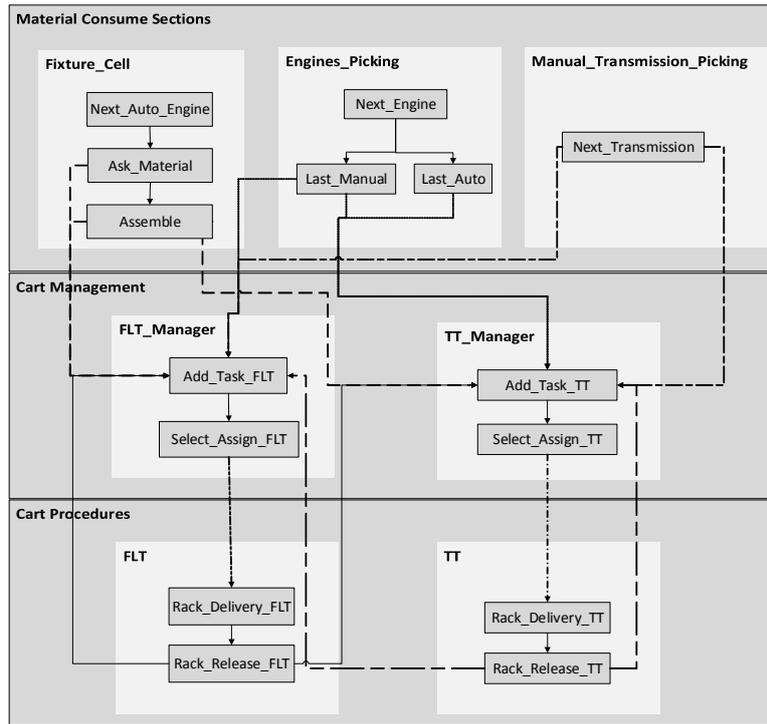
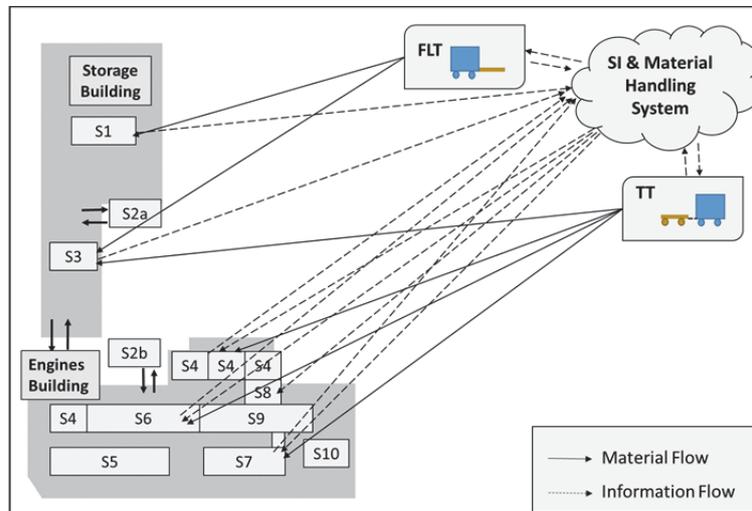


Figura 5. Representación del flujo de información y de material entre el SI y el MHS con los medios de mantención y las secciones de la planta. Fuente: Elaboración propia.



Por otra parte, las Fixture_Cells se gestionan del siguiente modo, el procedimiento Next_Auto_Engine revisa el nivel de stock de motores automáticos en el auto buffer. En caso de ser inferior a un nivel mínimo, el SI decidirá cuál es la siguiente referencia a fabricar, realizando el procedimiento Ask_Material. Este procedimiento se encarga de enviar una llamada al FLT_Manager para que prepare el material necesario (un rack de motores, uno de transmisiones y otro vacío en el que colocar los motores ensamblados. Una vez provisto de material, Assemble contabilizará los motores ensamblados, y al llenar un rack avisará

al TT_Manager para que transporte el rack lleno al *Automatic Engines Buffer*, y si ha de seguir ensamblando otra al FLT_Manager para que traiga otro rack vacío.

El FLT_Manager, en su procedimiento Add_Task_FLT va recibiendo las peticiones de transporte y las va añadiendo a una lista de tareas en la base de datos y asignando una prioridad. También, actualiza el estado de las FLT. Por ejemplo, las peticiones de retirar rack de plataforma siempre irán por delante de introducir rack para disponer de plataformas libres. Select_Assign_FLT selecciona la siguiente de tarea de la lista con mayor prioridad y se la asigna a una FLT libre.

La FLT con el procedimiento Rack_Delivery_FLT recibe la señal del transporte a realizar, consultando la ubicación del producto y el lugar de destino. Rack_Release_FLT informa al SI de que ha realizado la acción y se encuentra libre, y en el caso de haber dejado un rack en el market place envía una señal al TT_Manager para que gestione el envío de ese rack desde el market place hasta su destino final en la planta.

El TT_Manager, en su procedimiento Add_Task_TT va recibiendo las peticiones de transporte y las va añadiendo a una lista de tareas en la base de datos y asignando una prioridad. También actualiza el estado de las TT. Por ejemplo las peticiones de retirar rack, siempre irán por delante de introducir rack. Select_Assign_TT selecciona la siguiente de tarea de la lista con mayor prioridad y se la asigna a un TT libre.

La TT con el procedimiento Rack_Delivery_TT recibe la señal del transporte a realizar, consultando en la ubicación del producto y el lugar de destino. Rack_Release_TT informa al SI de que ha realizado la acción y se encuentra libre, en el caso de haber dejado un rack en el market place envía una señal al FLT_Manager para que gestione el envío de ese rack desde el market place hasta EPC.

Los modelos de motores se producen mediante un sistema *pull*, basado en la demanda del cliente. Dado que se anticipa que el sistema funcionará mejor o peor en función de la calidad de la secuencia se han creado dos modos alternativos para generar secuencia, que durante la etapa de experimentación, permitirán comprobar el correcto funcionamiento de cada alternativa. En ellos, se permite realizar modificaciones en el mix de producción, en la producción diaria y en la cantidad de referencias. El primer modo generará una secuencia razonablemente regular utilizando un procedimiento basado en el *Product Rate Variation Problem* descrito en Bautista, Companys y Colomina (1996). El segundo modo es generar una secuencia aleatoria en la que se selecciona la siguiente unidad con una probabilidad proporcional a la demanda prevista.

Database

Los datos necesarios para la simulación se almacenan en dos estructuras diferentes. La interna de la simulación (se hace así en aquellos casos en los que se asume que acceder a la base de datos puede ser demasiado costoso en términos computacionales) o utilizando una base de datos externa, al modo *Enterprise Resource Planning* (ERP), que en el presente caso se ha realizado mediante MySQL.

La base de datos externa tiene 9 tablas donde en 4 de ellas se almacena información de las ubicaciones de las zonas de almacenamiento disponibles (*Storage Area*, *Picking Engines*, *Picking of Manual Transmissions* y *Automatic Engines Buffer*), lista de referencias (*Reference list*), pizarra de los carretilleros (MHS), secuencia de fabricación (*Picking sequence*), fabricación en las celdas (*Fixture cells*) y los motores de la secuencia fabricados (*Manufactured engines*).

Reference List: Contiene la información de todas las referencias de motores y transmisiones disponibles en el almacén, que pueden ser utilizados en el proceso de fabricación. Informa de qué tipo de referencia es.

Nombre Columna	Tipo	Nombre descriptivo	Rango valores permitidos	Descripción
ID	int	Identidad del motor	1 - 75	Identifica la cantidad de referencias.
Reference	varchar	Referencia disponibles	A1-A15 M1-M20 TA1-TA20 TM1-TM20	Nombre asignado a cada referencia, no se repite ninguno en la tabla.
Type	varchar	Tipo de motor	Motor Transmisión	Identifica si dicha referencia es un motor o una transmisión.
Transmission	varchar	Tipo de transmisión	Automática Manual	Informa si esa referencia corresponderá a un motor manual o automático.

Storage Area: Esta tabla enumera cada una de las ubicaciones del almacén y qué tipo de referencia (motor o transmisión) la ocupa.

Nombre Columna	Tipo	Nombre descriptivo	Rango valores permitidos	Descripción
Location	int	Posición del almacén	1 - 75	Identifica cada una de las posiciones existentes en el almacén del edificio SB.
Reference	varchar	Referencia disponibles	A1-A15 M1-M20 TA1-TA20 TM1-TM20	Nombre de la referencia que se almacenará en esa posición.

Automatic Engines Buffer. Almacena qué referencia ocupa cada ubicación el *buffer*, y cuales están vacías y podrán ser ocupadas por nuevos motores.

Nombre Columna	Tipo de Datos	Nombre descriptivo	Rango valores permitidos	Descripción
Location	int	Localización	1 - 24	Identifica cada una de las posiciones existentes en el buffer de motores automáticos.
Reference	varchar	Referencia	Vacío, A1 – A15	Nombre de la referencia sobre que ocupa en cada momento cada localización.

Picking Engines. Cada ubicación de la zona de *picking* tiene asignada una referencia. Esto permite al MHS saber a qué nodo tiene que enviar a los carretilleros.

Nombre Columna	Tipo de Datos	Nombre descriptivo	Rango valores permitidos	Descripción
Location	int	Localización	1 - 35	Identifica cada una de las localizaciones del picking de motores.
Reference	varchar	Referencia	A1-A15 M1-M20	Nombre de la referencia que ocupa cada posición.

Picking of Manual Transmission. Cada ubicación de la zona de *picking* tiene asignada una referencia. Esto permite al MHS saber a qué nodo tiene que enviar a los carretilleros.

Nombre Columna	Tipo de Datos	Nombre descriptivo	Rango valores permitidos	Descripción
Location	int	Localización	1 - 20	Identifica cada una de las posiciones existentes en el picking de las transmisiones manuales.
Reference	varchar	Referencia	TM1 – TM20	Nombre de la referencia sobre que ocupa cada localización.

Fixture Cells. De cada celda de montaje se puede saber si no está fabricando o en el caso de estarlo qué referencia es.

Nombre Columna	Tipo de Datos	Nombre descriptivo	Rango valores permitidos	Descripción
Cell	int	Número de Celda	1 - 4	Identifica cada una de las 4 fixture cells.
Assembling	int	Referencia	-1 , 1 - 75	Visualiza si la celda está ocupada o no.

Picking Sequence. Indica la secuencia de montaje de la línea. En base a esta secuencia los operarios de picking seleccionan qué producto introducir en la línea.

Nombre Columna	Tipo de Datos	Nombre descriptivo	Rango valores permitidos	Descripción
ID	int	Identificación	1 - 4500	Identifica cada uno de los motores que marca la secuencia de producción.
Engine	int	Motor a fabricar	1 - 75	Nombre de la secuencia de la referencia que se va a producir en la línea.

Manufactured Engines. Cada uno de los motores fabricados en la línea se actualizan en esta lista.

Nombre Columna	Tipo	Nombre descriptivo	Rango valores permitidos	Descripción
ID	int	Identidad del motor	1 - 75	Identifica la cantidad de variedades de motores que pueden ser ensamblados en la línea.
Reference	varchar	Referencia de motores disponibles	A1-A15 M1-M20	Tipo de motor creado.
Transmission	varchar	Tipo de transmisión	TA1-TA20 TM1-TM20	Informa del tipo de transmisión que lleva ese motor.
Option	varchar	Tipo de motor	Automática, Manual	Identifica si dicha referencia es un motor manual o automático.

Material Handling Equipment: En esta tabla, se actualizan las tareas de los carretilleros, con la descripción de qué acción ha sido solicitada, en qué nodo del plano, qué referencia debe transportar, la prioridad (las acciones de sacar rack irán priorizarán respecto de las de alimentar, en el caso contrario se puede contradecir el SI), y el estado (*to do; in progress; completed*). Esta tabla simula la pizarra de tareas que deben de seguir los carretilleros.

Nombre Columna	Tipo de Datos	Nombre descriptivo	Rango valores permitidos	Descripción
ID	int	Identificación	1-4500	Identifica cada una de las posiciones existentes en el almacén del edificio Storage Building.
Description	enum	Descripción	'Colocar Envío W66','Rack Automaticos para Apoyo','Sacar Rack Vacio de Apoyo','MM a Apoyo','TM a Apoyo','TA A Fixture','MA Fixture','Rack Vacio a Fixture','Sacar Rack Vacio de Apoyo T'	Acción que está realizando la carretilla.
Node	int	Localización en planta	1 - 1000	Localización en la planta en la que se requiere la acción.
Reference	varchar	Referencia	1 - 75	Nombre asignado de la referencia sobre la que se realiza la acción.
Priority	int	Prioridad	1 , -1	Todas las tareas de sacar rack de una posición tendrán prioridad y se les asigna el valor de '-1', al resto de tareas se les asigna un valor de 1.
State	enum	Estado de la acción	'to do', in progress', 'complete'	Estado de la acción, por hacer, en progreso o completada.

Visual Reality

Una vez modelada la planta, se le ha dado una visión real a los elementos que conforman el sistema. En esta capa se pueden distinguir 3 tipos de representaciones:

- La primera en introducirse es el *background*, que consiste en insertar el documento de CAD de la planta, las medidas del área, paredes y entradas entre otros, para iniciar la construcción del modelo sobre una base de medidas reales.
- La segunda se refiere a la representación de los elementos simples y compuestos (carretillas, estaciones, personal, material, caminos etc.). Por defecto, el software de simulación asigna a estos elementos una imagen general, pero con ayuda del *sketchup* se han insertado y creado objetos, aportando así una visión realista a la planta en cuestión. El *sketchup* es un software de modelado en 3D que permite tanto la descarga de objetos ya creados como el diseño y rediseño de otros.
- Finalmente, cuando se ha completado la construcción del modelo se introducen los elementos Andon. Estos son indicadores asociados principalmente a máquinas y alertar de problemas durante la producción. En este modelo, se asocian a los datos de gestión de la base de datos, para conocer la situación en cada momento, no solo de la maquinaria, sino de los elementos de la red.

Las figuras 6 y 7 representan el resultado ofrecido por el software al dar esta visión real a los elementos.

Figura 6. Representación visual del almacén SB y de las zonas de picking y línea de montaje. Fuente: Elaboración propia.

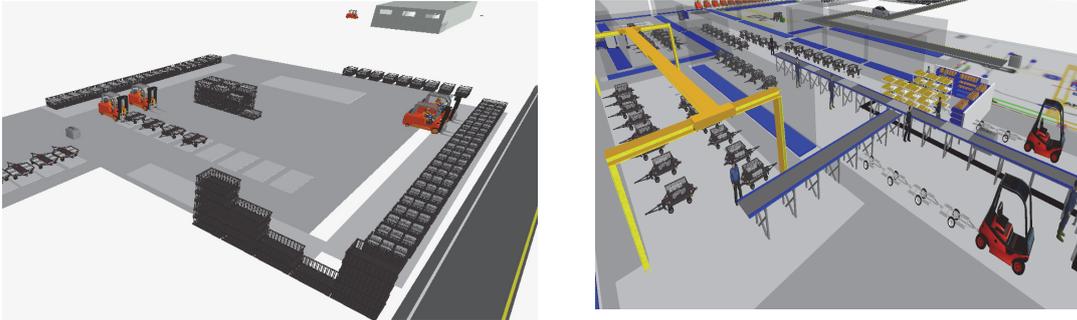
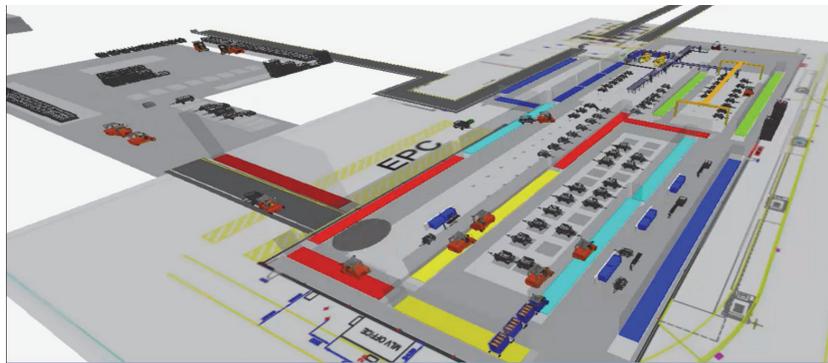


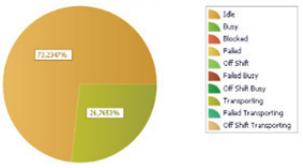
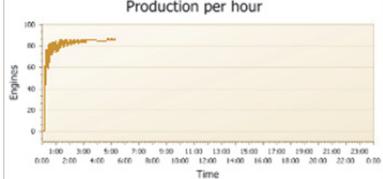
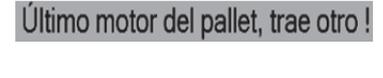
Figura 7. Representación de la planta de montaje completa, con la visualización del background, de los elementos simples, complejos y Andon. Fuente: Elaboración propia.



Los elementos Andon utilizados se han clasificado en 4 tipos: elementos para representar medibles, elementos Andon de maquinaria/medios de mantenimiento, elementos de la zona de control y los elementos visuales de comprobación. La siguiente tabla los describe en mayor detalle:

Tabla I. Clasificación y descripción de los elementos Andon utilizados. Fuente: Elaboración propia.

Imagen	Descripción	Ubicación
Representación de los medibles		
	Barras indicadoras. Los colores ayudan a identificar la situación de cada pasillo de manera visual.	Este tipo de indicadores se han colocado en cada uno de los pasillos por los que circulan los medios de mantenimiento
	Etiquetas que representan diferentes medibles.	Se han ubicado próximos al punto donde se miden, y también en una zona de control de múltiples elementos andon.

Maquinaria / medios de manutención		
	<p>Representación del tiempo dedicado por cada máquina a diferentes acciones, como el transporte, estar libre, estropeado etc. En este caso se encuentran asociados a cada uno de los medios de manutención.</p>	<p>Estas gráficas se encuentran agrupadas en la zona dedicada al control de elementos andon.</p>
Zona de control		
	<p>Etiquetas para controlar las posiciones de rack que están ocupadas y las disponibles.</p>	<p>Se han colocado en la zona de control, para visualizar el <i>market place</i>, <i>picking</i> y <i>buffer</i>.</p>
	<p>Gráficas de control de variables. Como la producción y el tiempo de ciclo de la línea.</p>	<p>Se han ubicado en la zona de control.</p>
	<p>Etiquetas con las acciones que realizan los carretilleros y los operarios (pizarra de tareas).</p>	<p>Estas etiquetas se encuentran en la zona de control de la simulación.</p>
Visuales de comprobación		
	<p>Este tipo de elementos como las colas de los elementos permiten ver cuántos motores/transmisiones quedan disponibles en cada rack.</p>	<p>Estos elementos se colocan en el punto de uso.</p>

Validación del modelo

Después de desarrollar un modelo de simulación, es necesario verificarlo y validarlo antes de plantear la experimentación y tomar decisiones en base a los resultados. Este proceso tiene por objetivo proporcionar información que ayude a los usuarios a aceptar o rechazar el modelo, ya que se asegura que lo modelado se corresponde con aquello que se desea construir y trabaja como se esperaba (Campuzano y Mula, 2011).

Este proceso se ha llevado a cabo durante todo el proceso del modelado y realizado de 4 maneras, depurando el código durante la construcción del modelo, mediante la triangulación de datos, a través de los elementos andon y la aprobación del cliente.

Depuración durante el modelado

Al haber desarrollado el modelo con una estructura modular, el código que maneja el comportamiento del sistema ha podido ser comprobado y depurado mientras era programado, corroborando así que su comportamiento se corresponde con el deseado. Este método de trabajo ha permitido focalizar los errores por secciones facilitando su resolución.

Triangulación de valores promedio

Para la validación y verificación se han enfrentado 3 resultados, (1) los datos reales, (2) los resultados de la simulación y (3) los valores estáticos calculados previamente. A partir de un programa de producción de producción dada, se ha estimado la cantidad de racks por referencia necesarios en cada sección. En base a ello y conociendo el flujo de materiales a lo largo de la planta y la proporción de manuales y automáticos se ha podido estimar los movimientos de carretillas por pasillos.

Un ejemplo de ello ha sido cómo se ha modificado la secuencia, de manera que solo se produjeran motores automáticos o manuales, y así poder estimar a priori estáticamente cuáles iban a ser los resultados obtenidos, como la producción, la ruta a seguir por las carretillas y el comportamiento de los operarios. Al comparar los resultados estáticos con los de la simulación se ha visto que el resultado era el esperado.

Elementos andon

Los elementos andon, como las etiquetas con el valor de determinadas variables, gráficos de la zona de control y los elementos visuales de comprobación, han ayudado a comprobar que el sistema trabajaba según lo esperado durante la simulación.

Un ejemplo serían los diferentes parámetros y mensajes de los carretilleros anotados en la base de datos, que han sido visualizados para comprobar que lo escrito en la “pizarra de los carretilleros” se correspondía con las acciones realizadas. Del mismo modo que la secuencia de montaje ha sido modificada en la base de datos para comprobar, de manera visual, que los racks eran retirados y rellenados correctamente.

Aprobación cliente

Conforme se ha ido avanzando en el proyecto, el cliente ha ido validando las decisiones e hipótesis tomadas, como tiempos de carga y descarga de los medios de manutención, *takt time* de la línea, tiempos y lote de fabricación de las *fixture cells*, capacidad *buffer* etc. La técnica de animación que incorpora el software ha servido para que el cliente verificara el flujo de los materiales propuesto.

Este tipo de maneras de realizar la validación mediante la triangulación, los elementos andon, la depuración y la comprobación del cliente, han permitido dar por válida la simulación, pudiendo asegurar el obtener resultados fiables en la experimentación.

Plan de experimentación

Una vez construido el modelo se ha decidido qué medibles van ser objeto de estudio durante la experimentación. Estos serán la producción diaria, la media y desviación típica de movimientos de carretillas por hora en los pasillos y el tiempo ocioso de las carretillas. La selección de las alternativas se hará en función de aquellas que ofrezcan un flujo de material más lógico y controlado entre secciones.

Para evaluar la nueva distribución se han propuesto los siguientes escenarios, donde se varía el programa de montaje modificando el parámetro ‘a’, lo que permite realizar un análisis de sensibilidad y ver cómo influye la calidad de la secuencia en el suministro de material.

- ABC (a=0) y 10% de la producción diaria serán motores automáticos.
- ABC (a=0) y 50% de la producción diaria serán motores automáticos.
- ABC (a=0.5) y 50% de la producción diaria serán motores automáticos.

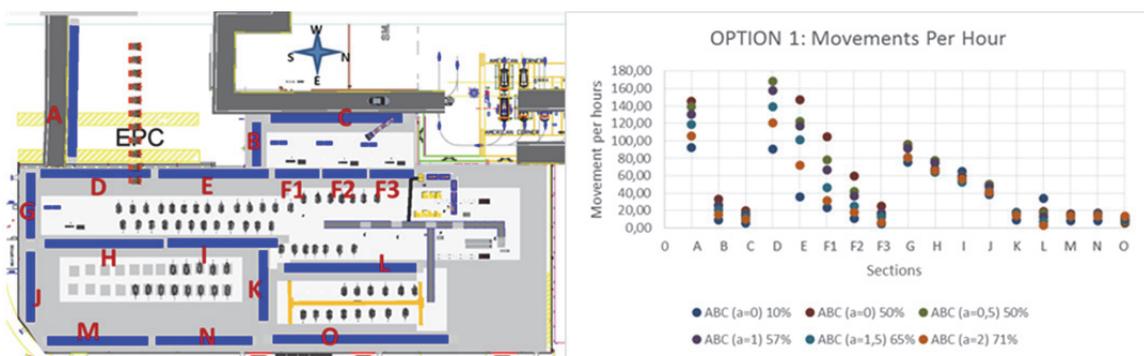
- ABC (a=1) y 57% de la producción diaria serán motores automáticos.
- ABC (a=1.5) y 65% de la producción diaria serán motores automáticos.
- ABC (a=2) y 71% de la producción diaria serán motores automáticos.

Resultados y alternativas

Una vez realizada la experimentación y analizado los resultados (figura 8), ha sido posible comprobar que el nuevo sistema propuesto es válido. El sistema puede alcanzar la producción deseada, siempre que la presencia de automáticos en la secuencia diaria no suponga más del 65% de la producción.

Durante la experimentación con el modelo, se han realizado modificaciones en este, al tener que añadir elementos compuestos tantas veces como ha sido necesario. Por ejemplo, las ubicaciones de almacén se han añadido según el cliente iba informando de la variedad de referencias a simular. Lo mismo ha ocurrido con las ubicaciones de las estaciones de *picking*. Por otra parte, el número de posiciones del *buffer* y del *market place* se han definido en función de las necesidades que se iban reconociendo al experimentar con el sistema. Inicialmente, se diseñó el *market place* únicamente con 10 posiciones, pero, más adelante, fue necesario añadir más localizaciones al resultar que esta sección, era un cuello de botella en el proceso de producción.

Figure 8. Resultados de la simulación: movimientos de carretillas por hora y pasillo. Fuente: Elaboración propia.



Además, el diseño del sistema de aprovisionamiento impide el acceso de FLT a la planta de montaje es viable, lo que permite cumplir la restricción de seguridad *Forklift Free Plant* en el EB. Sin embargo, al analizar el flujo de material se aprecia que el número de movimientos de TT entre algunas secciones es elevado.

También, se observa que algunas de las zonas tienen un mayor tránsito respecto a otras. Una vez evaluadas, se ha comprobado que gran parte de los movimientos se deben principalmente a movimientos en vacío de las carretillas y cruces entre secciones.

Estas conclusiones han llevado a plantear la necesidad de alternativas de *layout* y de estrategias de trabajo que podrían suavizar la cantidad de movimientos, así como mejorar la propuesta actual al conllevar un flujo de material más lógico, según Sly (1996) se deben conseguir movimientos cortos y controlados entre secciones, donde se intenta reducir el número de retrocesos, tipos de flujo y cruces entre ellos (tabla II y tabla III). Todas estas alternativas enfrentadas entre sí, hacen un total de aproximadamente 240 experi-

mentos. A su vez, cada uno de estos experimentos se va a enfrentar a los 6 escenarios iniciales donde se modificaba el mix de producción.

Tabla II: Modificaciones de layout.

1	Localización del EPC: La actual ubicación del EPC_1 (<i>Empty Rack Container</i>) se encuentra dentro del edificio SB, pero se va a probar a ubicarla en la parte exterior este de la planta de EB tanto este como el EPC_2.
2	Localización de las <i>Fixture Cells</i> : Las celdas se encuentran en la parte oeste del edificio de EB, moverlo a la parte este, debajo del buffer de motores automáticos sería otra opción, reduciendo así el movimiento de racks automáticos en el pasillo D y creando un flujo más lógico.
3	Localización del parking node de los TT: La actual localización de las carretillas cuando se encuentran ociosas en la parte oeste del <i>picking</i> de motores. La opción de desplazarlo a una zona menos atravesada ayudaría a distribuir mejor los movimientos por la planta.

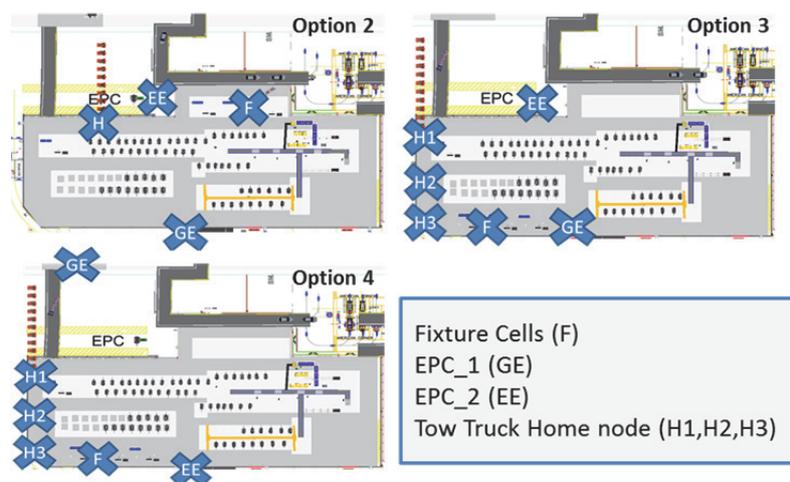
Tabla III: Modificaciones en la gestión de la planta.

5	Estado del picking de motores: Una alternativa interesante sería la de mantener en esta sección más de un rack de aquellas referencias de mayor presencia, pudiendo estar el picking lleno o no lleno.
6	Número de TT: La cantidad de TT recomendadas para realizar las operaciones se estimará evaluando los resultados.

Resultados, percepciones y recomendaciones de las alternativas

Una vez obtenidos los resultados de los experimentos se han unificado en una tabla dinámica, para poder detectar qué alternativas propuestas no proporcionan ningún beneficio respecto a la situación inicial, y por el contrario cuáles se deben de considerar en la toma de decisiones. Finalmente, se han proponen 3 opciones (figura 9), que destacan respecto del resto, además de la propuesta inicial, las cuales se han recomendado al cliente como futuros cambios.

Figura 9. Opciones de layout seleccionadas finalmente. Fuente: Elaboración propia.



En función de los resultados de los experimentos anteriores (figuras 10 y 11), donde se muestran los movimientos por pasillo se ha podido analizar el flujo de materiales de las alternativas, y percibir y recomendar al cliente:

- Que la estación de *picking* de motores tenga más de una ubicación por referencia no afecta a los resultados, de manera que implementarla no reduciría los movimientos entre secciones.
- El EPC_2 se recomienda colocar en un punto próximo a las *fixture cells*, para así evitar movimiento de vacíos innecesarios a lo largo de la planta (opciones 3 y 4).
- Ubicar las *Fixture cells* en la parte este proporciona un flujo de motores automáticos más lógico. Directamente desde la celda se puede abastecer al *buffer*, y de ahí a *picking*. De este modo se evita tener que atravesar pasillos centrales con mayor flujo realizando movimientos evitables. Esta propuesta resultaría todavía más beneficiosa si las ubicaciones de los motores automáticos en la zona de *picking* se ubicaran en el lado este (opciones 3 y 4).
- Los resultados de la opción 1 y 4 muestran que una de las grandes congestiones de la planta se encuentran en el pasillo A, el cual conecta ambas plantas. Esto se debe principalmente a los movimientos generados por el retorno de vacíos desde la planta a EPC_1.
- Otro flujo de material que genera gran parte de los movimientos es el aprovisionamiento a las *fixture cells*. Si se localizarán en el este, según muestra la gráfica 3 y 4, el pasillo oeste (D, E, F) pasaría de estar altamente congestionado a no estarlo, a expensas de saturar el pasillo G.
- La ubicación de los home node de los TT afecta a la saturación de los pasillos G y J. Esto se debe principalmente a las idas y venidas en vacío hasta este nodo, cuando este se encuentra ocioso.

Figura 10. Comparación de los movimientos por hora y pasillo de las opciones seleccionadas. Fuente: Elaboración propia.

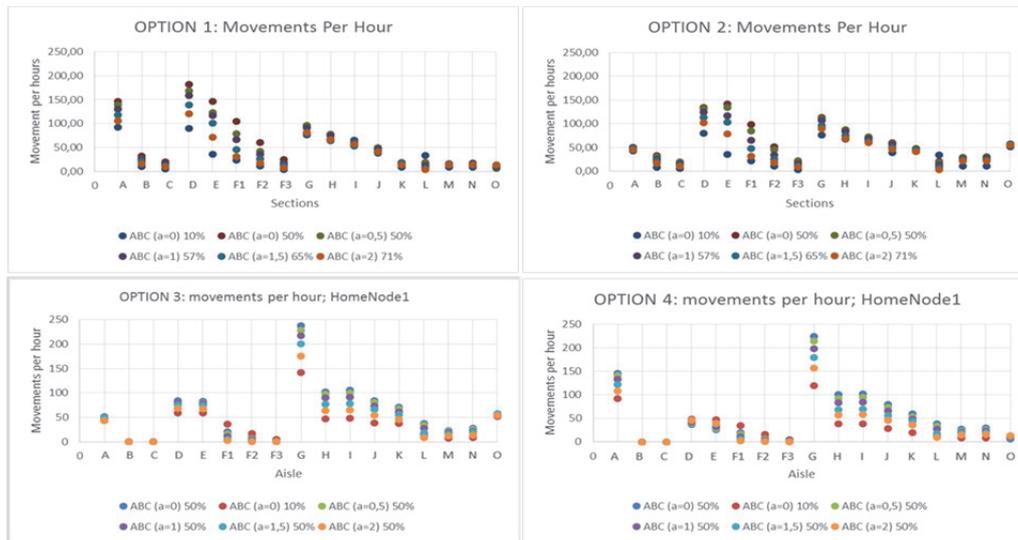
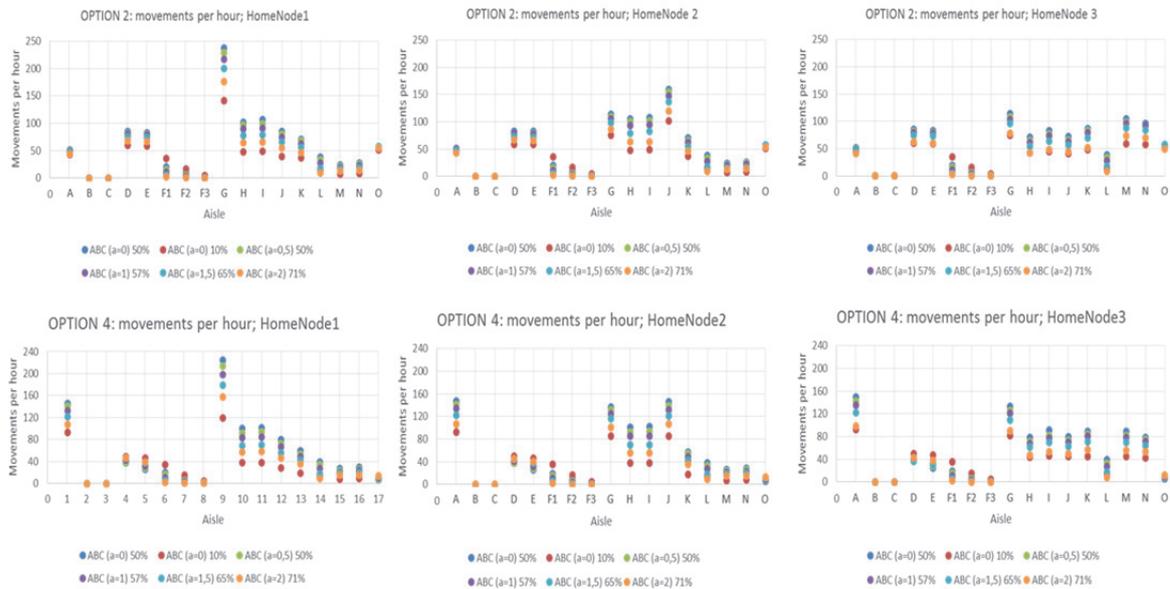


Figura 11. Comparación de los movimientos por hora y pasillo entre opciones 2 y 4. Fuente: Elaboración propia.



Conclusiones

En este documento se ha desarrollado un modelo de simulación flexible que permite dar apoyo en la toma de decisiones durante el rediseño de una planta de montaje. El modelo utilizado se ha desarrollado para implementarse en una planta de montaje de motores y transmisiones, en el que se reciben motores fabricados y montados (García-Sabater, Maheut, y García-Sabater, 2012) y se ensamblan con transmisiones que vienen de otros proveedores.

La construcción del modelo se ha enfocado como un sistema de 4 capas (*network, logic, database y visual reality*), basado en la metodología de simulación propuesta en Sáez Más et al. (2016), Gracias al modelo de simulación ha sido posible:

- Analizar la propuesta inicial de *layout* e identificar qué cambios en la distribución en planta y en la lógica de trabajo de la propuesta inicial serían más aconsejables desde el punto de vista de las operaciones y el flujo de materiales.
- Integrar dos sistemas dinámicos complejos, el sistema de producción y el manejo y flujo de materiales en un único modelo de simulación, para un mejor análisis gracias a la arquitectura de simulación de 4 capas utilizado.
- Permitir que el crecimiento del modelo general sea mucho más modular al estar desconectados entre sí los submodelos creados.
- Este esquema de diseño ha permitido un ahorro de tiempo considerable al no tener que realizar diferentes modelos de simulación para cada alternativa y escenario.
- Entender y analizar en profundidad un entorno productivo complejo que escapaba incluso a los *owners*. Se ha podido percibir problemas que de otro modo se hubieran pasado por alto.

Una vez alcanzados los objetivos se ha podido recomendar al cliente acerca de qué cambios, de los evaluados en las alternativas, serían recomendables para su implantación. También gracias al modelo se podrá comprobar el efecto que tendrán otras propuestas del cliente tanto ahora como en un futuro próximo.

Pero las conclusiones del trabajo se pueden plantear en dos niveles. Por un lado, la simulación ha permitido explorar alternativas para el caso estudiado, y de dichas alternativas se pueden extraer algunas conclusiones útiles para los clientes del modelo como ya ha sido argumentado. Pero, en un nivel más general, este caso ha permitido validar la metodología utilizada, y además ha permitido exponer un procedimiento estructurado para describir el modelo cuyo uso se puede proponer en casos similares.

Se puede concluir el documento afirmando que la simulación ha resultado ser una herramienta muy completa y satisfactoria en la realización de proyectos de rediseño de *layout* y de procesos. Esta construcción de modelos flexibles se puede aplicar al estudio de escenarios de planificación, distribución en planta y control de operaciones para apoyar la toma de decisiones.

En trabajos futuros se debiera utilizar el mismo esquema para ayudar a definir una metodología de descripción de modelos que pueda ser utilizada de manera genérica, reduciendo tanto el esfuerzo en el desarrollo de la descripción como el de interpretación de los modelos.

Referencias

- Agnētis, A., Pacifici, A., Rossi, F., Lucertini, M., Nicoletti, S., Nicolò, F., ... Pesaro, E. (1997). Scheduling of flexible flow lines in an automobile assembly plant. *European Journal of Operational Research*, 97(2), 348–362. [http://doi.org/10.1016/S0377-2217\(96\)00203-2](http://doi.org/10.1016/S0377-2217(96)00203-2)
- Banks, J.; Carson, J. S.; Nelson, B.; Nicol, D. (2004). *Discrete-Event System Simulation*. (4th ed.). Prentice Hall in an imprint of Pearson. <http://doi.org/10.2307/1268124>
- Bauters, K., Govaert, T., Limère, V., y Landeghem, H. Van. (2015). Forklift Free Factory : a simulation model to evaluate different transportation systems in the automotive industry. *International Journal of Computer Aided Engineering and Technology*, 7(2), 238–259. <http://doi.org/10.1504/ijcaet.2015.068329>
- Bennett, B. S. (1995). *Simulation fundamentals*. Prentice Hall International, Hertfordshire (UK) Ltd.
- Campuzano, F., y Mula, J. (2011). *Supply Chain Simulation: A System Dynamics Approach for Improving Performance*. Springer Science & Business Media. <http://doi.org/10.1007/978-0-85729-719-8>
- Chan, F. T. S., y Chan, H. K. (2005). Design of a PCB plant with expert system and simulation approach. *Expert Systems with Applications*, 28(3), 409–423. <http://doi.org/10.1016/j.eswa.2004.12.002>
- Cottyn, J., Govaert, T., y Van Landeghem, H. (2008). Alternative line delivery strategies support: A forklift free transition in a high product variety environment. En *11th International Workshop on Harbor Maritime Multimodal Logistics Modeling and Simulation (HMS 2008)* (pp. 55-60). DIPTIM University.
- Dias, L. M. S., Pereira, G. A. B., Vik, P., y Oliveira, J. A. (2014). Layout and process optimisation: using computer-aided design (CAD) and simulation through an integrated systems design tool. *International Journal of Simulation and Process Modelling*, 9(1), 46–62. <http://doi.org/10.1504/IJSPM.2014.061437>
- García-Sabater, J. P., Maheut, J., y García-Sabater, J. J. (2012). A two-stage sequential planning scheme for integrated operations planning and scheduling system using MILP: The case of an engine

Assembly plant simulation to support decision-making on Layout Design considering safety issues. A case study.
Sáez Más, A.; García Sabater, J.P.; Morant Llorca, J. y Maheut, J.

assembler. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 24(2), 171–209.
<http://doi.org/10.1007/s10696-011-9126-z>

García-Sabater, J. P., Maheut, J., y García-Sabater, J. J. (2009). A decision support system for aggregate production planning based on MILP: A case study from the automotive industry. *2009 International Conference on Computers and Industrial Engineering, CIE 2009*, 366–371.
<http://doi.org/10.1109/iccie.2009.5223630>

Govaert, T. (2011). *The feasibility of a Forklift Free Factory: a simulation model in the automotive industry* (Tesina de máster). Recuperado de http://lib.ugent.be/fulltxt/RUG01/001/805/537/RUG01-001805537_2012_0001_AC.pdf. Recuperado el 10-07-2016.

Longo, F., Mirabelli, G., y Papoff, E. (2006). Material Flow Analysis and Plant Lay-Out Optimization of a Manufacturing System. En *International Scientific Journal of Computing*, 5(1), 107–116.
<http://doi.org/10.1109/IDAACS.2005.283081>

Maheut, J., Morant Llorca, J., y García-Sabater, J. P. (2015). Estudio de la configuración productiva de una planta de pre-montaje de unidades aplicando parámetros de presencia máxima de opciones, *Working Papers on Operations Management*, 6(1), 1–21. <http://doi.org/10.4995/wpom.v6i1.3408>

MHI. (2016). Material Handling Industry: Glossary. Recuperado de <http://www.mhi.org/glossary?q=warehouse+management+systemypb=1yfq=ysort=score+desc>. Recuperado el 17-03-2016.

Michalos, G., Makris, S., y Mourtzis, D. (2012). An intelligent search algorithm-based method to derive assembly line design alternatives. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 25(3), 211-229. <http://doi.org/10.1080/0951192x.2011.627949>

Negahban, A., y Smith, J. S. (2014). Simulation for manufacturing system design and operation: Literature review and analysis. *Journal of Manufacturing Systems*, 33(2), 241–261.
<http://doi.org/10.1016/j.jmsy.2013.12.007>

Sáez Más, A., García Sabater, J. P., Morant Llorca, J., y Maheut, J. (2016). Data-driven simulation methodology using DES 4-layer architecture. *Working Papers on Operations Management*, 7(1), 22-30. <http://doi.org/10.4995/wpom.v7i1.4727>

Sly, D., Grajo, E., y Montreuil, y B. (1996). Layout design and analysis software. *IIE Solutions*, 28(7), 18-25.

Sly, D. P. (1996). A systematic approach to factory layout and design with FactoryPLAN, FactoryOPT, and FactoryFLOW. En *Proceedings of the 28th conference on Winter simulation* (pp. 584-587). IEEE Computer Society.

Tjahjono, B., y Fernández, R. (2008). Practical approach to experimentation in simulation study. En *Proceedings of the 40th Conference on Winter Simulation* (pp. 1981-1988). Winter Simulation Conference. <http://doi.org/10.1109/wsc.2008.4736292>