



UNIVERSIDADE DA CORUÑA



Escola Politécnica Superior

Trabajo Fin de Grado
CURSO 2016/17

*SIMULACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE UNA LÍNEA DE
EMBALAJE DE KITS*

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

ALUMNA

Marina Fernández Fernández-Campoamor

TUTOR

Dr. Diego Crespo Pereira

FECHA

JULIO 2017

TÍTULO Y RESUMEN

Simulación y optimización de una línea de embalaje de kits

En este trabajo se recoge el estudio y simulación de una línea de embalaje manual y el planteamiento de mejoras de diversa índole. Para la consecución del fin, se realiza una revisión bibliográfica sobre las tecnologías de simulación y automatización propias de la cuarta revolución industrial y los sistemas automáticos habituales en este tipo de líneas. A continuación, se recoge la metodología utilizada para el estudio de los parámetros fundamentales que caracterizan una línea de carácter manual y con una alta variabilidad en productos y demanda; y la creación de un modelo paramétrico utilizando el software de simulación de eventos discretos *Flexsim*, validado con los datos reales del caso a estudiar. Sobre esta simulación, se estudia la implementación de mejoras tanto en el aspecto organizativo como en el propio funcionamiento de la planta como es la introducción de robots y sistemas automáticos de alimentación de palés. El trabajo busca ofrecer un *input* para posibles etapas de diseño posteriores de las soluciones planteadas.

Simulación e optimización dunha liña de embalaje de kits

Neste traballo recóllese o estudo e simulación dunha liña de embalaxe manual e a formulación de melloras de diversa índole. Para a consecución do fin, realízase una revisión bibliográfica sobre as tecnoloxías de simulación e automatización propias da cuarta revolución industrial e os sistemas automáticos habituais neste tipo de liñas. A continuación, recóllese a metodoloxía utilizada para o estudo dos parámetros fundamentais que caracterizan unha liña de carácter manual cunha alta variabilidade en produtos e demanda, e a creación dun modelo paramétrico utilizando o software de simulación de eventos discretos *Flexsim*, validando cos datos reais do caso a estudar. Sobre esta simulación, estúdase a implementación de melloras tanto no aspecto organizativo como no propio funcionamento da planta como é a introdución de robots e sistemas automáticos de alimentación de palés. O traballo busca ofrecer un *input* para posibles etapas de deseño posteriores das solucións formuladas. .

Simulation and optimization of a kits packaging line

This bachelor thesis deals with the study and simulation of a manual packaging line and the proposal of various improvements. In order to achieve this goal, a bibliographic review was conducted to understand the technologies of simulation and robotics under the current industrial revolution and to research the most common automatic systems applied in this type of lines. Next, it is shown the methodology adopted to study the fundamental parameters that define a manual line with a high variability in products and demand and the development of a parametric model using the event-discrete simulation software *Flexsim*. This model is later validated with real data from the case study. Starting from the base model, it will be analyzed the implementation of improvement measures in the organizational aspect as well as in the own factory process such the introduction of robots and automatic pallet handling systems. The paper seeks to offer an *input* to possible future design phases of the proposed solutions.



UNIVERSIDADE DA CORUÑA



Escola Politécnica Superior

**TRABAJO FIN DE GRADO
CURSO 2016/17**

*SIMULACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE UNA LÍNEA DE
EMBALAJE DE KITS*

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

Documento

MEMORIA

Índice

TÍTULO Y RESUMEN.....	2
1 INTRODUCCIÓN.....	8
2 OBJETIVOS.....	9
3 ANTECEDENTES.....	10
3.1 Procesos de empaquetado de kits en la industria.....	10
3.2 Industria 4.0.....	14
3.3 Simulación de procesos industriales y sus tecnologías.....	16
3.4 Robótica aplicada a la industria.....	20
4 METODOLOGÍA.....	23
4.1 Descripción del proceso.....	23
4.2 Análisis de datos.....	24
4.2.1 Estudio de componentes.....	25
4.2.2 Estudio de órdenes de fabricación y lotes.....	26
4.3 Desarrollo del modelo.....	27
4.3.1 Generación OF.....	33
4.3.2 Operarios.....	40
5 SIMULACIÓN DE ESCENARIOS.....	45
5.1 Muestra de datos.....	45
5.2 Empaquetado manual.....	48
5.2.1 Validación del modelo base.....	48
5.2.2 Algoritmo de secuenciación de órdenes de fabricación.....	49
5.3 Automatización de la línea.....	50
5.3.1 Solución automatizada: Cobots vs. Robots industriales.....	51
5.3.2 Modelos.....	51
5.3.2.1 Modelo robótico con alimentación actual.....	51
5.3.2.2 Modelo robótico con alimentación actual.....	54
5.3.3 Experimentación.....	57
5.3.3.1 Estudio de la alimentación de la línea.....	57
5.3.3.2 Estudio de la preparación de kits.....	58
6 CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO.....	71
6.1 CONCLUSIONES.....	71
6.2 TRABAJO FUTURO.....	72
7 BIBLIOGRAFÍA.....	73

Índice de figuras

Figura 1: Ejemplo de una máquina de apertura de cajas (SOCO System [sin fecha])	11
Figura 2: Paletizadora KUKA en INTERMARCHÉ (ULMA Handling Systems 2016).....	11
Figura 3: Sellador de cajas. (SOCO System [sin fecha])	12
Figura 4: Enfardadora automática de palés (ULMA Handling Systems 2016).....	12
Figura 5: Ejemplo de manejo de sistema que emplea carretillas elevadoras en conjunto con un shuttle (MECALUX ESMENA 2016)	13
Figura 6: Ejemplo de Automated Storage & Retrieval – ASRS (MECALUX ESMENA 2016) .	13
Figura 7: AGVs en un centro de distribución de Amazon (Amazon 2017).....	14
Figura 8: Evolución histórica de la simulación	17
Figura 9: Número de publicaciones relacionadas con la simulación. Elaboración propia	17
Figura 10: Pasos en la simulación de eventos discretos. (Banks, Jerry, Carson, Jhon S., Nelson, Barry L., Nicol 2005).....	19
Figura 11: Parámetros de diseño de la línea a partir del análisis de datos. Elaboración propia	27
Figura 12: Ejemplos de los elementos preprogramados en Flexsim	28
Figura 13: Ejemplo de un Processflow de una cola de clientes	29
Figura 14: Diagrama de flujo del proceso de colocación de piezas en la línea y las tareas de las carretillas. Elaboración propia utilizando Microsoft Visio.....	29
Figura 15: Perspectiva del modelo en 3D. Elaboración propia.	31
Figura 16: Elementos utilizados en el modelo 3D. Elaboración propia.	32
Figura 17: Distribución en planta de la línea. Elaboración propia.	32
Figura 18: Vista en detalle de la línea. Elaboración propia	33
Figura 19: <i>PF</i> : Inicio de las dos primeras órdenes de fabricación. Elaboración propia.....	34
Figura 20: <i>PF</i> : Lectura de datos y relleno de las tablas pertinentes. Elaboración propia. .	34
Figura 21: Campos incluidos en la tabla de “Listado OF”. Elaboración propia.	34
Figura 22: Campos incluidos en la tabla de “Componentes”. Elaboración propia.....	35
Figura 23: <i>PF</i> : Generación de palés para cada orden de fabricación. Elaboración propia. ...	36
Figura 24: <i>PF</i> : Colocación de cajas. Elaboración propia.	37
Figura 25: <i>PF</i> : Gestión de las tareas de las carretillas. Elaboración propia.....	38
Figura 26: <i>PF</i> : Algoritmo de desbloqueo. Elaboración propia.....	39
Figura 27: <i>PF</i> : Gestión de recogida de palés. Elaboración propia.....	39
Figura 28: <i>PF</i> : Simulación de parada de la línea y la carga de trabajo extra de las carretillas. Elaboración propia.....	40
Figura 29: Interfaz de cambio de propiedades del Travel del operario. Elaboración propia. .	41
Figura 30: Colocación de los operarios en la línea. Elaboración propia.	41
Figura 31: Código relativo al cálculo de la componente Y del destino del operador. Elaboración propia.....	42

Figura 32: PF: Lógica de colocación de cajas por parte de los operarios y expulsión de palés	42
Figura 33: Para de la línea por retraso en la colocación de piezas	43
Figura 34: Modelo conceptual de la interfaz gráfica de usuario para la selección de los parámetros de configuración de los escenarios propuestos para este trabajo. Elaboración propia.	44
Figura 35: Gráfico de dispersión de las combinaciones de dimensiones XY de los componentes de la muestra. Elaboración propia.....	45
Figura 36: Histograma del número de componentes diferentes por kit. Elaboración propia. .	46
Figura 37: Histograma del número de componentes totales por kit. Elaboración propia.	46
Figura 38: Histograma de los lotes con distribución exponencial y media 40. Elaboración propia.	47
Figura 39: Histograma de los lotes con distribución exponencial y media 100. Elaboración propia.	47
Figura 40: Imagen del robot predefinido en Flexsim. Elaboración propia.	51
Figura 41: Vista general de la planta del modelo con alimentación actual. Elaboración propia.	52
Figura 42: Vista en alzado de la línea. Elaboración propia.	52
Figura 43: PF: Lógica de los robots. Elaboración propia.	53
Figura 44: Ejemplo de shuttle que reuniría las características necesarias para esta línea. (Yaskawa UK 2011).....	54
Figura 45: Imagen de un TaskExecuter. Elaboración propia.	54
Figura 46: Vista general de la planta del modelo utilizando 2 shuttle. Elaboración propia. ...	55
Figura 47: Vista en alzado del modelo utilizando shuttle. Elaboración propia.	55
Figura 48: PF: Lógica de transporte de palés a la línea por parte del shuttle. Elaboración propia.	56
Figura 49: Gestión de la descarga de palés por parte de los shuttle. Elaboración propia. ...	56
Figura 50: Gestión de la descarga por parte de las carretillas y asignación de destino. Elaboración propia.....	57
Figura 51: Ejemplo de manipulador que permite colocar cuatro piezas simultáneamente. (Yaskawa UK 2011).....	59
Figura 52: Variación de la tasa de producción de para el escenario con robots y alimentación sin shuttle con una única carretilla. Elaboración propia.	67
Figura 53: Variación de la tasa de producción de para el escenario con robots y alimentación sin shuttle con dos carretillas. Elaboración propia.	67
Figura 54: Variación de la tasa de producción de para el escenario con robots y alimentación con shuttle con una única carretilla. Elaboración propia.....	68
Figura 55: Variación de la tasa de producción de para el escenario con robots y alimentación con 2 shuttles con dos carretillas. Elaboración propia.	68

Índice de tablas

Tabla 1: Clasificación de la simulación	18
Tabla 2: Tabla comparativa entre LBR iiwa y KR Cybertech de KUKA. Elaboración propia	21
Tabla 3: Escenarios simulados y total de la producción simulada.....	47
Tabla 4: Tasas de producción por hora para cada escenario y réplica. Elaboración propia.	48
Tabla 5: Tabla comparativa entre la tasa promedio obtenida en la simulación y la tasa real del día simulado. Elaboración propia.	48
Tabla 6: Tasas de ocupación de la carretillas y tasa de bloqueo de la línea para los 4 escenarios propuestos. Elaboración propia.	49
Tabla 7: Datos producción utilizando el algoritmo de secuenciación	50
Tabla 8: Porcentaje de mejora respecto al modelo base.....	50
Tabla 9: Tasas de producción de kits por hora en el estudio de la alimentación de la línea.....	58
Tabla 10: Tasas de producción por hora para el escenario con robots y alimentación actual mediante una carretilla. Elaboración propia.	61
Tabla 11: Tasas de producción por hora para el escenario con robots y alimentación actual mediante dos carretillas. Elaboración propia.	62
Tabla 12: Porcentaje relativo de diferencia entre las tasas de producción por hora para el escenario con robots y alimentación actual mediante una y dos carretillas. Elaboración propia.	63
Tabla 13 Tasas de producción por hora para el escenario con robots y alimentación mediante un shuttle y una carretilla. Elaboración propia.....	64
Tabla 14: Tasas de producción por hora para el escenario con robots y alimentación mediante dos shuttles y dos carretilla. Elaboración propia.	65
Tabla 15: Porcentaje relativo de diferencia entre las tasas de producción por hora para el escenario con robots y alimentación actual mediante shuttle y carretillas. Elaboración propia	66
Tabla 16: Porcentaje de mejora en la tasa de producción por hora en el escenario sin shuttle respecto al modelo base sin secuenciar. Elaboración propia.....	69
Tabla 17: Porcentaje de mejora en la tasa de producción por hora en el escenario con shuttle respecto al modelo base sin secuenciar. Elaboración propia.....	70

1 INTRODUCCIÓN

Realizar cambios en una línea de producción en funcionamiento y sometida a grandes volúmenes de demanda es una decisión que conlleva importantes riesgos para la empresa que decida asumir la inversión. Si los cambios no conducen a una mejora significativa de la productividad o surgen problemas inesperados que originen paradas de la línea, los daños económicos pueden ser sustanciales y llegar a comprometer la imagen y la viabilidad de una empresa. Por ello, y sobre todo cuando se plantean cambios profundos en los medios de producción empleados, es fundamental contar con herramientas que ayuden a acotar la incertidumbre, predecir el impacto de las acciones propuestas y poder tomar una decisión minimizando riesgos.

Este trabajo se centra en la problemática de las operaciones de empaquetamiento en la industria. Este tipo de procesos, pese a los avances en automatización y robótica, siguen siendo bastante manuales en algunos sectores, sobre todo cuando se trata de entornos muy variables y con gran diversidad en los productos empaquetados. Dentro de la cadena logística de una empresa, estas operaciones se sitúan en los últimos eslabones antes del envío al cliente final y, por ello, tienen una repercusión muy destacable sobre las condiciones de plazos de entrega que se pueden ofertar y los tamaños de pedidos que se pueden asumir. La tendencia en el mercado pasa en muchos casos por ser capaz de dar respuesta a plazos muy cortos de entrega con tamaños de pedido pequeños manteniendo la competitividad en costes, y esto constituye un auténtico reto desde el punto de vista del diseño de este tipo de sistemas.

En el contexto de la industria 4.0, se destaca el empleo de tecnologías de simulación y la automatización, facilitada especialmente por los últimos avances en el campo de la robótica, para dar respuesta a las necesidades crecientes de la industria de incrementar la productividad, flexibilidad y adaptabilidad de los sistemas de producción.

Este trabajo presenta un ejemplo innovador de cómo combinar ambas aproximaciones en la resolución de un problema real de la industria. Mediante el uso de la simulación de eventos discretos, se plantea un caso práctico de una línea de empaquetado de kits sobre la que se estudian tanto mejoras inmediatas que no requieren inversiones, actuando exclusivamente sobre aspectos organizativos, como la introducción de robots y una mayor automatización del proceso. Este trabajo describe la metodología llevada a cabo en un estudio real en el que se ha basado y presenta resultados para un escenario sintético configurado a partir de datos reales con el fin de demostrar el potencial de mejora y la información clave que proporciona para lograr la optimización del proceso.

A lo largo de esta memoria se presentan en primer lugar los objetivos específicos del trabajo. A continuación, se realiza una revisión de los antecedentes sobre los procesos de empaquetado, la industria 4.0, la simulación y la robótica. Posteriormente se presenta la descripción del proceso estudiado y el desarrollo de un modelo de simulación en el software de Flexsim. Por último, se describe la experimentación llevada a cabo con el modelo, las mejoras analizadas y los resultados con las conclusiones que se derivan de ellos.

2 OBJETIVOS

Este trabajo de fin de grado plantea dos objetivos principales de estudio. En primer lugar, se plantea el análisis mediante simulación de una línea de embalaje manual. El objetivo principal es la obtención de un modelo paramétrico que pudiese ser empleado para estudiar distintas configuraciones de línea y productos empaquetados. El modelo será implementado en el software de simulación 3D de eventos discretos Flexsim y será empleado para evaluar mejoras sobre una línea bajo un escenario de condiciones adversas de alta variabilidad en productos, componentes y tamaños de lote.

Por otro lado, como segundo objetivo, tras el previo análisis de los resultados obtenidos y el conocimiento de los sistemas modernos de manejo de material en la industria, se plantea el análisis de diferentes propuestas de mejora mediante una mayor automatización del proceso. En este sentido, el principal reto que afronta este proyecto es determinar el efecto que tiene la variabilidad en las características de productos y la demanda tienen sobre capacidad de producción de la línea automatizada. Por ello, se realizará un análisis de sensibilidad a los parámetros básicos de diseño del nuevo proceso de las tasas de producción alcanzables bajo distintos escenarios y configuraciones. Esta información ha de servir como base para guiar posteriores trabajos de automatización del proceso, proporcionando datos que ayuden a determinar los requerimientos del sistema necesarios para lograr los objetivos de producción que se fijen.

En particular, se estudiarán opciones desde la posibilidad de incluir robots colaborativos, una tendencia creciente en el mundo de la robótica industrial, hasta diferentes mecanismos de abastecimiento del material en la línea y la utilización de robótica convencional.

3 ANTECEDENTES

Este trabajo se centra en el estudio de líneas de empaquetado y preparación de pedidos en la industria empleando metodologías de modelado y simulación como medio para lograr la optimización de este tipo de sistemas. En primer lugar, se realizará un pequeño estudio sobre la presencia de este tipo de líneas en múltiples sectores industriales. En segundo lugar, se introducirá el concepto de Industria 4.0. con los dos aspectos de dicha industria utilizados en el trabajo: las tecnologías de simulación y la robótica aplicada a la industria.

3.1 Procesos de empaquetado de kits en la industria

En la industria existen diferentes métodos de empaquetado y de preparación de pedidos tanto por la existente variabilidad en formas y materiales como en los elementos que son empaquetados. En este trabajo definiremos “*kit*” como el conjunto de elementos que se empaquetan juntos, normalmente dentro de una caja de cartón.

Dentro de las empresas, a medida que éstas buscan reducir costes y mejorar la productividad en sus almacenes, la preparación de pedidos o “*picking*” ha cobrado una gran importancia ya que se estima que su coste asciende al 55% de los gastos de operación de un almacén. Lograr dar respuesta a los pedidos de los clientes en plazos cortos de entrega y con tamaños de pedido en ocasiones muy reducidos representa un gran reto desde el punto de vista de la logística interna y constituye un factor clave de competitividad.

Se conoce como *picking* o preparación de pedidos al proceso de agrupar y programar los pedidos de los clientes, asignar el stock necesario en la localización adecuada para las líneas de colocación, enviar las órdenes de pedidos a la planta, recoger los artículos del almacén y la colocación de los artículos seleccionados (De Koster, Le-duc y Roodbergen 2007). Existen diversos sistemas de preparación de pedidos dependiendo de si se utilizan trabajadores o sistemas automatizados. Dentro del primer grupo encontramos tres categorías (De Koster 2008):

- *Picker-to-parts*: el empleado o *picker* se desplaza hasta el punto donde se encuentran las piezas.
- *Parts-to-picker*: mediante un medio de transporte, se desplazan las piezas hasta el *picker* y éste es el responsable de coger el número adecuado de piezas.
- *Putsystem*: combina los dos sistemas. Primero el inventario debe ser descargado del almacén de uno de los modos mencionados anteriormente. Después, el elemento que contiene el inventario se coloca alcance del *picker* para que éste distribuya las partes en función de los pedidos del cliente.

Entre los sistemas de producción que utilizan el *picking* o que empaquetan productos para satisfacer los pedidos de los clientes, encontramos desde lo más tradicional, realizado de forma manual, hasta sistemas novedosos totalmente automatizados. Sin embargo, incluso en el modo manual se han extendido innovaciones tales como la lectura de inventario por RFID o el llamado “*picking por voz*” que consiste en que el propio sistema indica al operario, a través de unos auriculares, qué elemento debe coger y dónde colocarlo, lo cual presenta una ventaja respecto al hecho de sujetar una PDA o un set de instrucciones, pues permite que el trabajador mantenga las manos libres.

El diseño de sistemas de *picking* tanto si es automatizado como manual o una combinación de las dos es complejo pues influyen múltiples factores como pueden ser la demanda del cliente, el proveedor, la gestión del almacén y sus niveles de inventario, las

características del material a manejar... (Goetschalckx y Ashayeri 1989). La automatización completa de estos sistemas presenta una gran dificultad, sobre todo a medida que aumenta la variabilidad en los productos empaquetados, y por ello se encuentran muchos ejemplos en la industria donde estas tareas se siguen realizando de forma manual o semi-manual.

Un elemento común a la mayoría de sistemas es la forma en la que el material se manipula. Las piezas o elementos a empaquetar llegan a la zona de empaquetado donde se sitúa una caja o contenedor preparado para albergar dichos componentes. A continuación o bien se introducen los elementos en la caja o bien la caja está preparada para cerrarse alrededor de los elementos. En cualquier caso, en un paso posterior la caja deberá ser cerrada y paletizada¹. Por ilustrar al lector sobre los diferentes mecanismos utilizados en la industria se adjuntan algunas imágenes obtenidas de casas comerciales como ejemplo de automatización de este tipo de procesos en la Figura 1.



Figura 1: Ejemplo de una máquina de apertura de cajas (SOCO System [sin fecha])



Figura 2: Paletizadora KUKA en INTERMARCHÉ (ULMA Handling Systems 2016)

La llegada y apertura de la caja la puede realizar una máquina como se ve en la Figura 1, o conformarse en el momento, partiendo de una plancha de cartón y adquiriendo la forma adecuada en el momento mediante una “dobladora”. Al continuar por la línea, para que la caja mantenga la forma, se suele acondicionar la misma para tal fin.

¹ Paletizar: acción y efecto de disponer mercancía sobre un palé para su transporte y almacenaje.

A continuación, los operarios o robots colocan las piezas que dependiendo del sector, pueden presentar tipologías, formas y pesos muy variados: botellas, bolsas, tableros, tetrabricks... En ocasiones, el llenado de los recipientes se hace elemento a elemento o, cuando el producto lo permite, se realiza en bloque. (Figura 2).

Una vez completado el paquete, se procede a sellar la caja. De nuevo este proceso puede ser manual o automáticamente. (Figura 3).



Figura 3: Sellador de cajas. (SOCO System [sin fecha])

Mientras que en la fase de llenado se pueden utilizar robots colaborativos, o *cobots* para abreviar, en la fase de paletización, se suele optar por robots industriales “tradicionales” de más alcance y que puedan soportar pesos mayores.

Conformado el palé, este debe ser preparado para facilitar su transporte y habitualmente se embala con un plástico de escaso grosor (Figura 4).



Figura 4: Enfardadora automática de palés (ULMA Handling Systems 2016)

Todos los palés que se preparan requieren almacenamiento y su forma de distribución dentro de la planta, al igual que el resto de material a paletizar, es variada. La gestión de

stocks ha sido discutida ampliamente por multitud de autores y bajo diferentes enfoques (De Koster, Le-duc y Roodbergen 2007); sin embargo, para situar al lector en el contexto de este trabajo, se describen de forma breve los sistemas técnicos más habituales: el más frecuente es el uso de transpaletas o carretillas elevadoras conducidas por un operario y para grandes volúmenes de movimiento de productos, existen soluciones automatizadas que permiten alcanzar mejores economías de escala en centros de distribución y almacenes.

El diseño de sistemas automáticos de manejo de material suele ser *ad hoc* y, por tanto, la cantidad de sistemas diferentes es bastante amplia, aunque los medios más frecuentemente empleados son sistemas de rodillos, AGVs² y almacenes automáticos ASRs³. En la Figura 5 puede verse un ejemplo de almacén en que se usan carretillas y rodillos para posicionar los palés. En la Figura 6 puede apreciarse un ASRs.



Figura 5: Ejemplo de manejo de sistema que emplea carretillas elevadoras en conjunto con un shuttle (MECALUX ESMENA 2016)



Figura 6: Ejemplo de Automated Storage & Retrieval – ASRS (MECALUX ESMENA 2016)

² Automated Guided Vehicle

³ Automated Storage and Retrieval

Como ejemplo paradigmático de la automatización de almacenes cabe destacar los centros de distribución de Amazon. La empresa ya cuenta con sus propias tecnologías robóticas para el diseño y programación de sistemas que suplan las necesidades de distribución de la empresa (Amazon 2017). Es interesante la utilización de AGV para el reparto de las estanterías. Los productos se ordenan en función de los datos obtenidos por las compras en la página web, es decir, qué productos se compran juntos con mayor frecuencia, y se programa de tal manera que un AGV se posicione debajo de la estantería, la eleve y la transporte hasta el punto donde un operario tenga que realizar el paquete.



Figura 7: AGVs en un centro de distribución de Amazon (Amazon 2017)

Como se ha mencionado al principio del trabajo, la producción de bienes cada vez más personalizados es una tendencia que aumenta la presión y disminuye los tiempos en el sector de la logística (tanto interna como externa) y, por eso, el hecho de que las empresas mantengan una posición competitiva depende del desarrollo tecnológico en este campo de los próximos años y el uso inteligente del mismo (PwC 2016).

3.2 Industria 4.0.

La automatización de los sistemas de almacenamiento y la llegada de la fábrica inteligente (*Smart Factory*) forma parte de un movimiento conocido como “la cuarta revolución industrial”. En los últimos años esta idea ha pasado de ser una utopía a ser una realidad cada vez más presente en los múltiples sectores que conforman el tejido industrial. Este concepto, también conocido como industria 4.0, surge en Alemania a través de la *Hightech-Strategie* promovida por el gobierno Federal alemán y su Ministerio de Educación e Investigación (BMBF⁴) en marzo del 2012 en el que se incluye a la industria 4.0. como uno de sus “Futuros Proyectos”. Sin embargo, ya se inicia en enero de 2011 por el *ForschungWirtschaft-Wissenschaft*⁵ quien en colaboración con la Academia Nacional de Ciencia e Ingeniería (Acatech) establece el concepto y forma un grupo de trabajo presidido por Dr. Siegfried Dais (Robert Bosch GmbH) y el Professor Henning Kagermann (Presidente Acatech). En la Feria de Hannover de ese año, 2011, se presenta por primera vez, pero se consolida con la estrategia mencionada anteriormente del gobierno alemán y dentro de la comunidad técnica y científica en la misma feria de Hannover, pero del año 2013.

A partir de este momento, el interés de la industria por subirse a esta “nueva ola” aumenta, pero ¿qué implica esta nueva situación para los modelos productivos?, ¿qué supone ser una

⁴Bundesministerium für Bildung und Forschung

⁵ Alianza de investigación ciencia-industria.

empresa en la industria 4.0?, ¿qué elementos tienen en común? Existe multitud de literatura al respecto y dependiendo del autor podemos considerarla como “un término colectivo para determinadas tecnologías y conceptos en la organización de la cadena de valor” (Hermann, Pentek y Otto 2016), “un nuevo nivel de organización y gestión de la cadena de valor a lo largo del ciclo de vida de los productos” o quizás la que puede dar una mejor idea del concepto “la integración de dispositivos y maquinaria física completa, conectados por sensores y software que son utilizados para predecir, controlar y planificar mejor al negocio y los resultados”(Lu 2017). Como se puede observar, no existe una única definición al respecto. Sin embargo, a la hora de establecer el estado del arte de la industria 4.0 sí se encuentran elementos comunes.

Por un lado, casi todos los autores coinciden en que esta revolución pasa por la inclusión de sistemas ciberfísicos (CPS⁶) en el proceso de producción para la mejora del mismo. El CPS integra el mundo real (humanos, máquinas, productos...) y el mundo virtual mediante una infraestructura de comunicación que conecta todos los elementos. De ahí que uno de los aspectos fundamentales de la Industria 4.0 sea el **Internet de las Cosas (IoT)**⁷, es decir, la capacidad de conectar los elementos físicos de una planta a través de internet. Esto supone un gran reto pues dichos elementos deben integrarse en un sistema global y comunicarse entre sí de una forma eficiente (interoperabilidad), por lo que tiene gran importancia la creación de estándares, lenguajes y mecanismos de relación entre diferentes sistemas, así como la mejora de las comunicaciones.

Esta conexión entre diferentes elementos, la integración generalizada de la información y de la tecnología de comunicación en elementos de producción viene pareja al incremento exponencial de la recolección de datos. La captura de los mismos, su almacenamiento, análisis y transferencia se trata a través del **Big Data**, otra ciencia computacional emergente. En esos procesos, el análisis de dichos datos unido al Internet de las Cosas permitirá un control dinámico de los procesos y facilitará la optimización a la hora de la toma de decisiones. Además, la posibilidad de obtener datos del cliente, facilitará la adecuación de la industria a las necesidades de éste y la consecución de una personalización mayor de la producción, lo cual proporciona una mayor ventaja competitiva para las empresas que adopten estas nuevas metodologías de funcionamiento. Otra posible aplicación sería la de realizar técnicas de mantenimiento predictivo dentro de la misma fábrica, causando una mejora de la eficiencia e incluso posibles ahorros de energía y coste, como ventajas inmediatas.

Paralelamente, el desarrollo de estos sistemas interconectados y la generación de datos y metadatos de forma masiva a lo largo de su cadena de valor ha hecho inviable que una sola compañía pueda almacenar tanta información y por eso han surgido nuevas compañías que ofrecen servicios de *cloudcomputing* o computación en la nube. Según el Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST⁸) el *cloudcomputing* se define como “un modelo para habilitar el acceso conveniente por demanda a un conjunto compartido de recursos computacionales configurables que pueden ser rápidamente aprovisionados y liberados con un esfuerzo mínimo de interacción con el proveedor de servicios”(Badger et al. 2012), es decir, las empresas pagan únicamente por los servicios que necesitan y en el momento que lo necesitan sin necesidad de realizar grandes inversiones en sistemas TI⁹ y en su gestión. Ahora la información puede ser accesible desde cualquier dispositivo conectado y facilita la cooperación y el trabajo colaborativo dentro de la empresa.

Dentro del mundo de la computación y la automatización en la industria podríamos mencionar que la **robótica** también presenta un papel relevante, a pesar de que la robótica actual pertenece más bien a la tercera revolución industrial. Hasta ahora los robots realizaban operaciones repetitivas, previamente definidas y con un nivel de cooperación bajo. Sin

⁶ Cyber-physical system

⁷ En este caso, sería más correcto nombrarlo “Internet Industrial de las Cosas”(he puesto comillas) (IIoT)

⁸ *National Institute of Standards and Technology, U.S. Department of Commerce*

⁹ Tecnologías de la Información

embargo, las nuevas técnicas de *machine-learning* y los avances en inteligencia artificial permitirán avanzar en la mejora de la automatización de sistemas y surgirán nuevas formas de trabajo con robots como es la **robótica colaborativa**, permitiendo el trabajo conjunto entre humanos y robots.

Esta interacción entre las máquinas y los robots es habitual en las nuevas fábricas 4.0 y la podremos encontrar tanto en la presencia de pantallas –cada vez más habituales en nuestras vidas-, o en tecnologías disruptivas como la **realidad aumentada** o la **realidad virtual**. Estas herramientas permiten la creación de fábricas virtuales donde la **simulación** adquiere un papel protagonista. Según John Billings¹⁰ en el Simposio de la Fabricación en América del año 2015, “si la empresa puede simular cada paso que quiera dar antes de hacerlo, ganará en flexibilidad, productividad y tiempo”.

La combinación de estas tecnologías no sólo permite la conversión de lo físico a lo digital, pudiendo repercutir de nuevo en el entorno “real” sino que además se le añaden tecnologías de fabricación avanzadas como la **fabricación aditiva** que dota al sistema productivo de una mayor flexibilidad y capacidad de adaptación a la creciente demanda por parte del cliente de customización individual, unido a un ahorro de material y energía. El futuro en estas tecnologías será la búsqueda de nuevas aplicaciones dentro de la industria, nuevos materiales y mejora en los tiempos de proceso.

En resumen, los nuevos sistemas de manufactura estarán interrelacionados verticalmente con los procesos de las empresas dentro de las fábricas, conectados horizontalmente a redes de valor indispensable que pueden ser gestionados en tiempo real –desde el pedido del cliente hasta las operaciones de logística externas-(Kagermann, Wahlster y Helbig 2013).

Con esto se consigue un cambio de paradigma desde una producción “centralizada” a una “descentralizada” gracias a la red de objetos inteligentes y procesos de gestión independientes que pondrán en comunicación e interacción constante al mundo real con el virtual (MacDougall 2014).

Sin embargo, la adaptación de los sistemas actuales a la nueva revolución industrial presenta retos importantes que hay que tener en cuenta. Por un lado, la interconectividad de los sistemas requiere la creación de estándares comunes de comunicación para obtener arquitecturas de referencia. Es necesario entender que el objetivo es que, partiendo de áreas muy diferentes (ingeniería de la producción, automatización, tecnología de la información...) con puntos de vista distintos, se debe mantener un enfoque común y una visión global del sistema para que la adopción de las nuevas tecnologías tenga sentido. Al mismo tiempo, la generación de grandes cantidades de datos expone a las empresas a mayores riesgos en cuanto a que la información pueda ser comprometida, por lo que uno de los mayores focos de actuación que no se debe pasar por alto es la mejora en los sistemas de **ciberseguridad**. Paralelamente, la velocidad de los cambios surgidos motivará un giro de 180º tanto en la forma de organizar el trabajo, como en las tareas que realizarán los trabajadores y sobre todo, cada vez más se demandarán profesionales que cuenten con habilidades que los hagan versátiles para adaptarse a estas nuevas tecnologías. Para adaptarse a ello, los gobiernos deberán también adecuar los marcos legales para asegurar que las nuevas tecnologías cumplan la ley y que no se frene el desarrollo de las mismas.

3.3 Simulación de procesos industriales y sus tecnologías

En este contexto de competitividad feroz en el mundo industrial y un entorno altamente cambiante motivado por las continuas y rápidas mejoras tecnológicas, la globalización y la customización y personalización del producto, la simulación se presenta como el medio

¹⁰ Vicepresidente y Jefe de “Siemens Automotive, Aerospace and TurnkeySolutions” en la división americana de la Fábrica Digital de Siemens

perfecto para apoyar la toma de decisiones tácticas y operativas. En sistemas complejos de logística y producción, la simulación proporciona una herramienta que permite el análisis de comportamientos que no serían fácilmente deducibles de otra forma.

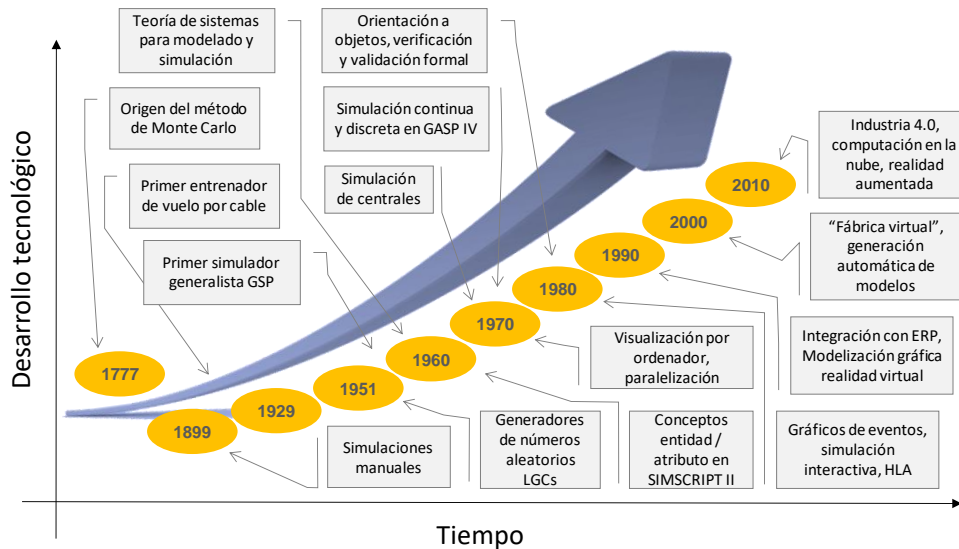


Figura 8: Evolución histórica de la simulación

Desde el comienzo histórico del concepto de simulación con el trabajo del Conde de Buffon para la predicción del resultado de un experimento¹¹ (utilizando un método parecido al método de Montecarlo¹²) hasta la actualidad, la simulación ha evolucionado exponencialmente tanto en sus herramientas como en sus aplicaciones (Figura 8). Actualmente la simulación se encuentra en ámbitos tan diversos como la Sanidad, la Economía, la Investigación o el mundo Militar. Sin embargo, debido al entorno de la Simulación de Procesos Industriales en la que se enmarca el trabajo, el estudio se centrará en la simulación dentro del campo de la Industria. Dentro de este contexto, (Mourtzis, Doukas y Bernidaki 2014) estudian la bibliografía¹³ presente sobre la simulación, demostrando el incremento sustancial en publicaciones desde los años 70 hasta la actualidad como se aprecia en la Figura 9.

Número de publicaciones relacionadas con la simulación

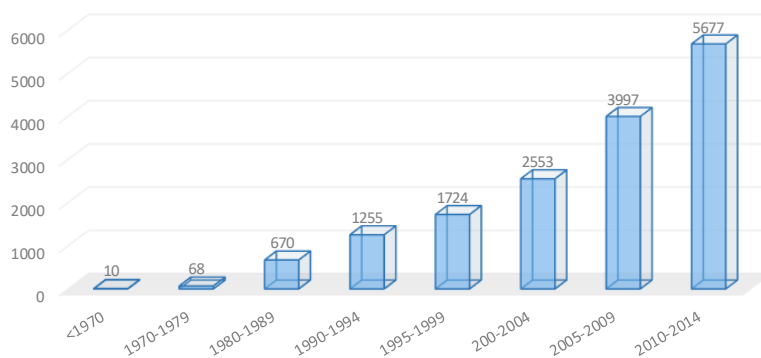


Figura 9: Número de publicaciones relacionadas con la simulación. Elaboración propia

¹¹ Consistía en lanzar una aguja repetidas veces a una hoja de papel cuadrículada.

¹² Método no determinista o estadístico numérico, usado para aproximar expresiones matemáticas complejas y costosas de evaluar con exactitud.

¹³ Se hizo un estudio recopilando alrededor de 15.000 artículos, aunque sólo se profundizó en los más relevantes.

Cabe destacar que dichas publicaciones o bien son teóricas y presentan formulaciones analíticas para soluciones básicas utilizando hipótesis simplificadas; o son casos reales en los que la simulación se utiliza como herramienta para el estudio y mejora de procesos productivos (Crespo Pereira 2013). A pesar de que la cantidad de publicaciones es elevada, es necesario mencionar que la producción científica en este ámbito se ve mermada por la existencia de acuerdos de confidencialidad entre empresa e investigador, puesto que, en muchos casos, los estudios se realizan para el sector privado.

Debido a la cantidad que mencionan el concepto de simulación, lo esperable es que existan diversas definiciones. Según Shannon la simulación es “el proceso de diseñar un modelo de un sistema real y llevar a cabo experimentos con este modelo con el propósito de entender el comportamiento del sistema y/o evaluar varias estrategias para la operación del sistema”(Shannon 1998).

Además, se puede clasificar según tres parámetros como afirman Mourtzis, Doukas y Bernidaki (Mourtzis, Doukas y Bernidaki 2014): el tiempo de cambio, la aleatoriedad y la organización de los datos. Si la simulación depende del tiempo o no, puede clasificarse en dinámica o estática. Si evoluciona con el tiempo, es decir, es dinámica, a su vez se distingue entre la simulación discreta o continua. La diferencia en el empleo de eventos discretos o continuos recae en la clasificación del sistema. Si es discreto, la variable de estado cambiará únicamente en un conjunto discreto de instantes de tiempo. Sin embargo, si es continuo, la variable o variables cambian continuamente en función del tiempo.

Por último, debo añadir que, puesto que la simulación de eventos discretos es la herramienta utilizada en este trabajo, debo añadir una última clasificación para este campo, puesto que este tipo varía en función de si es *time-stepped* o *eventdriven*. La primera hace referencia a que el modelo responde a intervalos fijos de tiempo y el cambio ocurre al finalizar esos intervalos, mientras que en la segunda la variación está ligada a eventos programados y no a intervalos de tiempo, que en este caso son irregulares.

Tabla 1: Clasificación de la simulación

Gestión del tiempo	Estática	Dinámica <ul style="list-style-type: none"> Eventos Discretos Continua
Aleatoriedad	Modelos determinísticos	Modelos estocásticos
Organización de los datos	Basada en mallas	Basada en redes / grafos

Los pasos para ejecutar un estudio de simulación también han sido discutidos por diversos autores pero todos tienen elementos comunes, a pesar incluso de existir la variedad de tipos de simulación como se ve en la Figura 10. Siguiendo el esquema de Banks, podemos distinguir las siguientes fases (Banks, Jerry, Carson, Jhon S., Nelson, Barry L., Nicol 2005):

1. Formulación del problema.
2. Marcar los objetivos de la simulación y del proyecto.
3. Modelización conceptual.
4. Recogida de datos.
5. Implementación del modelo usando el software adecuado.
6. Verificación del modelo, es decir, si el ordenador está trabajando adecuadamente.
7. Validación del modelo comparando con el sistema real.
8. Diseño experimental de alternativas.
9. Simulación de escenarios.
10. Documentación.
11. Implementación de la solución en el sistema.

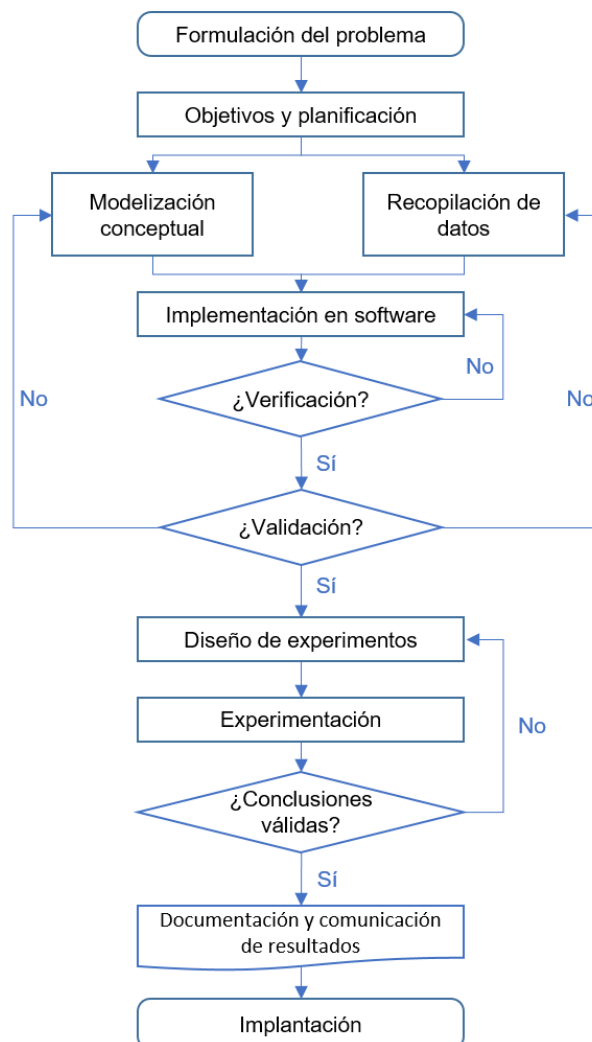


Figura 10: Pasos en la simulación de eventos discretos. (Banks, Jerry, Carson, Jhon S., Nelson, Barry L., Nicol 2005)

La validez del modelo de simulación se presenta cuando éste es fiel al sistema, es decir, presenta un comportamiento análogo; cuando su nivel de detalle es adecuado a lo establecido; y cuando la escala del modelo incluye los elementos necesarios para que sea representativo (Sokolowski y Banks 2010).

Como se ha visto, la simulación es una herramienta con un gran potencial y entre sus ventajas podríamos destacar:

- Se pueden realizar todo tipo de pruebas y análisis de tipo “*What if..?*” o “¿Qué pasaría si...?” sobre el proceso productivo sin que esto interrumpa el mismo ni suponga un coste tan elevado como lo sería el probarlo *in situ*.
- Se pueden probar hipótesis sobre el funcionamiento de la planta o comprobar que el sistema va a responder a una determinada planificación.
- Se puede estudiar el comportamiento de determinadas variables cuya observación en planta resultaría complicada.
- Se posee un mejor entendimiento del sistema desde una perspectiva global.

Sin embargo, como cualquier otra metodología analítica, la simulación no es apta para todos los casos y su utilidad práctica dependerá en gran medida de los objetivos del análisis, la información disponible y el tipo de proceso estudiado. Banks establece una serie de reglas para determinar cuándo no es adecuado simular. Entre ellas se incluyen, entre otras, la falta de experiencia por parte del modelador, la inexistencia de datos o estimaciones suficientes para validar posteriormente el modelo o si el proceso es demasiado complejo para modelarlo o demasiado simple para que pueda estudiarse analíticamente (Banks, Jerry, Carson, Jhon S., Nelson, Barry L., Nicol 2005).



La evolución de las técnicas de simulación ha venido pareja a la creación y mejora de software para este fin. Entre ellos se encuentran Arena, Extendsim, Flexsim... por nombrar algunos. Su principal diferencia consiste en si son 2D o 3D, si existe posibilidad de incluir animaciones, si cuenta con un optimizador y una herramienta de creación de escenarios, cómo de programables son sus módulos o si pueden funcionar con sistemas discretos y continuos. También se tiene en cuenta si se pueden paralelizar las lógicas programadas o cómo de integrada está la herramienta de visualización en el modelo (Swain 2015).

3.4 Robótica aplicada a la industria

La automatización de los procesos ha estado unida a la capacidad del ser humano para facilitar la consecución de las tareas más tediosas y ayudar a la mejora del rendimiento (Nof 2009). Desde la antigüedad ya se habían creado mecanismos capaces de ayudar en ciertas actividades (por ejemplo, el uso de molinos de agua o viento o instrumentos musicales automáticos). Sin embargo, la historia de la automatización y en concreto de la robótica tal y como la conocemos en la industria comenzó en 1954 con el desarrollo por parte de George Devol del primer robot industrial dedicado a transportar piezas fundidas en molde hasta la cadena de montaje. A partir de ahí, según informes de KUKA (KUKA 2017a) existen 4 revoluciones robóticas, desde los primeros robots en los años 60 y 70 como el *Unimate* dedicados a tareas simples como la soldadura o el transporte de piezas de una forma rápida y en gran cantidad hasta los robots colaborativos –*cobots*– en los que humano y robot trabajan conjuntamente, una tecnología propia de la revolución industrial 4.0 en la que vivimos. Sin embargo, KUKA va más allá y explica en su informe sobre la industria 4.0 que actualmente estamos en la tercera revolución robótica que consiste en que existirán robots móviles que puedan actuar con el medio y los agentes de los sistemas productivos, de una forma inteligente con la capacidad, por ejemplo, de cambiar de estación de trabajo, si las condiciones lo requiriesen. Las expectativas de desarrollo futuro en el campo de la robótica apuntan a las mejoras en inteligencia artificial, el desarrollo de capacidades cognitivas y sensitivas y la capacidad de interpretar los gestos y el lenguaje humano, así como la capacidad de aprender por observación.

A pesar de que la venta de robots en el mundo no para de crecer (un incremento del 15% en el año 2015) (International Federation of Robotics 2016), se encuentran multitud de empresas que aún no han incorporado este tipo de tecnología en sus procesos, por lo que existe un potencial de mejora amplio. Otros factores que condicionan este hecho dependen de que el mercado ha evolucionado hacia una demanda cada vez más personalizada, por lo que los sistemas productivos deben ser flexibles y capaces de manejar lotes pequeños y con productos diversos, lo que complica la automatización total de una línea (Crespo Pereira 2013). Además, existen tareas que realizan los humanos difíciles de implementar pues las decisiones tomadas por los mismos responden a reglas que combinan lógica e intuición y que son complejas a la hora de programar. Hay que añadir que, al evitar al trabajador tareas repetitivas y monótonas, éste pasa a tener un papel crucial tomando decisiones de alto nivel que dotan al sistema automático de mayor flexibilidad y capacidad de adaptación. De ahí que la tecnología de la robótica colaborativa adquiera tal importancia. Combinar la repetición de las tareas y la potencialidad de un robot, con la intuición y movilidad de un humano, crea un sinfín de combinaciones de interés para la industria.

Tabla 2: Tabla comparativa entre LBR iiwa y KR Cybertech de KUKA. Elaboración propia

Nombre		<i>LBR iiwa</i>	<i>KR Cybertech</i>
			
Carga útil		7-14 kg	8-16 kg
Alcance		0,800-0,820 mm	1,610-2,010 mm
Precisión		±0.1 mm	±0.04 mm
Peso robot		23,9-29,9 kg	263-270 kg
Ejes		7	6
Velocidad	E1	85-98°/s	156°/s
	E2	85-98°/s	156°/s
	E3	100°/s	156°/s
	E4	75-130°/s	343°/s
	E5	130-140°/s	362°/s
	E6	135-180°/s	659°/s
	E7	135-180°/s	-

Por definición, un robot según la Organización Internacional de Normalización (ISO 2012) es un “mecanismo programable accionado en 2 o más ejes con un nivel de autonomía, pudiéndose mover en su entorno, para realizar una determinada tarea”. Como se ha explicado anteriormente, existe un amplio rango de soluciones y modelos, por lo que este trabajo pretende a continuación ofrecer un contexto para la comprensión de las soluciones estudiadas con una serie de ejemplos obtenidos de la revisión de catálogos comerciales de la empresa KUKA¹⁴. Se escogen por este motivo dos robots de su catálogo (KUKA 2017b), uno colaborativo y otro industrial para ejemplificar las diferencias entre ellos. La principal diferencia entre el funcionamiento de uno y otro radica en su interacción con el ser humano. El primero está pensado para trabajar a la par que los humanos pues incluye sensores sofisticados que previenen que el robot golpee al trabajador ocasionándole alguna lesión (HANNOVER MESSE 2016). En contraposición, los robots “tradicionales” suelen ser más pesados y requieren ser confinados en jaulas para que un operario no acceda al rango de acción del mismo. Comparando con los dos ejemplos de la Tabla 2, podemos ver que para cargas útiles similares¹⁵, los alcances y las velocidades para cualquiera de los ejes son mayores. Incluso la precisión de repetitividad es también mejor.

Según Alex Miller, portavoz de ABB Robotics (Lingle 2015), la inclusión de los cobots tiene sentido en multitud de aplicaciones, aunque en términos generales únicamente compensa si la colaboración humano-máquina mejora el rendimiento respecto al alcanzado por el robot o el humano por separado. A la hora de escoger un robot adecuado para una línea, independientemente de su interacción con el humano, es fundamental conocer primero la aplicación. Existen multitud de brazos robóticos, pero al combinarlos con diferentes cabezales, se puede obtener una solución diferente para cada aplicación. Es importante conocer el área de trabajo del robot pues influye en la elección del alcance y su colocación. Por otro lado existen soluciones que se colocan en el suelo, la pared o aéreas¹⁶, o incluso sistemas colocados en raíles que cuentan con un cierto movimiento. La aplicación también influirá en el peso que el robot tenga que transportar (sobre todo en las aplicaciones de manufactura) y en la velocidad necesaria para manejar el material.

¹⁴ Se escoge KUKA por ser referente en el sector de la robótica industrial

¹⁵ A pesar de que no existen dos modelos con carga útil exacta, se asimila al más parecido

¹⁶ Colocados en el techo o en una plataforma hecha a medida

4 METODOLOGÍA

4.1 Descripción del proceso

En este trabajo se plantea un proceso de *picking* y empaquetado de kits en cajas de cartón de un claro carácter manual. El caso se inspira en una empresa que cuenta con una gran multitud de productos cuyo número de componentes es muy variable. Además, en este caso, el tamaño de los lotes de producción que se emplean para adaptarse a los pedidos de los clientes también presenta una gran variabilidad. Se trabaja tanto con lotes “pequeños” de cinco ítems como lotes de un elevado número de productos. El proceso se divide en una fase de acopio y gestión de stock en el almacén de la planta y otra de colocación de las piezas en las cajas.

El proceso principal de esta etapa es el de colocación de piezas. Ésta se realiza sobre una cinta transportadora de las medidas necesarias para albergar la caja que se sitúa sobre ella. Al lado de la cinta existen unos *boxes* o mesas de almacenamiento de palés. Aquí estarán situados los palés con las piezas que se deberán colocar. Debido al constante cambio de productos dentro de los turnos y la necesidad de reducir sus tiempos de espera, se divide la zona de *boxes* entre 4 diferenciadas, cada un número determinado de *boxes*. La colocación de los palés en los *boxes* y de los empleados dependerá del producto en cuestión y el orden de colocación de los elementos. Si dichos elementos cuentan con unas dimensiones más reducidas y el número de componentes distintos no es amplio, se suele utilizar sólo una zona. Sin embargo, en ocasiones los elementos podrían no ocupar un único *box* por sus dimensiones. Si esto ocurre, y el número de componentes distintos es elevado, se podrían preparar dos zonas para la colocación. En general, se asigna un operario a uno o dos *boxes*, dependiendo del producto a colocar y su patrón de colocación. El proceso empieza con un operario abriendo la caja y situándola sobre la cinta. El operario puede además colocar la primera pieza, aunque esto no ocurre siempre. A continuación, las tareas de los operarios se basan en coger las piezas de los palés y colocarlas dentro de la caja. Una vez finaliza la colocación, la caja pasa por una zona de control visual de calidad y, a continuación, a una máquina de cerrado de cajas.

En el almacén formado por estanterías se guardan los palés de piezas y las cajas de cartón donde se formarán los kits. Uno o más operarios montados en carretillas elevadoras son los encargados de la alimentación de la línea y la gestión del almacén. La tarea habitual del carretillero será la de buscar los componentes necesarios en las estanterías del almacén y a continuación colocar los palés en la zona de alimentación según el orden de colocación de piezas dentro de la caja según el producto. También se encarga de reponer los palés vacíos con otros llenos de material y preparar el material para el siguiente lote en la zona correspondiente mientras se coloca un determinado lote, lo cual lo hace de manera visual y respondiendo a su criterio. Por último, una de sus funciones principales es también la de colocación de los palés de piezas que llegan desde otro punto de la fábrica en las estanterías correspondientes del almacén de la planta de empaquetado. Esta función tiene importancia ya que pueden llegar a dedicar el 50% de su tiempo a realizar dicha tarea.

Uno de los problemas de este tipo de líneas con un carácter tan manual son las paradas, ya que existen elementos que interactúan entre sí y paran la línea por múltiples de razones:

- Falta de tiempo en la colocación: a pesar de que este tipo de líneas suelen ser lentas, es posible que el operario pueda retrasarse a la hora de colocar una pieza por las características de la misma o por la cantidad de elementos a colocar
- Colocación errónea: el operario no coloca los componentes en el orden adecuado u omite alguno

- Tiempo de retirada del plástico de los palés: los operarios se encargan de retirar el plástico y puede que a la llegada de un palé no pueda retirar la pieza del palé a tiempo y colocarla dentro de la caja en la ventana de tiempo.
- Falta de palé: ya que el carretillero tiene que gestionar tanto el acopio de material como la preparación en las estaciones y la retirada de material, puede ocurrir que un palé se vacíe mientras el carretillero esté realizando otras tareas y no haya previsto esa falta de material y, por lo tanto, el operario no tenga piezas para colocar y deba esperar por el palé. Este hecho es más probable cuando se trabaja con lotes pequeños y cambios de referencias en poco tiempo.
- Atascos aguas abajo de la línea en la embaladora o la cerradora de cajas.
- Fallos mecánicos de la línea.
- Cambio de zona de boxes: entre referencia y referencia existen pérdidas de tiempo que en ocasiones pueden llegar a ser significativas.

La ocupación de la línea varía en función de la carga de trabajo, pero no es excesivamente elevada.

4.2 Análisis de datos

A la hora de la simulación de cualquier tipo de proceso industrial es fundamental el acopio de datos necesarios y su análisis para la correcta caracterización del sistema. La calidad y precisión de los mismos influirá en gran medida en los resultados obtenidos posteriormente por la simulación. Por ello, esta fase dentro de la simulación de procesos suele ser la más costosa (Skoogh y Johansson 2008).

En primer lugar, es conveniente realizar una primera visita a la planta que se va a analizar y realizar anotaciones sobre el funcionamiento de la misma, el proceso, la organización del trabajo, los problemas habituales... El contacto con los responsables es fundamental pues, además de poseer el conocimiento de la planta y su problemática, se detectan detalles que a primera vista pueden no ser obvios para el modelador y se comprenden mejor las preocupaciones y expectativas del cliente. Además de apuntar cualquier dato relevante, a la hora de realizar el modelo conceptual, es útil contar con fotografías, pues resultan prácticas para apoyar la modelización. En la práctica es habitual realizar varias visitas ya que una suele ser insuficiente.

En segundo lugar, el modelador deberá, una vez conocido el proceso, analizar la carga de producción, la distribución de productos y componentes... por lo que un registro de las órdenes de fabricación durante un período de tiempo es fundamental. En este caso, los campos útiles de ese registro serían por ejemplo:

1. Lotes y número de los mismos
2. Producto al que corresponde cada lote
3. El turno al que pertenece cada lote
4. Fecha de producción
5. Peso del producto y su embalaje
6. Dimensiones totales del producto
7. Tiempos de empaquetado total
8. Tipo y cantidad de componentes en cada producto
9. Línea a la que pertenece el producto¹⁷

¹⁷ En el caso que existiesen más de una línea

En ocasiones es necesario el filtrado de datos si, por ejemplo, hubiese datos de otras líneas o productos que no se quisiese analizar, hecho que deberían indicar los responsables de la línea.

Una vez depurados los datos con los que se trabajará, se procede a analizar los parámetros de diseño más importantes a la hora de modelar la línea.

4.2.1 Estudio de componentes

Se comienza por examinar los datos referentes a los componentes de la línea, es decir, su naturaleza, su frecuencia y sus dimensiones.

Composición de los kits

Se dividen los componentes en 4 categorías dependiendo de si son piezas estándar, piezas pequeñas, piezas especiales o la propia caja. Realizando esta clasificación, se estudia:

- Número de componentes totales y por categoría en cada kit

Esta variable determina el número de piezas que se deberán manipular por caja lo que nos definirá tres tasas:

- Tasa de alimentación necesaria para la línea
- Tasa de colocación de productos
- Tasa de producción por minuto

Podemos decir que las dos primeras variables están estrechamente relacionadas con la tasa de producción. Por una parte, para conseguir una determinada tasa de producción, será necesario diseñar un sistema de alimentación que sea capaz de suplir el material necesario en el tiempo requerido, por lo que la elección del sistema, la dimensión de sus *buffers* y la velocidad a la que funcionen los mecanismos serán parámetros determinantes. Por otro lado, el sistema de alimentación y el sistema de colocación de piezas en las cajas deberá coordinarse adecuadamente para que la línea esté equilibrada y no existan interferencias entre una y otra. Además, la tasa de colocación influirá en que el robot escogido para tal tarea debe cumplir un tiempo de ciclo determinado por las condiciones de peso y alcance de las piezas a colocar.

- Número de componentes diferentes totales y por categoría en cada kit

El número de componentes diferentes que hay en una caja delimita el número de *boxes* en la zona de alimentación de la línea, especialmente, el número de piezas estándar, ya que sus dimensiones se asume que son más representativas.

Dimensiones

El estudio de las dimensiones de los componentes es la segunda variable de importancia ya que también puede limitar los *boxes* necesarios y las características de los robots utilizados. Si los kits emplean piezas muy grandes, podrían llegar a ocupar dos *boxes* por lo que la colocación en la alimentación de la línea, el número de operarios necesarios para las tareas y los tiempos de colocación varían. Además, en el caso de utilizar un sistema automático, es importante conocer qué tipo de piezas y sus dimensiones, pues el coste de los estos sistemas varía en función del alcance y del peso que puedan manejar.

Frecuencia de repetición

La frecuencia con la que aparecen determinados componentes en los productos es útil por dos motivos. Por un lado, que un componente se repita en productos sucesivos influirá en la programación de la alimentación, pues la carretilla elevadora deberá cambiar el

componente en el *box* correspondiente y esto supone una menor tasa de ocupación de la carretilla pues no tendría que volver al almacén. En un sistema automatizado, esto puede aportar complejidad a la programación de las tareas de alimentación. Por otro lado, conocer la frecuencia de componentes grandes dentro de la línea es significativo, pues se podría obviar la aparición de estos elementos y que no formasen parte del modelo ni del nuevo sistema productivo. Si el número de casos es relevante, se deberá tener en cuenta tanto en la alimentación como en las soluciones robóticas y la distribución en planta escogidas.

4.2.2 Estudio de órdenes de fabricación y lotes

Tamaño de lote

Se realiza un análisis del tamaño de lotes y su distribución, ya que la facilidad de implementación de soluciones automáticas en los sistemas de producción depende en gran medida del tamaño de las series. Además, la ocupación de las carretillas en las tareas de alimentación de la línea se verá afectada por este parámetro, pues lotes pequeños implicarán un mayor número de viajes entre el almacén y la línea. Además, la distribución de los lotes permite conformar posteriormente los escenarios que validen la simulación realizada.

Tasa de producción y tasa de ocupación

Además de los lotes, contar con la producción por días de los mismos y conocer las dimensiones de productos y de la cinta, permite calcular el tiempo teórico para realizar los lotes de un día:

$$\text{Tiempo teórico}(h) = N_{\text{cajas}} * \frac{L_{\text{prom}} + d_{\text{separacion}}}{V_{\text{cinta}}} + t_{\text{cambio}} * N_{\text{lotes}} \quad [1]$$

Siendo:

- N_{cajas} : el número de cajas producidas en ese día.
- L_{prom} : la longitud promedio de dichas cajas.
- $d_{\text{separacion}}$: la distancia entre las cajas dentro de la línea.
- V_{cinta} : es la velocidad de la cinta transportadora.
- t_{cambio} : es el tiempo que se tarda entre los cambios de un lote a otro.
- N_{lotes} : es el número de lotes hechos en un día.

Si este tiempo teórico se divide entre las horas totales trabajadas, obtenemos la ocupación de la línea. Obteniendo el promedio de las ocupaciones diarias, estudiamos el grado de saturación de la línea y si existe margen de mejora.

A su vez, con el número de cajas producidas por día, podemos obtener las tasas de producción máximas y medias y estudiar si parámetros como la velocidad de la cinta o el tiempo de cambio entre los lotes podría variar dicha tasa y mejorarla. En este caso, variar la velocidad de la línea supondría otra fuente de error a mayores pues disminuiría la ventana de tiempo de colocación y lo más probable es que se generasen más paradas. Sin embargo, el tiempo de cambio entre lote y lote sí podría ser una variable sobre la que actuar. La ecuación nos da a entender que, si disminuyésemos el tiempo de cambio, obtendríamos una ocupación

más alta de la línea. Como consecuencia, la solución automatizada debe perseguir una alimentación con unos tiempos de cambios mínimos.

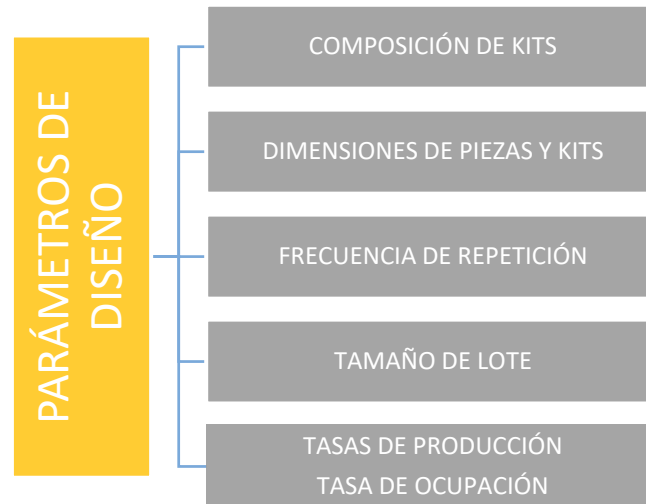


Figura 11: Parámetros de diseño de la línea a partir del análisis de datos. Elaboración propia

Una vez analizados los parámetros fundamentales de diseño de una nueva línea de producción, se necesita conocer los datos de funcionamiento de la propia línea a un nivel más elemental, es decir, conocer en profundidad las tareas realizadas en la línea y, sobre todo, los tiempos que requieren las subactividades de los trabajadores de la línea. La toma de tiempos se puede realizar *in situ* o a través de vídeos. El análisis de vídeos es óptimo pues permite analizar más tiempo y en más detalle ya que las tareas se pueden subdividir si fuese necesaria más precisión. A mayores, existe la posibilidad de repetir medidas que se consideran erróneas mejorando la calidad de la muestra y se minimiza el efecto Hawthorne por el cual el rendimiento del trabajador se ve afectado si es consciente de que está siendo observado. La toma de datos de los tiempos de los trabajadores de la línea se comienza en el momento en el que toca con su mano la pieza para colocar y finaliza en el momento en el que apoya la pieza y no va a realizar ninguna tarea adicional. Se sigue el mismo procedimiento para las cajas. En ocasiones el trabajador necesita mover las piezas del palé para preparar la siguiente colocación, pero en esta toma de tiempos solo se tiene en cuenta el momento a partir del cual podemos decir que comienza la colocación *per se*. Con la ayuda de los vídeos también se contabilizan las paradas, los tiempos de cambio, tiempos de carga y descarga de los palés en los *boxes* por las carretillas elevadoras...

4.3 Desarrollo del modelo

Una vez estudiado el proceso y obtenidos los datos relevantes para poseer un conocimiento más profundo de la línea y sacar conclusiones que pudiesen no ser obvias, se procede a desarrollar el modelo en un entorno informático.

Para este trabajo, se ha utilizado el software de simulación de eventos discretos en 3 dimensiones Flexsim. Flexsim constituye uno de los softwares de simulación de eventos discretos más avanzados y con mayores funcionalidades del mercado. Es utilizado tanto en pequeñas como grandes empresas y ejemplos representativos de sus usuarios son DHL, la NASA o Michelin entre otros. Es un software desarrollado para ayudar a ingenieros y planificadores a tomar decisiones en el diseño y operación de un sistema en un periodo de tiempo relativamente corto, puesto que proporciona un feedback cuantitativo en las soluciones diseñadas, resulta de este modo un instrumento perfecto para la realización de análisis de tipo “*What if...?*” o “¿Qué pasaría si...?”. Presenta dos modos de funcionamiento compatibles: un entorno 3D de modelización y un modo en 2D para la programación de lógicas en el

modelo. En el entorno 3D se pueden situar los elementos que representen a los bloques y/o operarios de la línea gracias a las librerías prediseñadas en el software.

Estos elementos se pueden enlazar para simular comportamientos de flujo de ítems y a su vez, cada elemento puede ser configurado dentro del propio entorno 3D ya que cuenta tanto con comportamientos predefinidos a elegir por el usuario como con la posibilidad de desarrollar fragmentos de código propios para cambiar la lógica del mismo. Existe la posibilidad de configurar nuevos elementos o entidades y crear librerías propias (Figura 12) y dotarlas de las formas requeridas con programas externos de modelización 3D.

Esto permite que las posibilidades de recrear una planta o proceso con el máximo detalle estén limitadas por el tiempo invertido en el modelo y la precisión que se quiera conseguir. El hecho de ser más visual que otros softwares de simulación de eventos discretos facilita la comprensión para aquellos individuos inexpertos en este tipo de disciplinas. Incluso, el software cuenta con la opción de crear interfaces gráficas de usuario (GUI¹⁸) que facilite al usuario del modelo interactuar con el mismo sin conocer necesariamente su funcionamiento ni poseer los conocimientos de programación de Flexsim.

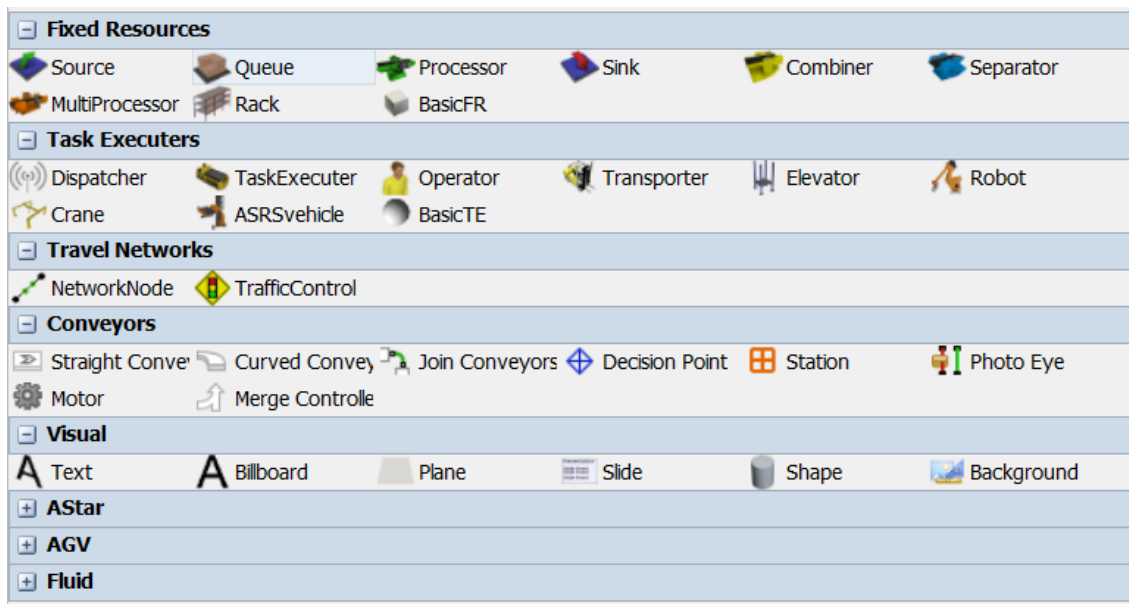


Figura 12: Ejemplos de los elementos preprogramados en Flexsim

Sin embargo, la potencialidad de este programa no recae sólo en su capacidad de modelado en 3D, sino en la posibilidad de crear lógicas de funcionamiento mediante su modo de operación Processflow, una herramienta intuitiva para el modelador que permite programar lógicas de procesos más complejos, no integrados en el entorno 3D. Los flujos de proceso modelados de esta forma tienen la ventaja de que pueden ser paralelizados e incluso conectarlos con el modelo 3D, por lo que la complejidad del modelo de simulación puede ser alta. Además, programar de una forma gráfica permite organizar mejor las lógicas y ser capaz de realizar modificaciones de una manera más sencilla para usuarios que no sean programadores expertos. La posibilidad de combinar procesos en 3D y en 2D y su potencia supone un avance cualitativo respecto a otros softwares de simulación de eventos discretos que sólo disponen de un modo de funcionamiento o cuyo modo 3D es más básico.

¹⁸ Graphic User Interface

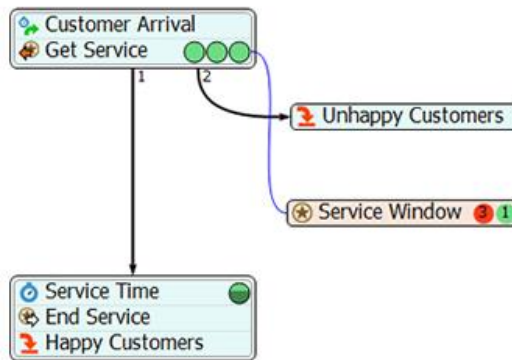


Figura 13: Ejemplo de un Processflow de una cola de clientes

Conocidas las potencialidades del software empleado, antes de comenzar a utilizarlo, se debe realizar un modelo conceptual o diagrama de flujo del proceso descrito en el apartado 4.1.

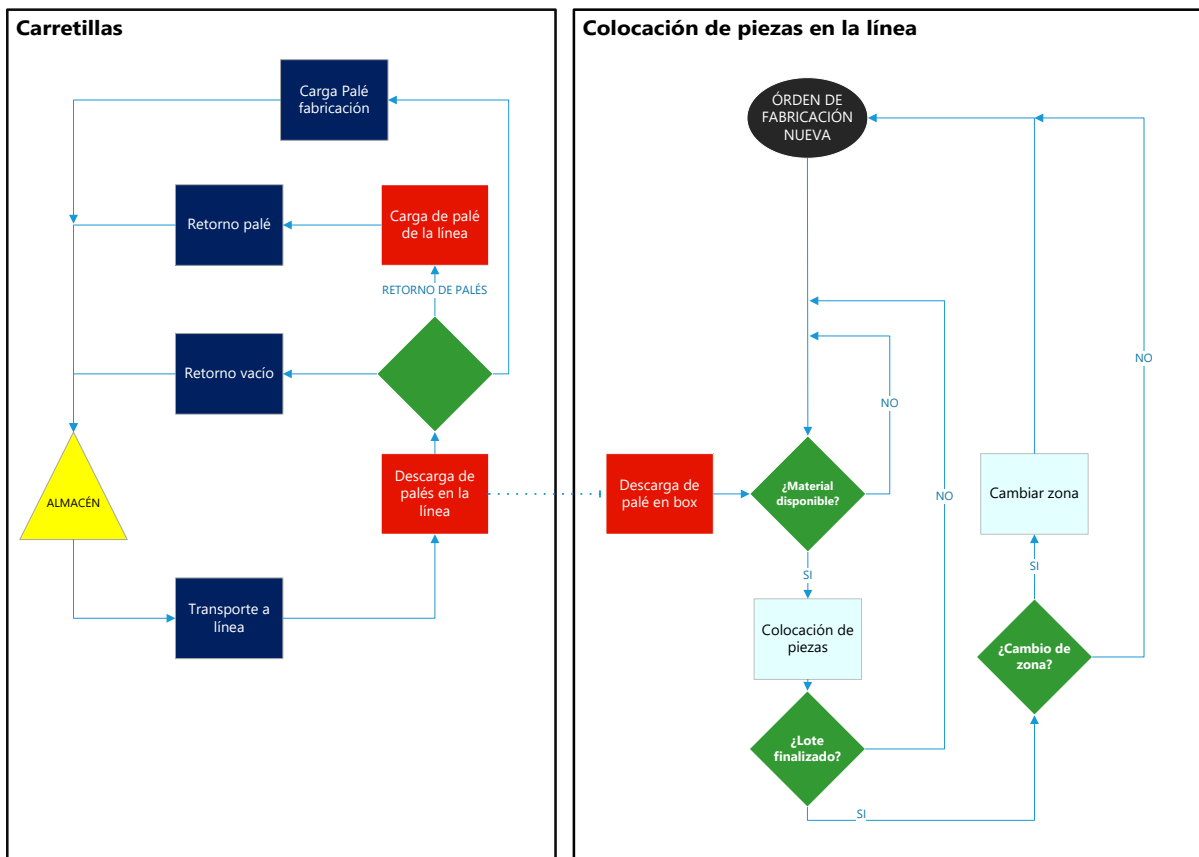


Figura 14: Diagrama de flujo del proceso de colocación de piezas en la línea y las tareas de las carretillas. Elaboración propia utilizando Microsoft Visio.

Se ha optado por realizar un esquema sencillo (Figura 14) para ejemplificar el funcionamiento de la línea, dividiendo por un lado las tareas de las carretillas y por otro la colocación de piezas en la línea por parte de los trabajadores.

Las carretillas pueden tener que transportar material del almacén a la línea, de la línea al almacén, de la fábrica al almacén o volver vacío al almacén. En cuanto al segundo esquema, el proceso comienza con la nueva orden de fabricación. Si está el material en las mesas o *boxes* correspondientes, el operario coloca las piezas en las cajas hasta que se acabe el lote. Si el lote acaba puede que haya que cambiar de zona o no. Si existe dicho cambio, se genera una demora en la línea por el desplazamiento de los operarios.

A la hora de modelar dicho esquema, se han desarrollado unos criterios de decisión y se han asumido ciertas hipótesis simplificadoras explicadas a continuación.

- Se parte de que el material siempre está disponible para ser enviado a la línea y si no aún no lo está, el programa lo crea.
- Se omiten tareas menos relevantes que los trabajadores puedan hacer durante su trabajo
- Se evita modelar las “colisiones” entre carretillas, ya que, aunque empeora¹⁹ la animación de la simulación, se considera que no tiene una gran importancia.
- Se asume que la carretilla está aproximadamente 50% del tiempo reabasteciendo la línea y 50% realizando operaciones de llenado del almacén desde el punto de descarga de los palés llegados desde el exterior.
- Se generan paradas con una cadencia determinada por una distribución para imitar las paradas habituales que la línea pudiese tener por fallos mecánicos en la misma o “aguas abajo”.
- Existe un operador cuya tarea es exclusivamente la colocación de cajas.
- Se ha simplificado el aspecto de los elementos, pues desarrollar un modelo más fidedigno requiere una carga de trabajo no proporcional al objetivo de este trabajo, es decir, obtener un modelo parametrizado que cualquier empresa similar pudiese modificar de forma sencilla y adaptarla a su proceso.

La creación de un diagrama de flujo y estas hipótesis sirven para facilitar al modelador una herramienta para organizar su simulación y las lógicas a implementar. Sin embargo, antes de modelar los comportamientos de los elementos de la simulación, ya que se trabaja con un entorno en 3D, se debería comenzar situando los elementos prediseñados de las librerías disponibles en el entorno 3D. Contar con un plano de la planta facilita en gran medida la colocación de los objetos y ajustar sus dimensiones a la escala adecuada. Las distancias entre los elementos adquieren una gran importancia especialmente a la hora de contabilizar los tiempos de viaje de las carretillas elevadoras y su ocupación.

¹⁹ Las carretillas pueden cruzarse en la simulación.

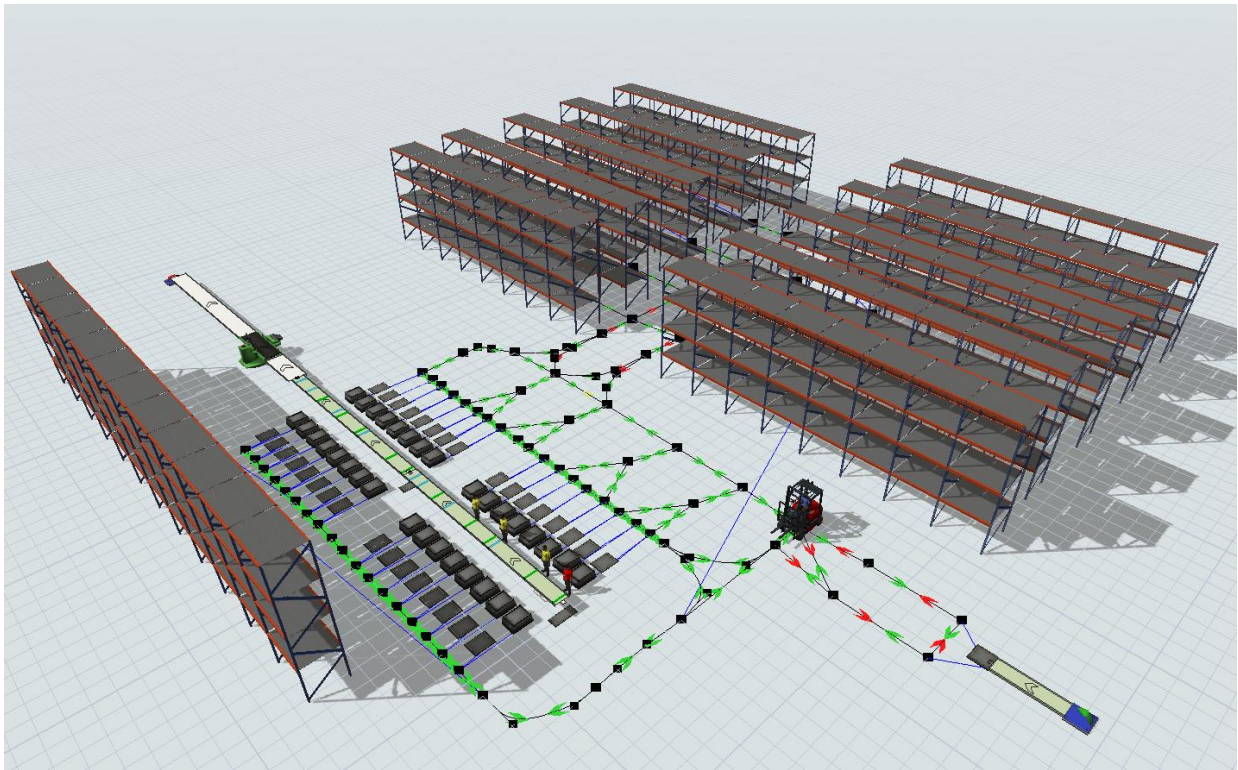


Figura 15: Perspectiva del modelo en 3D. Elaboración propia.

Entre los elementos principales utilizados para la simulación del modelo (Figura 16), se escogieron los siguientes:

Conveyor: Cinta transportadora donde se realizará el empaquetado de kits. A su vez cuenta con unidades *Photoeye* que actúan como sensores fotoeléctricos para activar ciertos comportamientos en el modelo y un elemento *Motor*, utilizado para gestionar las paradas de la línea por la existencia de fallos.

Transporter: La carretilla elevadora que transporta los elementos del almacén a la línea.

Operator: Se colocan 5 operarios que realizarán exclusivamente las tareas de colocación de piezas, excluyendo otro tipo de operaciones como control de calidad o retirada de palé que también llevan a cabo en la línea real.

Rack: Estanterías de almacenamiento donde se generan los palés con las piezas a empaquetar.

Queue: Elemento de cola utilizado tanto como *buffer* en la creación del material, como portapalés en la zona de alimentación de la línea.

NetworkNode: Sistema de nodos implementado para indicar el camino de las carretillas elevadoras y mejorar su animación.

Conexiones: Se realizan las conexiones más básicas entre los dos *conveyor* y entre el *NetworkNode* y las unidades con las que la carretilla va a actuar: las *queues* donde se emplazarán los palés y los *Racks* donde éstos se almacenan.

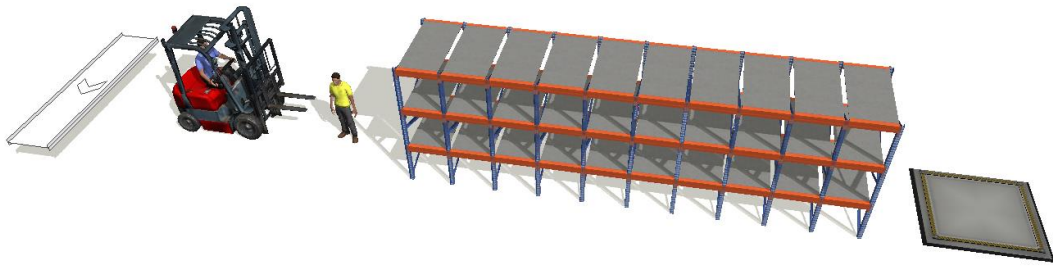


Figura 16: Elementos utilizados en el modelo 3D. Elaboración propia.

Según la descripción del proceso, se sitúan los elementos acordes y se dispone el *layout* mostrado en la Figura 15.

Existe una zona de almacenamiento y otra de colocación claramente diferenciadas. La primera cuenta con 11 estanterías para el almacenamiento del material. La segunda cuenta con una línea, los 8 *boxes* por zona (un total de 32), un *box* auxiliar para los palés sobrantes y los empleados. Se incluye, además, un área de entrada de material de fábrica en la línea en la parte superior de la Figura 17, explicada más adelante, y otra de cierre de cajas que se ha incluido por razones puramente estéticas, ya que no posee un papel relevante en la simulación.

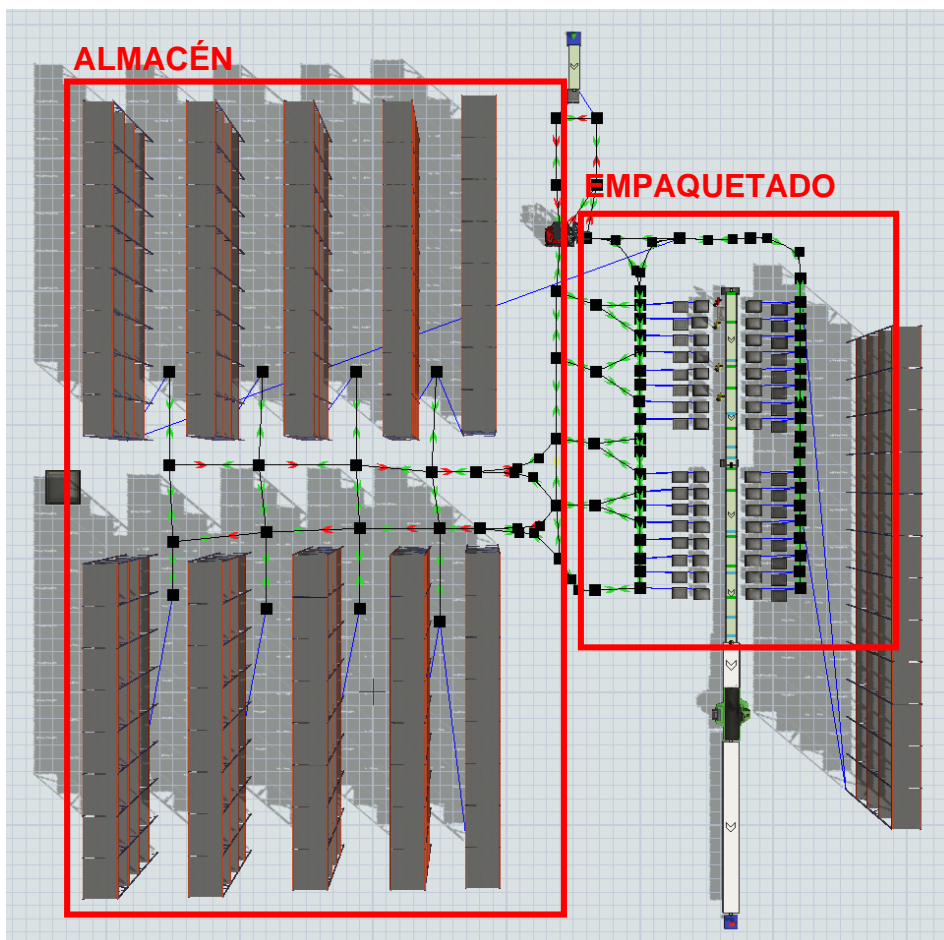


Figura 17: Distribución en planta de la línea. Elaboración propia.

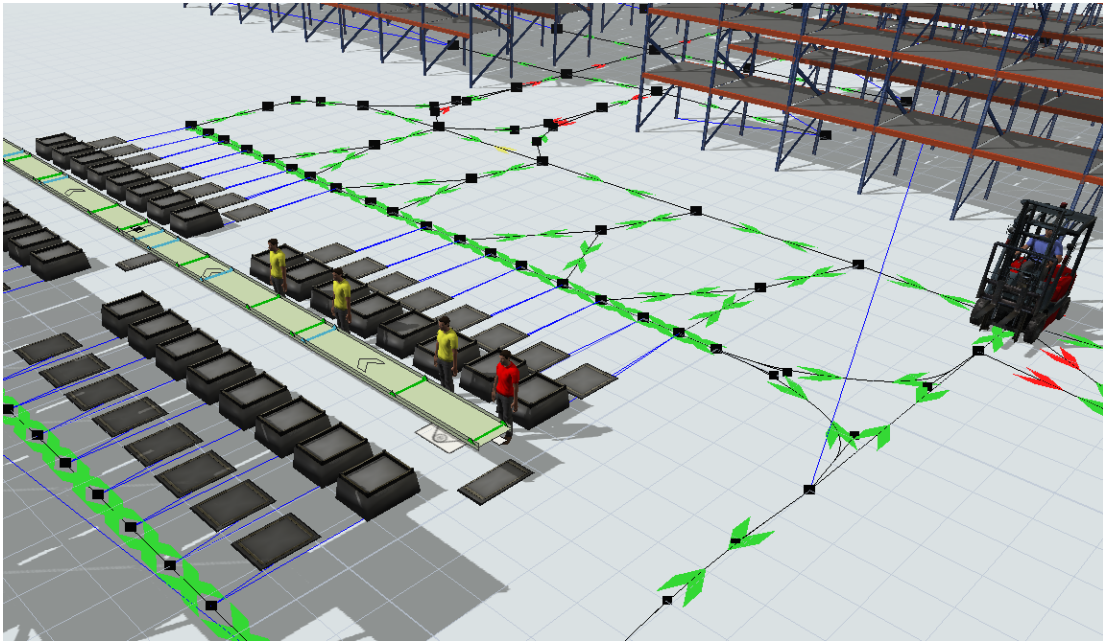


Figura 18: Vista en detalle de la línea. Elaboración propia

Una vez obtenida la distribución de la planta en 3 dimensiones, se procede a desarrollar las lógicas que definirán el comportamiento complejo del proceso y sus agentes con la herramienta de *ProcessFlow* de Flexsim. Su implementación se divide en dos grupos de tareas diferenciados que se desarrollan con más detalle a continuación.

4.3.1 Generación OF

Este *ProcessFlow* incluye las generaciones de órdenes de fabricación, la creación de los palés y el contenido de los mismos en las estanterías, el comportamiento de las carretillas elevadoras y la gestión de la alimentación de la línea, la lógica del operario dedicado a la colocación de las cajas, la gestión de la retirada de palés de los *boxes* (llenos y vacíos) y las paradas aleatorias de la línea.

La simulación se inicia una vez se pulsa en el icono de *Run* y se acciona la fuente o *Source* que pone en marcha el proceso, “lanzando” un *token* o ítem que activa las líneas del código pertinente una vez las actividades se completan sucesivamente. Este *token* se representa por un elemento circular de color verde. El primer *token* genera la primera orden de fabricación. Se han incluido dos líneas de código con dos funciones diferentes: una, para liberar todos los puestos de palés y repartir las estaciones de trabajo en función del tamaño de los palés (*Conf Puestos + EstTrabajo*); y otra, para establecer tamaños de lotes constantes por si esto fuese útil para el estudio del comportamiento del modelo en función del tamaño de lote (*Lote*).

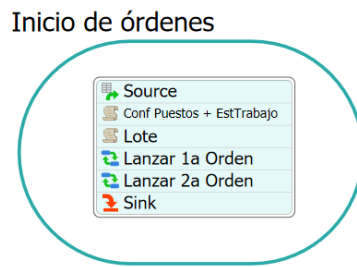


Figura 19: *PF*²⁰: Inicio de las dos primeras órdenes de fabricación. Elaboración propia.

A continuación, el *token* se desplaza al apartado de Lanzamiento de orden.

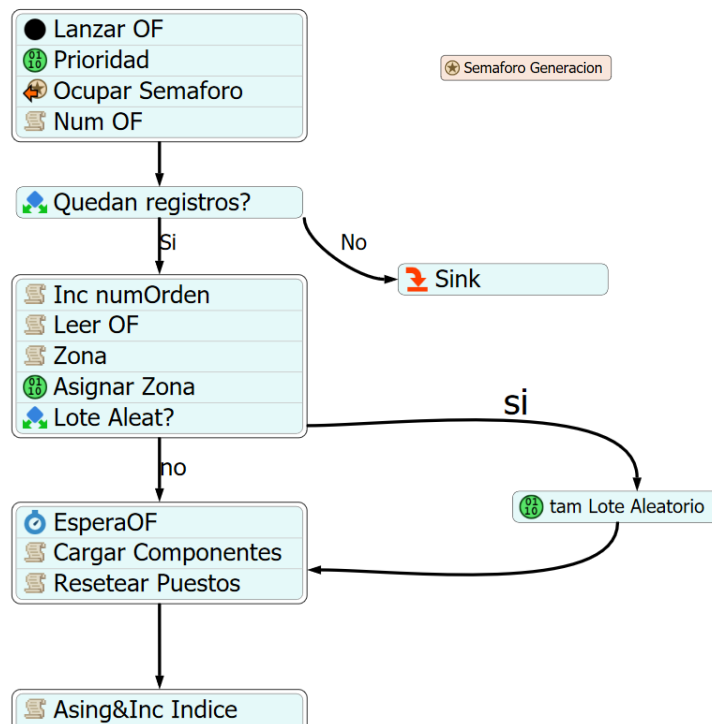


Figura 20: *PF*: Lectura de datos y relleno de las tablas pertinentes. Elaboración propia.

Se comienza asignándole al *token* el número de orden correspondiente y reiniciando la zona de trabajo a 1, ya que siempre simularemos que se comienza por esa en la línea. El código sólo continúa si el número de la orden es menor que el total de filas de la tabla donde se recogen las órdenes de fabricación programadas. Si esto ocurre, se incrementa la variable global *numOrden* y se asocian una serie de etiquetas al *token*: producto que se empaqueta, el tamaño de lote de la orden de fabricación y el tiempo según la planificación en el que se envía la orden a la línea. Estos tres campos se leen de los datos de una tabla llamada “Listado OF” que posee los datos de la muestra a analizar.

codLote	codProducto	cantidad	tDisponible	EsLarga
Código de lote	Código de producto	Nº de productos por lote	Tiempo de lanzamiento de la orden	Si el producto ocupa dos palés

Figura 21: Campos incluidos en la tabla de “Listado OF”. Elaboración propia.

²⁰ *PF*: *Process Flow*

Antes de leer los componentes del producto, se asigna la zona que se va a utilizar. Se emplea un algoritmo que determina si hay que repetir zona de colocación o no, y si hay que ocupar más de una zona o no. La repetición de la zona de colocación viene determinada por una variable global *fracRepetidos* con la que se determina a partir de cuántos componentes iguales no debemos cambiar de zona, pues es más rápido sustituir un par de palés en la línea que tener que preparar de nuevo todos los palés para un producto similar.

Una vez determinada la zona, si requiere un tiempo entre orden y orden, este se incluye como una espera y se realiza una búsqueda SQL²¹ para encontrar en el listado total de componentes y productos, los componentes necesarios que conforman el kit asociado al código de producto correspondiente.

codProducto	codComponente	sizeX	sizeY	sizeZ	EstacionTrabajo	Box	Operario	Cantidad
Código de producto	Código de componente	Largo de la pieza	Ancho de la pieza	Alto de la pieza	Código del puesto que se asigna	Secuencia de empaquetado	Código de operario asignado	Unidades por caja

Figura 22: Campos incluidos en la tabla de “Componentes”. Elaboración propia.

Para facilitar la posterior lectura de los datos, para cada orden se utiliza una tabla auxiliar llamada “ActualComponentes” en la que se volcará la búsqueda SQL realizada.

Una vez leída la orden correspondiente de fabricación, se envía dicha “orden” al almacén. En este apartado se modela de una forma diferente a la realidad pues para asegurar que siempre hay el material disponible para la consecución de la orden, al comienzo de cada una se generan los palés adecuados en las estanterías del almacén. Primero se carga en el *token* toda la información necesaria extraída de la tabla “ActualComponentes” que se ha creado para el producto que se procede a empaquetar y que se recorrerá componente a componente.

Existen 4 métodos de comprobar o crear el palé necesario:

1. Si el palé está ya en la línea y se va a reutilizar:
 - Utilizamos una lista de elementos libres que nos indica qué palés poseen elementos libres que luego se pueden reutilizar.
2. Si el palé está en inventario, es decir, en las estanterías del almacén:
 - Se le asignan las nuevas variables de la orden de fabricación correspondiente y se envía a la lista de transporte
3. Si el palé no se reutiliza ni está en inventario:
 - Se crea un nuevo palé como se explica más adelante
4. Si para cumplir el lote, los elementos que existen en la planta no son suficientes:
 - Se ejecuta un fragmento de código similar al mostrado en el número 3.

El método comienza con el cálculo del número de elementos que llevará el palé correspondiente. Ya que se asume que la base de un palé estándar europeo mide 1200x800 mm y de altura no superará el metro por cuestiones de almacenamiento dentro las estanterías y por operatividad, asumimos la dimensión del contenido como 1200x800x1000mm. Cada dimensión se dividirá a su vez por las dimensiones de las piezas de cada componente en X, Y y Z y estos valores obtenidos se multiplicarán entre sí para obtener el número de elementos:

$$nElementos = numX * numY * numZ$$

Siendo:

$$num(X, Y, Z) = \left\lfloor \frac{\text{dimensión máxima del contenido en el palé}}{\text{dimensión}(X, Y \text{ o } Z) \text{ de la pieza}} \right\rfloor$$

²¹Structured Query Language, lenguaje de consulta estructurado utilizado en la gestión de bases de datos

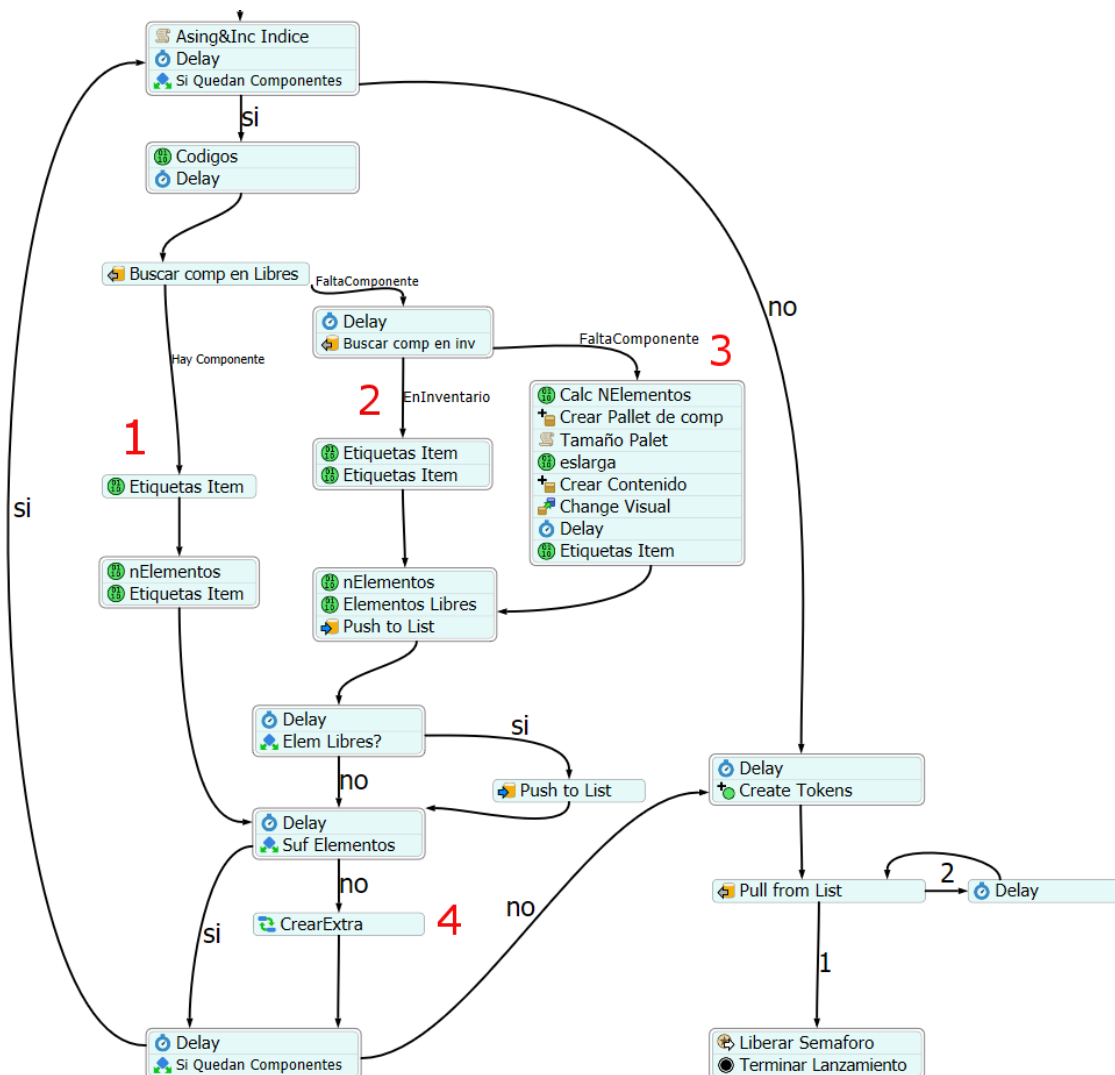


Figura 23: PF: Generación de palés para cada orden de fabricación. Elaboración propia.

Esta variable, *nElementos*, se carga dentro del palé, así como otros datos que previamente se incluyeron en el *token*. El palé se crea aleatoriamente en cualquiera de las estanterías disponibles y se incluye un fragmento de código que duplica su tamaño en el caso de que las piezas fuesen demasiado grandes y requiriesen dos palés. A su vez, se crea otro ítem dentro del palé que actuará de contenido del mismo y poseerá las dimensiones adecuadas. Aunque el propio programa permite la creación de múltiples eventos, se prefiere la creación de una única orden de fabricación por vez (utilizamos el “semáforo” para regularlo) para facilitar el acceso al mismo en otros puntos de la programación. Se ha optado por la estrategia de generar el número de palés necesarios para la consecución de la orden de fabricación desde un principio para evitar generar esa orden de “crear más palés” por medio de otros agentes.

Cuando se ejecuta el código de crear extra, se les incluye a mayores una variable *prioridad* que permite gestionar las listas más adelante para retirar de la lista los palés que tengan un menor valor de esta variable.

La colocación de las cajas se genera con otro *token* (véase el *CreateTokens* de la Figura 23) al que se le asigna el producto actual que se está empaquetando, el *box* de cajas en la

zona programada y el palé adecuado del cual el operario dedicado a la colocación de cajas tomará la que corresponde en ese momento. Debido a que en el palé en la simulación tenemos un único objeto que representa el total de elementos, debemos generar cada elemento por separado en el *box* para que el operario lo pueda coger y colocar en la línea. A medida que el palé se acaba, se simula a su vez la disminución en el nivel de contenido de forma visual y dinámica. La finalización de las cajas ocurre cuando se alcanza el número de lote. En ese momento se comprueba si el palé que contiene las cajas se va a reutilizar para la siguiente de orden de fabricación y si no, entonces se envía un *token* al código de descarga de palés y se comienza la siguiente orden de fabricación.

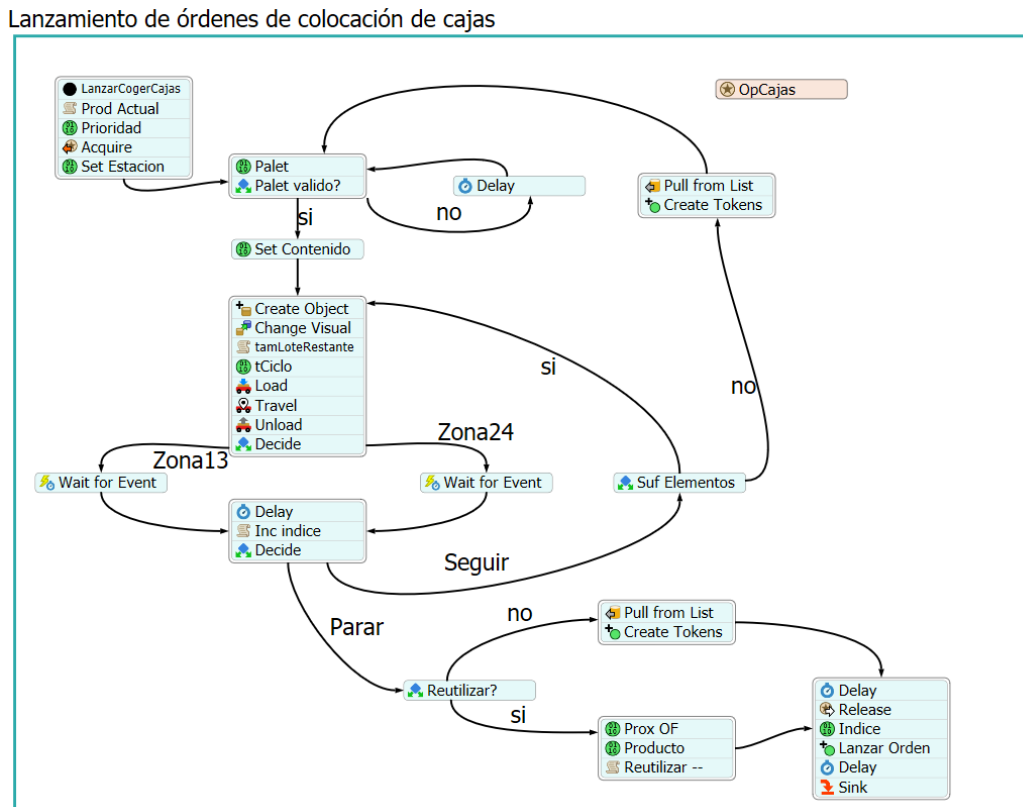


Figura 24: PF: Colocación de cajas. Elaboración propia.

En el *PF* de GeneracionOF se incluye también la lógica de las carretillas. Se ha optado por diseñar un algoritmo que compruebe en todo momento si existe un palé para transportar a la línea (utilizando la lista *Palets Pendientes*) o si hay que realizar la descarga de palés.

En el transporte a la línea se comprueba si hay palés para transportar y si los hay se le asigna. Se ha incluido la lógica en *Destino* para enviarlos a donde corresponde y que, si los *boxes* están llenos, que la carretilla pueda dejar un palé delante del mismo; un comportamiento más similar al que ocurriría en la línea real. A continuación, se utiliza la combinación *Travel-Load-Travel-Unload* utilizada para que las carretillas viajen al punto donde está el palé, carguen en la carretilla, viajen al nuevo destino del palé y lo depositen allí.

Se incluyen revisiones del destino para que, si en algún momento el palé del *box* se acabase antes de que la carretilla enviase el palé auxiliar, ésta lo mande directamente al *box* que ha quedado libre.

Después, si existe algún palé en la lista de retorno de palés (se explicará la gestión de las descargas más adelante), el *token* viaja a la siguiente parte del código. Se utiliza un código de transporte similar al anterior y se “desocupa” el *box* del que se retira el palé. Además, el

palé que se ha transportado de vuelta al almacén se incluye en la lista de Inventario y si existen palés en la lista de bloqueados, se introducen en la de pendientes. La lista de bloqueados se utiliza para gestionar esos palés que hemos creado extra pero que por motivos de espacio no se pueden transportar a la zona de la línea.

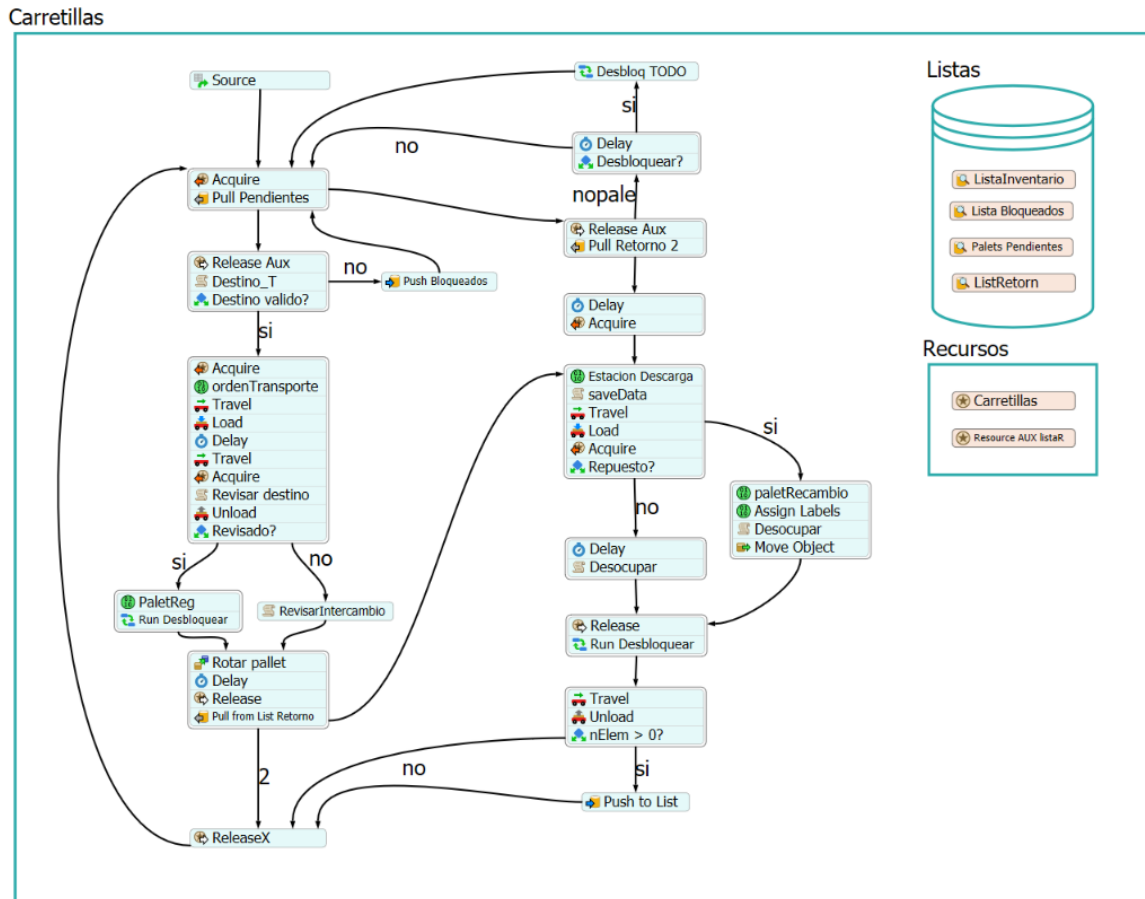


Figura 25: PF: Gestión de las tareas de las carretillas. Elaboración propia.

Después, si existe algún palé en la lista de retorno de palés (se explicará la gestión de las descargas más adelante), el *token* viaja a la siguiente parte del código. Se utiliza un código de transporte similar al anterior y se “desocupa” el *box* del que se retira el palé. Además, el palé que se ha transportado de vuelta al almacén se incluye en la lista de Inventario y si existen palés en la lista de bloqueados, se introducen en la de pendientes. La lista de bloqueados se utiliza para gestionar esos palés que hemos creado extra pero que por motivos de espacio no se pueden transportar a la zona de la línea.

El lector puede observar que existen bloques denominados *Run Desbloquear* o *Desbloq TODO*. Estos bloques son necesarios para evitar fenómenos de bloqueo de la línea generados por la interacción de los elementos del modelo. Es necesario tener en cuenta que la programación de los diferentes *Process Flow* es paralela y pueden existir combinaciones que generen situaciones de *impasse*. Ya que se utiliza el recurso de la lista de bloqueados, se busca extraer los elementos de esa lista y enviarlos a la lista de *Pendientes* para que la carretilla lo envíe al destino adecuado.

Desbloquear

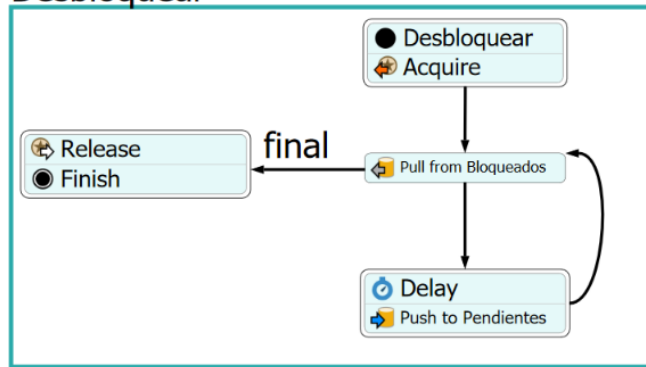


Figura 26: PF: Algoritmo de desbloqueo. Elaboración propia.

Para entender adecuadamente la descarga de palés explico a continuación la gestión de destinos de los palés que se deben descargar de la línea.

Gestión de recogida de palés

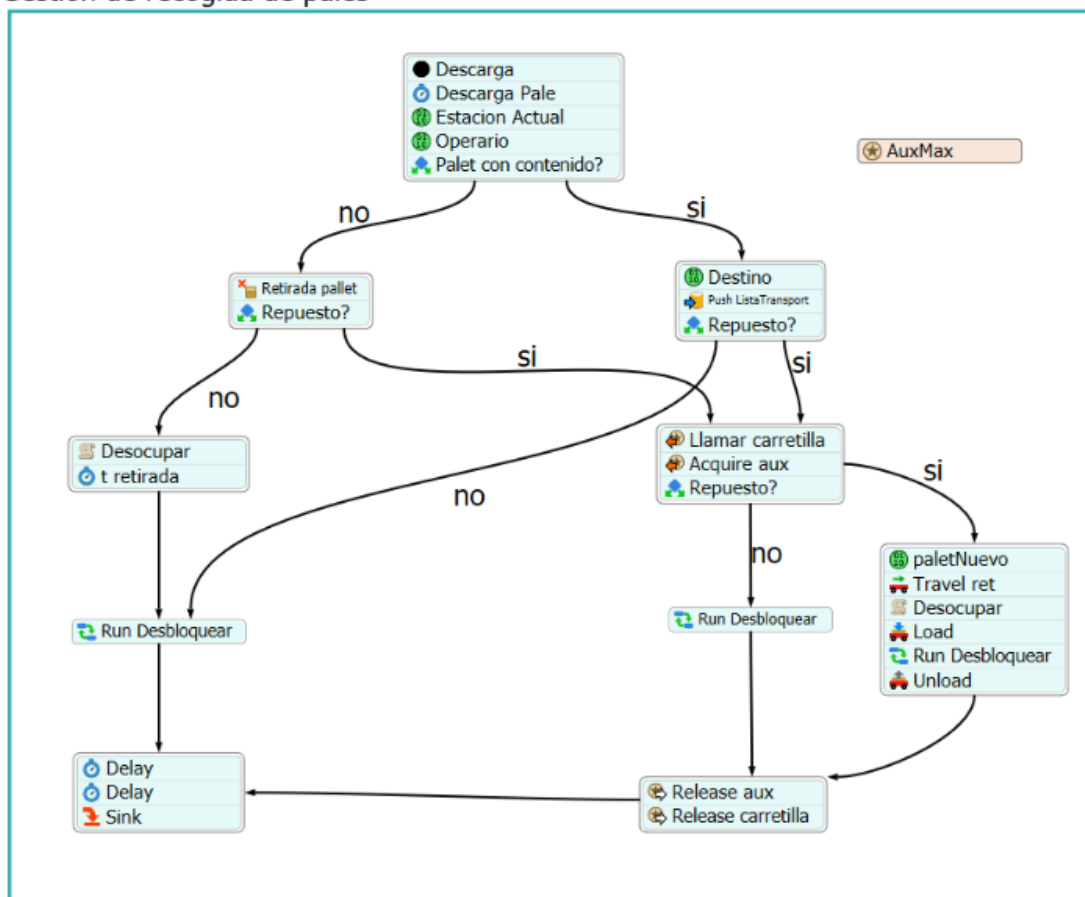


Figura 27: PF: Gestión de recogida de palés. Elaboración propia.

En los puntos en los que se activa la descarga de palés (código referente a los operarios²²), se comprueba si el palé tiene contenido o no. Si lo tiene, simplemente se le asigna aleatoriamente una estantería y se envía a la lista de *Retorno* para que la carretilla lo transporte. Si por el contrario no tiene contenido, se comprueba si el *box* auxiliar que tenemos

²²Processflow Operarios y el código representado en la Figura 32.

en el modelo está ocupado o no. En cualquiera de los casos se “destruye” el palé vacío²³ en el modelo, pero si tenemos un palé en frente al *box* descargado, la carretilla se encargará de mover el palé en el *box* liberado.

A mayores se ha incluido en el *ProcessFlow* “GeneraciónOF” lógicas que aproximan el modelo al comportamiento real de la línea.

Se simulan paradas en la línea por fallos técnicos con una distribución exponencial de media de 30 segundos utilizando el motor acoplado al *Conveyor* que: suceden por término medio cada 600s. En la práctica este tipo de paradas pueden ser causadas por múltiples razones como atascos en la línea “aguas abajo”, fallos mecánicos... entre otras incidencias. Simuladas de esta forma, representan un 5% del tiempo de simulación en que la línea está parada por estas causas.

Para ajustar la tasa de ocupación de las carretillas, se le asigna la tarea de colocar en el almacén los palés que llegan de los procesos previos de fabricación. En este caso, se crea una *Source* que emite palés siguiendo una distribución exponencial con una media de 240 segundos. La tasa de llegadas ha sido ajustada de forma que se iguale a la tasa media de salida de palés vacíos. De esta forma se simulan condiciones realistas de fabricación en que las carretillas asumen tanto la carga de trabajo que corresponde a la alimentación de la línea de empaquetado como al reabastecimiento de los stocks del almacén. Cada vez que se genera un palé, el código correspondiente (Figura 28) se ve activado y la carretilla lo distribuye a una estantería aleatoria. Ya que los palés con contenido son creados en cada orden, estos palés externos son destruidos una vez colocados en el almacén ya que sólo sirven para aumentar las tareas de las carretillas.

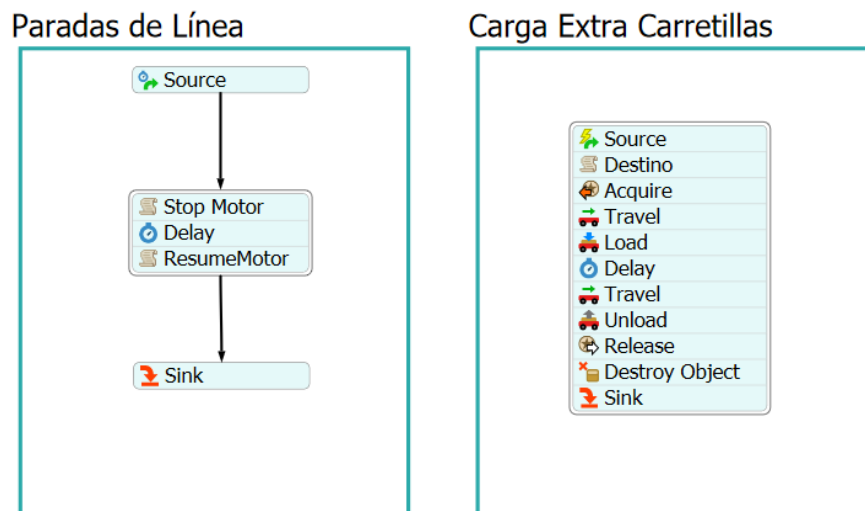


Figura 28: PF: Simulación de parada de la línea y la carga de trabajo extra de las carretillas. Elaboración propia

4.3.2 Operarios

El comportamiento de los operarios viene determinado principalmente por la activación de los sensores *photoeye* colocados en puntos estratégicos de la línea (). Se utilizan para imitar el punto en el que el operario ve que la caja está llegando y comienza a recoger las piezas del palé para tener el tiempo suficiente para ubicarla en la caja. Dicha caja, cuando está saliendo del sensor, activa el *token* correspondiente en el código. Si corresponde a la primera parte de la línea, no se comprueba si los operarios tienen que poner una pieza. Si, por el contrario, el *photoeye* activado pertenece a la segunda zona es necesario comprobar si el producto que se está colocando está aguas arriba, por lo que no sería necesaria la colocación

²³ En la realidad, los operarios retirarían el palé vacío, pero se asume esta simplificación.

de ningún elemento y la activación del sensor simplemente corresponde al paso de la caja por la cinta aguas abajo de su zona de colocación.

Ya que se ha colocado un *photoeye* asignado a un grupo de *boxes* determinado, se debe comprobar si esos *boxes* tienen el componente correspondiente que va a ser colocado. Si tiene un palé distinto o si no existe el número adecuado de elementos, la cinta se para hasta que esta situación se resuelva. Cumplidas las condiciones de existencia del material adecuado en número y tipo, el operario comienza su tarea. La lógica es similar a la utilizada en la colocación de cajas: primero se crea el componente a colocar en el *box* correspondiente y se actualiza la variable *nElementos*²⁴ en el palé y las dimensiones del contenido del mismo. A continuación, el operario simplemente tiene que coger dicha pieza creada y caminar hasta la caja.

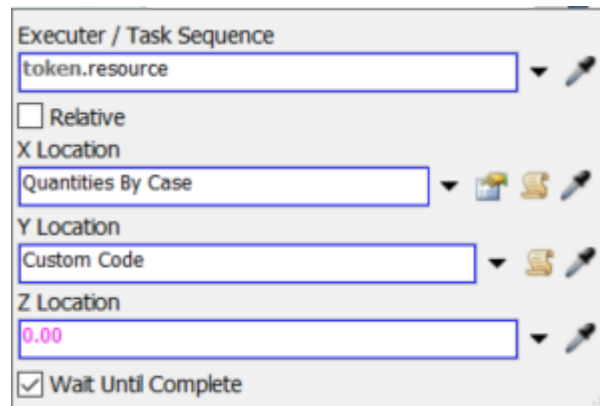


Figura 29: Interfaz de cambio de propiedades del *Travel* del operario. Elaboración propia.

La posición del operario (*token.resource*) se asigna con sus componentes X, Y y Z. La componente X varía en función de la zona de colocación ya que puede encontrarse en un lado de la línea u otro.

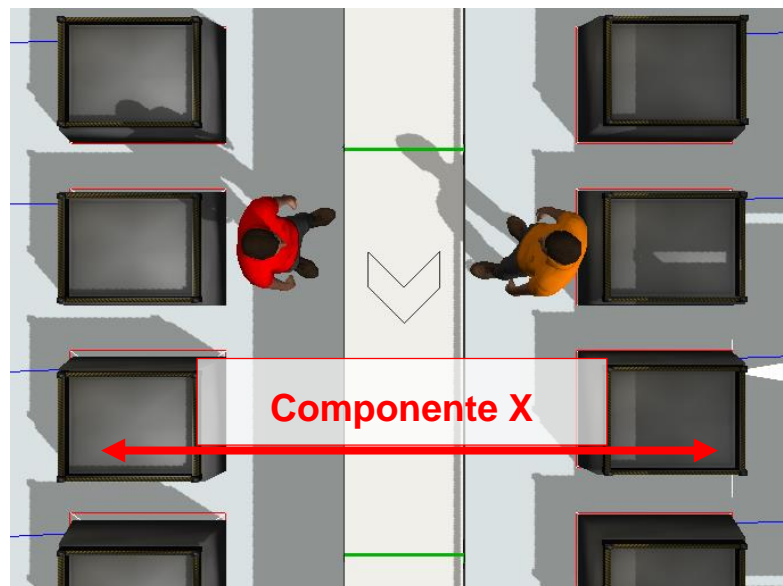


Figura 30: Colocación de los operarios en la línea. Elaboración propia.

El cálculo de la componente Y tiene algo más de complejidad pues el operario debe moverse de acuerdo al movimiento de la caja.

²⁴ Variable utilizada para llevar un registro del número de elementos de ese palé

```

8 Object op = token.resource;
9 Object it = token.itemCaja;
10
11
12 // Posición actual de la caja
13 double x_caja = 26544.67;
14 double y_caja = 0;
15 if(token.zona %2==1)
16 {
17     y_caja = 29393.33 - it.location.x;
18 }
19 else
20 {
21     y_caja = 16993.45 - it.location.x;
22 }
23
24 // Distancia en metros a la caja
25 double dist = pow((x_caja - op.location.x)/1000.0, 2.0) + pow((y_caja - op.location.y)/1000.0, 2.0);
26 dist = sqrt(dist);
27 // Tiempo para llegar a caja
28 double t = dist / 2+2;
29
30 // Coordenada y de la caja dentro de t segundos
31 return y_caja - t * 150;

```

Figura 31: Código relativo al cálculo de la componente Y del destino del operador. Elaboración propia.

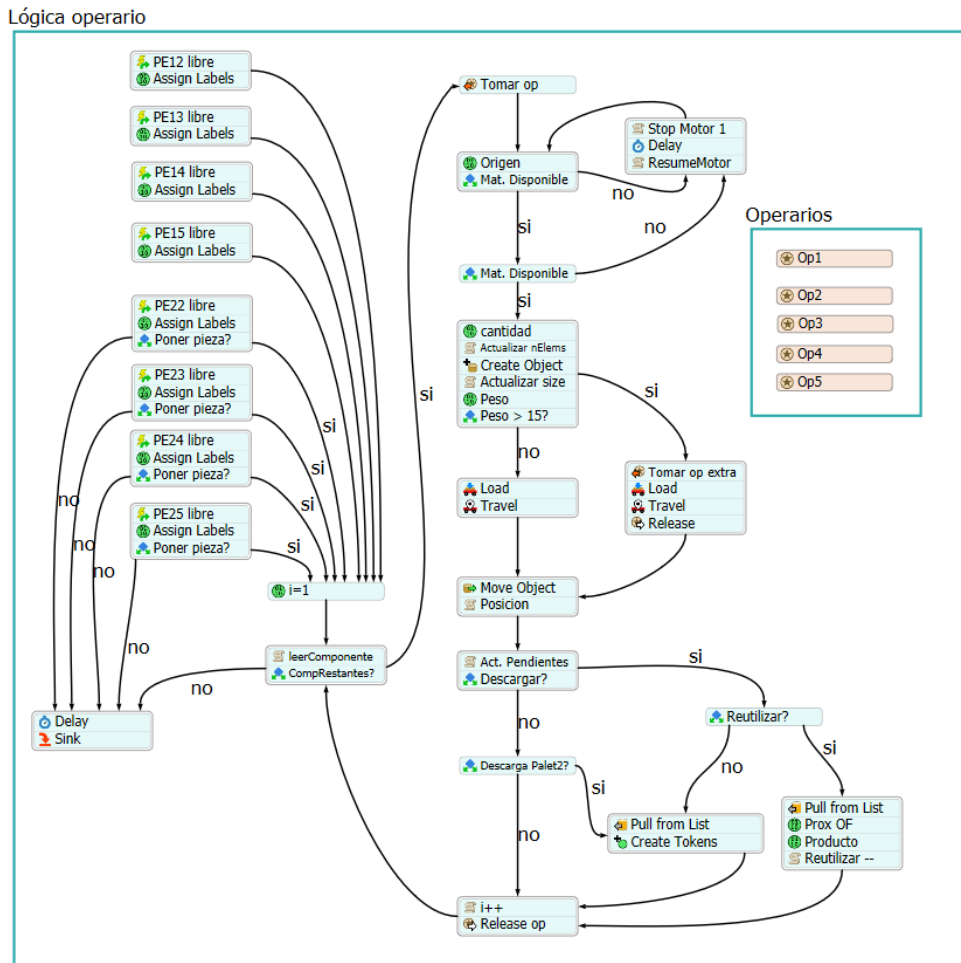


Figura 32: PF: Lógica de colocación de cajas por parte de los operarios y expulsión de palés

Las coordenadas de la caja en X e Y son el centro de la cinta transportadora (x_{caja}) y el comienzo de la misma menos la posición actual de la caja en x (y_{caja}). La distancia entre el operario y la caja se calcula utilizando algo tan elemental como el teorema de Pitágoras.

La distancia se divide por la velocidad del operario que se estima en 2 m/s y se le añade 2 segundos para calcular el tiempo que tiene el operario para llegar a la caja. Restando la posición y_{caja} menos el tiempo calculado por la velocidad de la cinta (150mm/s), obtenemos la coordenada Y de destino del operario.

Si las piezas exceden 15kg, se tratan como piezas pesadas que requieren la manipulación por dos operarios. Para ello se ha incluido un código para que los operarios se ayuden entre ellos. A efectos prácticos, simplemente paramos al operario “ayudante” durante el tiempo que dura la colocación.

A continuación, se comprueba siempre que los palés deben ser descargados y/o reutilizados y se ejecuta el código correspondiente: la descarga de palés comentada en el apartado anterior o la actualización de los códigos del producto siguiente en los palés a reutilizar.

Paralelamente a este código, se ejecuta aquel que permite parar la línea cuando al operario no le da tiempo a colocar las piezas. Se utilizan también *photoeyes* a los que se les otorga el nombre de parada y un color distinto en el modelo (azul). Ya que a cada caja le cargamos el componente que necesita, en este código sólo debemos comprobar que tiene los componentes necesarios hasta este punto.

El último *photoeye* se utiliza para comprobar si se ha acabado de empaquetar el lote correspondiente. Si esto ocurre, se ejecuta otra comprobación de finalización de las órdenes de fabricación y la simulación se para por lo que podemos obtener los datos de producción y facilita el uso del experimentador.

Comprobación de colocación

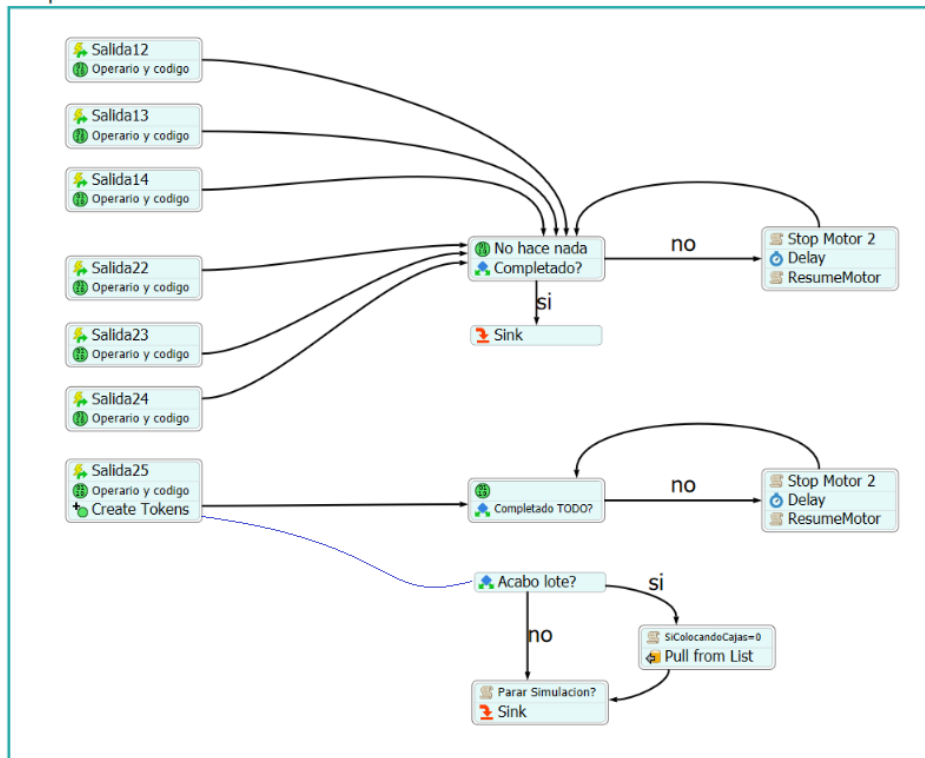


Figura 33: Para de la línea por retraso en la colocación de piezas

A mayores y como aplicación adicional, se ha incluido un interfaz de usuario proyectado para el uso de personas no familiarizadas con el uso del software ni el modelo. En la Figura 34 se observa un modelo conceptual de la interfaz que permite al usuario escoger los parámetros de configuración de los escenarios propuestos para este trabajo. Las opciones que se pueden escoger son la posibilidad de secuenciación²⁵ de las órdenes de trabajo, la fracción de componentes repetidos que se necesita para que no se establezca el cambio de zona y el parámetro de sensibilidad alfa del algoritmo. Se añade un listado de los escenarios posibles para que el usuario pueda escogerlo. Una vez pulsado el botón “Cargar Escenario”, las variables se actualizan y el modelo está listo para ser simulado.

Una interfaz de este tipo presenta una gran utilidad puesto que su implementación en el modelo facilita la interacción con el mismo. Se ha limitado a que incluir los campos más relevantes para esta simulación en concreto, pero se podría incluir aquellos que fuesen necesarios para que, de ser implantado en una planta real, se pudiese actualizar de un determinado archivo de Excel y simular día a día la carga de trabajo real de la línea.

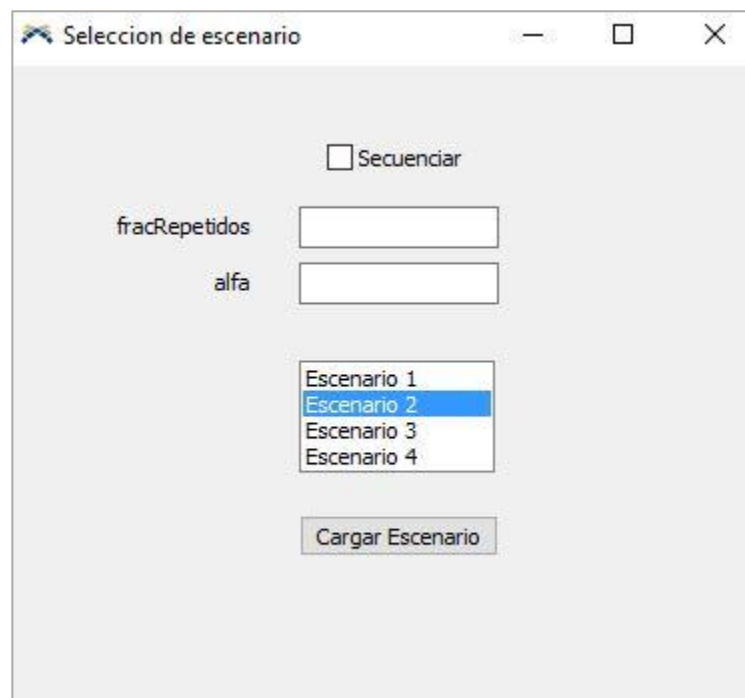


Figura 34: Modelo conceptual de la interfaz gráfica de usuario para la selección de los parámetros de configuración de los escenarios propuestos para este trabajo. Elaboración propia.

²⁵ El algoritmo se explica más adelante en el punto 5.2.2.

5 SIMULACIÓN DE ESCENARIOS

Una vez presentado el modelo base y explicado su algoritmo y su funcionamiento, se procede a comentar los resultados obtenidos con el mismo, así como las soluciones planteadas para su mejora y optimización. En los siguientes apartados, se explicarán los cambios más significativos para la implementación de la solución y las variables estudiadas para la comparación entre ambos.

5.1 Muestra de datos

Partiendo de unos datos reales, se creó una muestra descontextualizada utilizando códigos de productos y componentes distintos, al mismo tiempo que se variaron las dimensiones y los lotes reales.

Utilizando los parámetros comentados en el apartado 4.2, se estudian para ofrecer al lector una visión del modelo que se ha configurado. Se escoge una muestra cuyos componentes poseen dimensiones diversas y existe mezcla entre piezas que requieren palé simple o doble como se observa en la Figura 35.

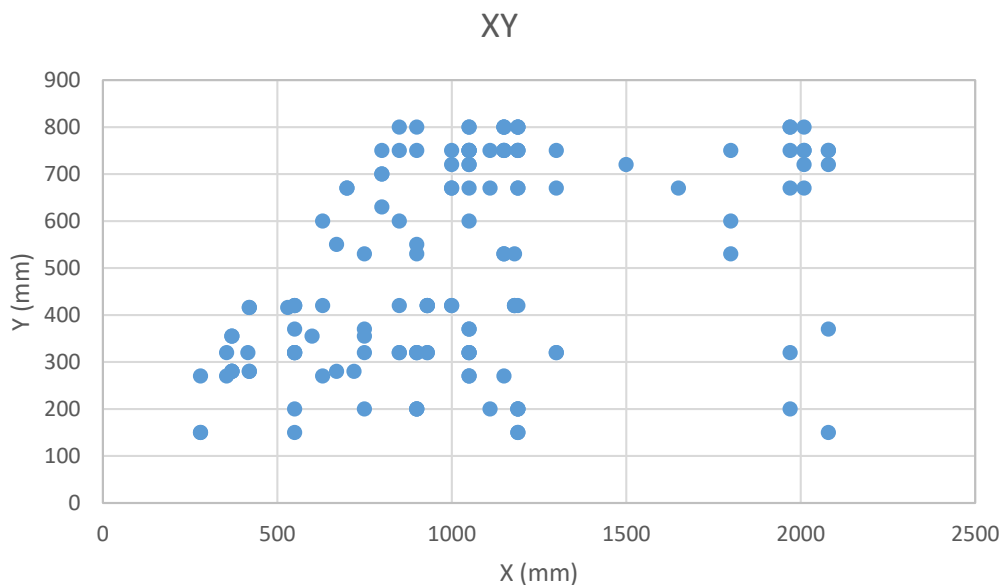


Figura 35: Gráfico de dispersión de las combinaciones de dimensiones XY de los componentes de la muestra. Elaboración propia.

La mayoría de piezas son más pequeñas que un palé, pero, como se ha mencionado, existe un porcentaje considerable de componentes grandes, por lo que se ha de tener en cuenta en el modelo, especialmente en los tiempos de los trabajadores en la colocación de piezas.

Otro parámetro que influye en la alimentación de palés a la línea es la composición de los kits. Los kits simulados contienen entre 5 y 12 componentes y pueden necesitar entre 4 y 7 palés diferentes como se observa en la Figura 36 y Figura 37.

Frecuencia Componentes Diferentes por kit

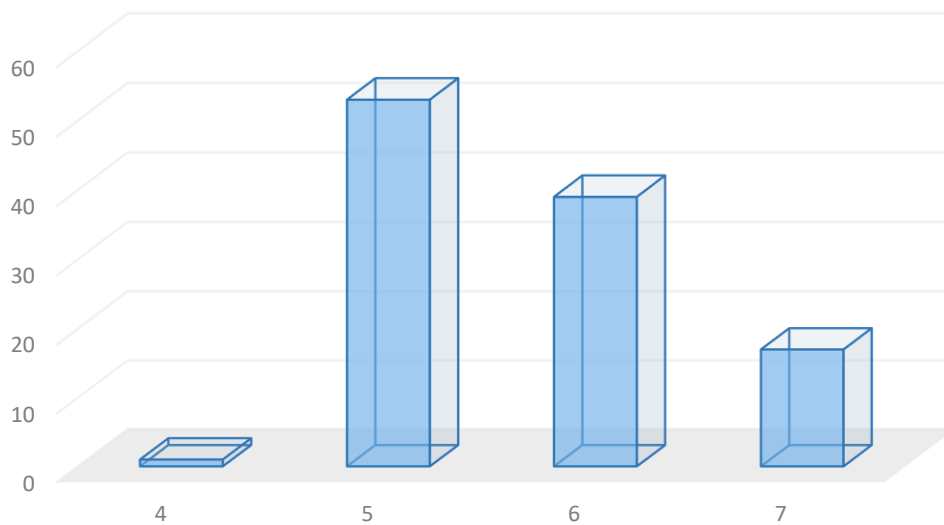


Figura 36: Histograma del número de componentes diferentes por kit. Elaboración propia.

Frecuencia Componentes por kit

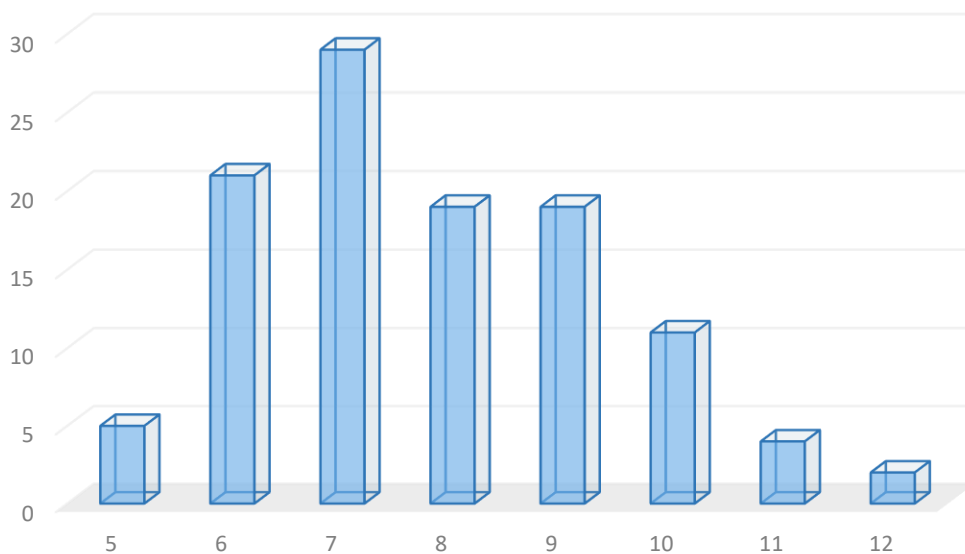


Figura 37: Histograma del número de componentes totales por kit. Elaboración propia.

Para estudiar la capacidad de la línea, se generaron unas órdenes de fabricación que combinaban kits pequeños y grandes²⁶ y otro, utilizando únicamente los pequeños. De cada escenario, se optó por utilizar una distribución exponencial de media 40 y otra de 100 para obtener una muestra realista de lotes más pequeños y otros más grandes. El uso de una distribución exponencial permite aportar una gran variabilidad y de esta forma comprobar la robustez de la línea a la hora de gestionar pedidos de diversos tamaños.

²⁶ Requiere más de un palé para almacenarse, es decir, su dimensión en X es mayor a 1200 mm.

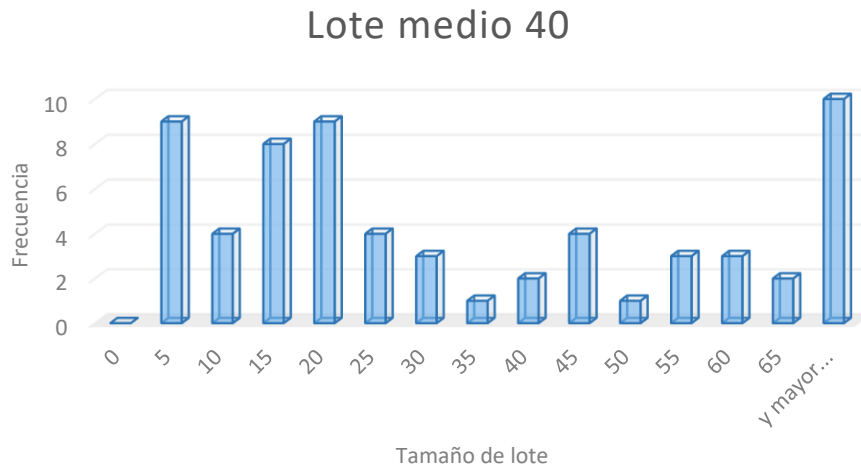


Figura 38: Histograma de los lotes con distribución exponencial y media 40. Elaboración propia.

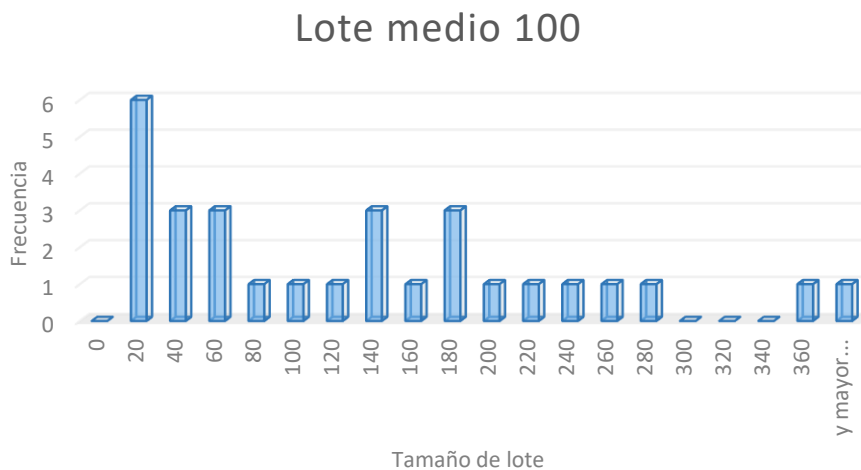


Figura 39: Histograma de los lotes con distribución exponencial y media 100. Elaboración propia.

Tabla 3: Escenarios simulados y total de la producción simulada

	Kits pequeños	Kits mixtos
Lotes pequeños	2.401	2.401
Lotes grandes	3.597	3.597

En cada escenario, ha sido necesario ajustar la generación de órdenes de trabajo de la carretilla para que la tasa de destrucción de palés se igualase a la generación de palés en la fabricación. Se simula aproximadamente la carga de trabajo de un día que cuente con 3 turnos de 8 horas (7,5 horas útiles).

5.2 Empaquetado manual

En este apartado se presentarán los resultados obtenidos mediante la experimentación con el modelo base y se cotejan con los datos reales para su validación. Se incluye otra información relevante como las tasas de ocupación de la línea y las carretillas. Además, se explica el desarrollo de un modelo de secuenciación de órdenes de fabricación y se compara con los obtenidos con la simulación de la línea actual para justificar su implementación.

5.2.1 Validación del modelo base

Los resultados de tasa de producción son los siguientes:

Tabla 4: Tasas de producción por hora para cada escenario y réplica. Elaboración propia.

		Real	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Réplica 4
Kits pequeños	Lotes pequeños	127,0	133,4	128,0	128,9	133,4
	Lotes grandes	169,1	176,6	170,7	176,8	173,2
Kits mixtos	Lotes pequeños	105,0	113,0	112,9	112,9	112,9
	Lotes grandes	152,2	164,5	162,9	163,6	163,8

En cada escenario, se realizaron 4 réplicas para comprobar la repetibilidad del experimento, y calculando el intervalo de confianza con la desviación típica, se llega a la conclusión que para realizar la experimentación sólo es necesario realizar una réplica pues el intervalo de confianza está entre el 0.1 y 1 %.

Tabla 5: Tabla comparativa entre la tasa promedio obtenida en la simulación y la tasa real del día simulado. Elaboración propia.

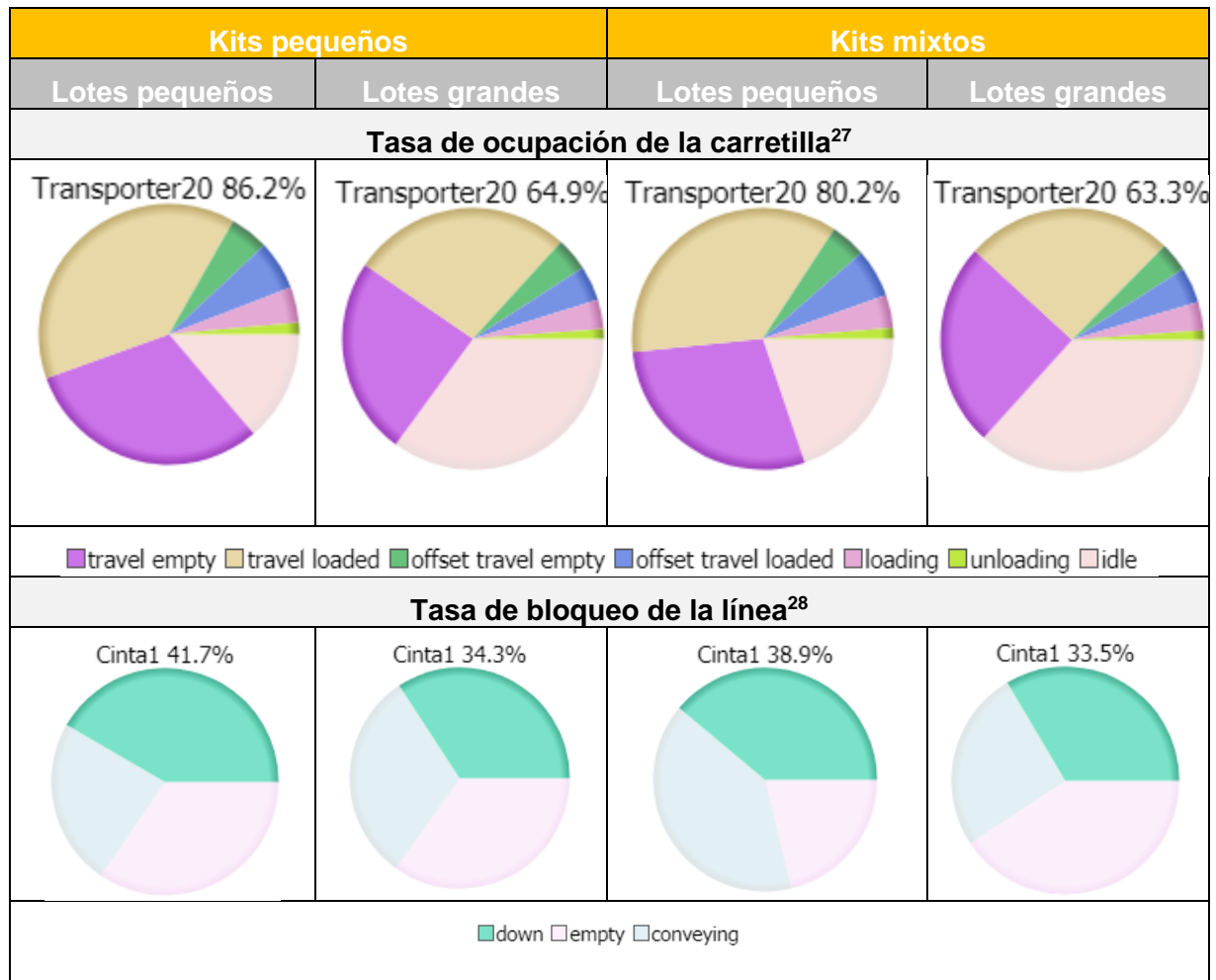
		Real	Promedio	Porcentaje
Kits pequeños	Lotes pequeños	127,0	133,4	3%
	Lotes grandes	169,1	176,6	3%
Kits mixtos	Lotes pequeños	105,0	113,0	7%
	Lotes grandes	152,2	164,5	7%

En la Tabla 5, se comparan los resultados obtenidos con la tasa promedio real con el fin de validar el modelo. Se observa que para el escenario de realizar únicamente kits pequeños, los resultados presentan una diferencia de únicamente el 3%, lo habitual en este tipo de modelos, por lo que se puede afirmar que el modelo queda validado (Williams y Ülgen 2012).

Validado el modelo se pueden extraer las primeras conclusiones. De la Tabla 4 se puede observar que el parámetro que más influye en la tasa de producción es el tamaño medio de lote. Aunque las órdenes de trabajo poseen una gran variabilidad, la tasa de producción aumenta al trabajar con pedidos mayores. El otro parámetro, la inclusión de piezas grandes

que ocupan un mayor espacio en la zona de alimentación de la línea, influye también, pues éstas ralentizan la producción tanto por el espacio físico que ocupan en la cinta como por el aumento en los tiempos de colocación por parte de los operarios y la necesidad de utilizar a más de un operario para determinadas piezas.

Tabla 6: Tasas de ocupación de la carretillas y tasa de bloqueo de la línea para los 4 escenarios propuestos. Elaboración propia.



5.2.2 Algoritmo de secuenciación de órdenes de fabricación

Vistos los resultados en el apartado anterior, y teniendo en cuenta que existen ocasiones en las que los productos son similares, pero únicamente cambia unos pocos componentes, se decide estudiar la programación automática de las órdenes de fabricación. Para ello se implementa un algoritmo que cuenta con dos reglas básicas:

1. Los productos que sean similares se fabricarán primero

Existen productos que apenas se diferencian en un par de componentes. Es lógico pensar, que resultará más eficiente cambiar únicamente un palé o dos en la línea, que preparar todos los palés para la siguiente orden de fabricación, de ahí el motivo de esta primera regla. El porcentaje de palés que se han de repetir para

²⁷ Transporter20 es el nombre asignado en el modelo a la carretilla elevadora

²⁸ Cinta1 es el nombre asignado a la cinta principal del modelo

considerar que se agrupen, es determinado por el usuario mediante la variable *fracRepetidos*.

2. Los lotes grandes y lotes pequeños se alternarán

Ya que la línea cuenta con varias zonas de alimentación de palés, se busca la alternancia entre lotes grandes y pequeños para ofrecer un tiempo suficiente a la carretilla a transportar y preparar los palés.

Como se explicó en el capítulo 5.2.2, ya que el intervalo de confianza es suficientemente bueno con muestras pequeñas, se realiza una única réplica para poder probar más escenarios en el mismo tiempo de computación. Además de la simulación de cada escenario propuesto, se estudia la influencia de la variable *fracRepetidos* y se le da 3 valores (0,25, 0,5 y 0,75).

Tabla 7: Datos producción utilizando el algoritmo de secuenciación

	<i>fracRepetidos</i>	0,25	0,5	0,75
CAJAS PEQUEÑAS	LOTES PEQUEÑOS	156,2	156,9	153,5
	LOTES GRANDES	181,4	182,0	182,7
MIXTO	LOTES PEQUEÑOS	127,2	122,9	123,2
	LOTES GRANDES	167,0	163,2	162,9

Tabla 8: Porcentaje de mejora respecto al modelo base

	<i>fracRepetidos</i>	0,25	0,5	0,75
CAJAS PEQUEÑAS	LOTES PEQUEÑOS	19%	20%	17%
	LOTES GRANDES	4%	4%	5%
MIXTO	LOTES PEQUEÑOS	13%	9%	9%
	LOTES GRANDES	2%	0%	0%

La Tabla 8 se obtiene calculando el error relativo entre el promedio de la producción real de los escenarios mostrados en la Tabla 4 y los obtenidos al secuenciar las órdenes de fabricación según el algoritmo (Tabla 7). La diferencia se aprecia en mayor medida en los escenarios de lotes más pequeños, pues la mejora de agrupar los lotes sería más acusada, y, además, existe un mayor número de órdenes de fabricación diferentes.

Estos porcentajes indican una mejora significativa y resulta un dato relevante, pues afirma que la línea puede mejorar su capacidad sin ningún tipo de inversión adicional de maquinaria o personal, únicamente teniendo en cuenta el trabajo del modelador. Además, la posibilidad de agrupar la secuenciación de las órdenes de forma automática facilita la tarea de los responsables de la producción y ahorra tiempo y esfuerzo a los mismos.

5.3 Automatización de la línea

Una vez validado el modelo base que representa la situación de una línea de carácter manual, se explora la idea de incluir sistemas automáticos para las tareas de colocación de piezas. A continuación, se describirán las soluciones adoptadas tanto cualitativamente como cuantitativamente, destacando únicamente los cambios más relevantes y aportando los datos de tasa de producción obtenidos con la experimentación. Se dividirá el estudio en dos partes diferenciadas (alimentación y colocación) y se estudiarán los parámetros significativos para finalmente ofrecer al lector un rango de soluciones obtenidas con las combinaciones

estudiadas. Debido al carácter investigador de este trabajo, no se busca ofrecer una única solución, sino establecer los objetivos y variables de diseño para una posible segunda fase del estudio que implicaría un análisis detallado de las soluciones propuestas.

5.3.1 Solución automatizada: Cobots vs. Robots industriales

Es habitual que, como se ha planteado en el Capítulo 5, las líneas que cuentan con niveles altos de demanda estén automatizadas por lo que se decide estudiar la instalación de estos sistemas. Se escoge el robot en este caso por ser un elemento automatizado con mejores características de flexibilidad para la adaptación a una línea como esta. Normalmente, este tipo de líneas suelen contar con pocos modelos o procesos y productos muy estándar. Sin embargo, este caso es diferente y por eso la elección del robot, tanto para este contexto como para otros similares, recae en las características del producto a empaquetar.

Concretamente, se podría plantear la instalación de robots colaborativos o robots industriales "tradicionales". Los argumentos, aunque expuestos anteriormente, a favor de los *cobots* son la versatilidad y la posibilidad de incluir puestos donde humanos y robots colaboren. Sin embargo, existen argumentos en contra de esta solución. Las condiciones de peso y alcance que soportan son inferiores a las de un robot no colaborativo y en igualdad de condiciones, su precio suele ser más elevado, pues requiere una programación y un sistema de sensores más complejos para la detección de personas. También, presentan velocidades menores y tiempos de ciclo más largos que los robots convencionales (Capítulo 3.4). Por este motivo, y porque actualmente existe infinidad de combinaciones y modelos existentes, se plantean a continuación soluciones utilizando robots, pero sin especificar un modelo concreto o si son *cobots* o no, dejando a la elección al lector en función del caso al que se enfrente.

5.3.2 Modelos

5.3.2.1 Modelo robótico con alimentación actual

Para esta primera solución se modifica el *layout* del modelo original, sustituyendo todos los operarios por robots excepto uno, aquel encargado de colocar las cajas. En total, se instalan 6 robots²⁹ pero se programa de tal forma que el número de robots sea una variable más (*numRobots*), función que permite la experimentación para conocer la influencia del número de robots en las tasas de producción. Cada robot tiene acceso a 4 *boxes*³⁰, dos a los lados y dos de frente y cada uno, cuenta con una zona de espera donde un operario se encargará de retirar el plástico a los palés. A parte de eso, no existen cambios significativos en el *layout*.

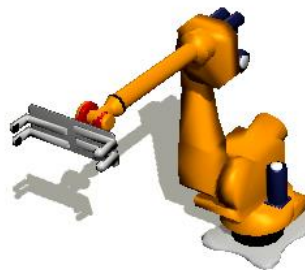


Figura 40: Imagen del robot predefinido en Flexsim. Elaboración propia.

²⁹ Se utiliza el modelo predefinido de Flexsim.

³⁰ Se realizan las conexiones mediante *Center Port* para facilitar la programación y la parametrización del modelo.

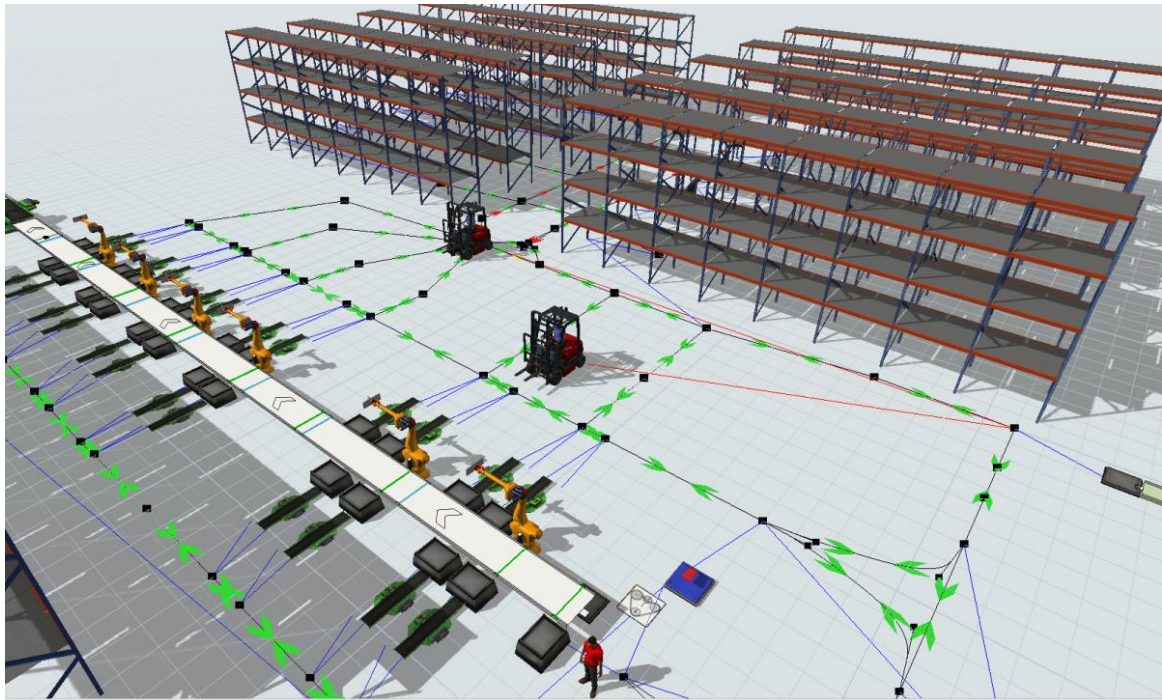


Figura 41: Vista general de la planta del modelo con alimentación actual. Elaboración propia.

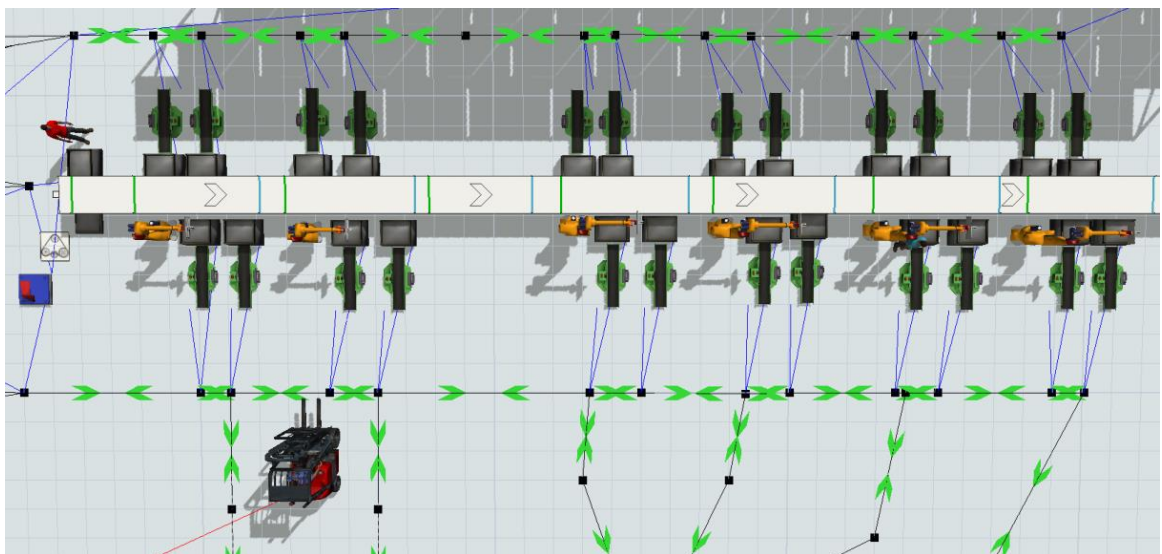


Figura 42: Vista en alzado de la línea. Elaboración propia.

En cuanto a las lógicas del modelo, simplemente se cambia la lógica de colocación de piezas, pues ahora interviene un elemento, el robot, que, aunque sí se mueve, no se desplaza como el operario. La diferencia recae en que se asume que el robot ya tiene la pieza preparada en el actuador para colocarla cuando la caja llega. A esta colocación se le asigna un tiempo de 2 segundos. Sin embargo, el tiempo de ciclo incluye la demora que le lleva al robot a desplazar su brazo al palé. Por eso, se incluye al final de la tarea de colocación un *Delay* que simula este retardo. A esta variable se le asigna el nombre de *esperaRobots* y se utiliza en la posteriormente en la experimentación con parámetro de estudio.

Lógica Robot

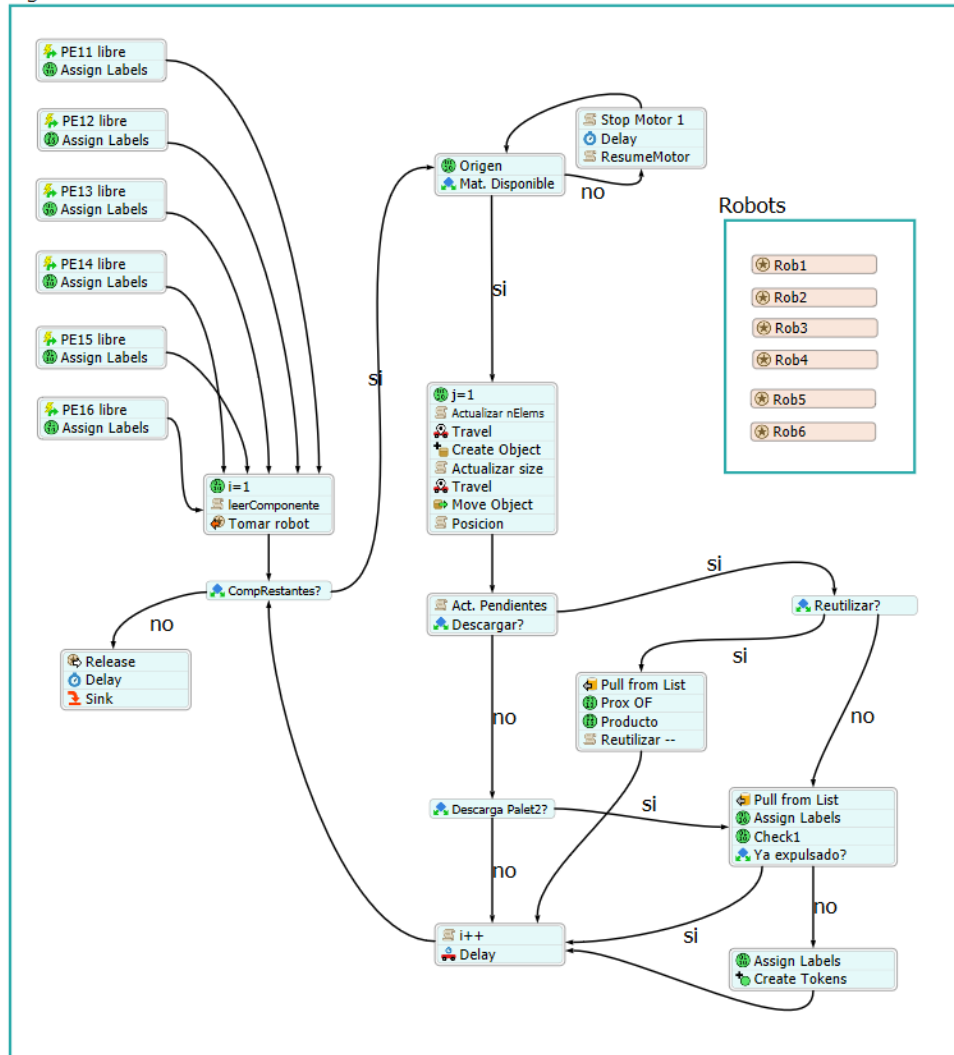


Figura 43: PF: Lógica de los robots. Elaboración propia.

5.3.2.2 Modelo robótico con alimentación actual

Tras la documentación respecto a los distintos sistemas en el mercado para este tipo de instalaciones, se opta por utilizar un elemento conocido como *shuttle* o “lanzadera”. Es un elemento que consiste en una plataforma móvil que se desplaza para distribuir los palés en los puestos necesarios.



Figura 44: Ejemplo de shuttle que reuniría las características necesarias para esta línea. (Yaskawa UK 2011)

La construcción de un modelo de tales características requirió la implementación de un nuevo elemento cuyo nombre en Flexsim es *TaskExecuter*.



Figura 45: Imagen de un TaskExecuter. Elaboración propia.

En este modelo se han diseñado dos modelos distintos, uno con un único shuttle y otro con dos shuttles³¹. En cualquiera de los casos, se prefiere utilizar un único lado de la línea para disminuir el viaje de las carretillas y establecer puntos de carga únicos para las mismas

³¹ Se incluye el código del modelo con dos *shuttle* por ser más completo. Contar con un solo, supone simplemente unos pequeños cambios en la programación de las lógicas del *PF*.

que estén próximos a la zona de almacén. Se incluye un *buffer*, que en la realidad sería una mesa de rodillos, que actúa a modo de *buffer* y como puesto de retirada de plástico del palé por parte de un operario.

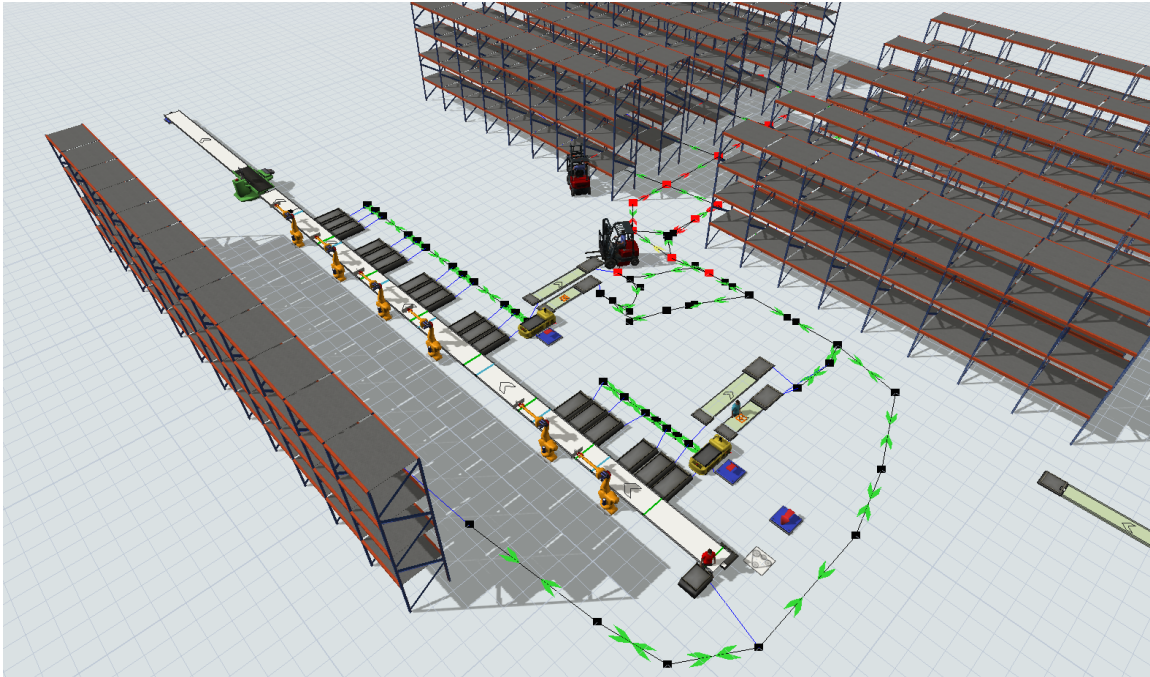


Figura 46: Vista general de la planta del modelo utilizando 2 shuttle. Elaboración propia.

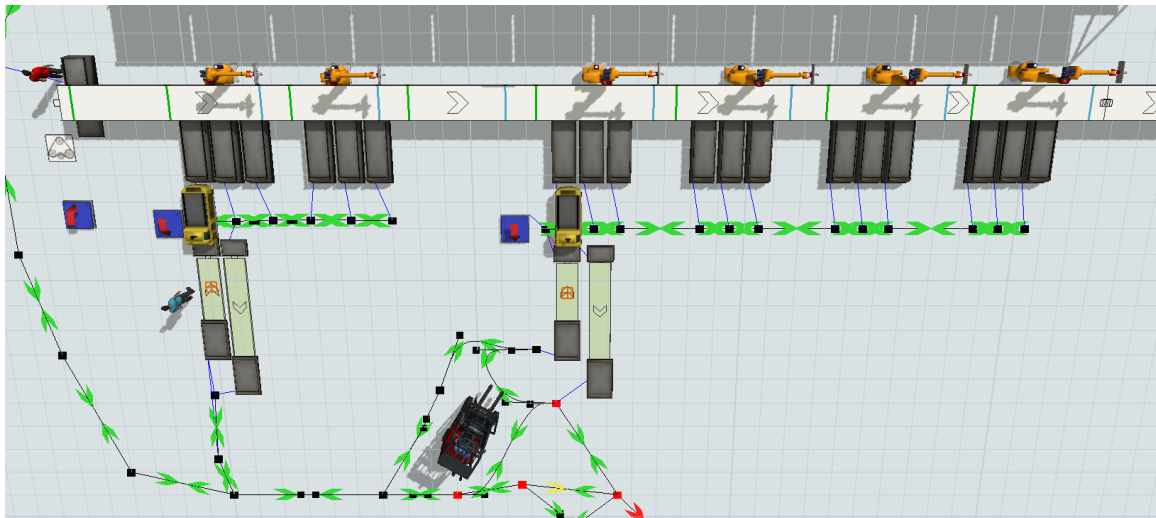


Figura 47: Vista en alzado del modelo utilizando shuttle. Elaboración propia.

En este caso, también se configura el modelo para que el número de robots sea una variable con posibilidad de ser estudiada y se mantienen las lógicas utilizadas en el modelo con alimentación por carretilla. Sin embargo, al incluir un elemento nuevo (*shuttle*), también es necesario programar su lógica de transporte y cambiar la de la gestión de la descarga de palés.

Carga shuttle

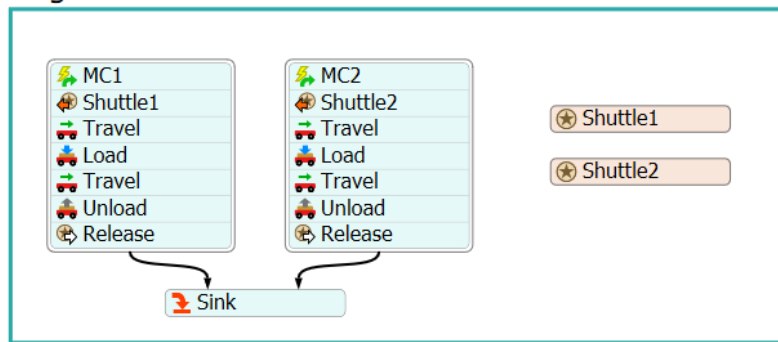


Figura 48: PF: Lógica de transporte de palets a la línea por parte del shuttle. Elaboración propia.

Las carretillas en este caso tienen un punto fijo de carga (*MesaCarga*). Si el modelo cuenta con dos *shuttle* el envío a una (*MesaCarga1*) u otra (*MesaCarga2*), depende de la mesa de carga a la que el palet es destinado. Una vez el palet llega a dichas “Mesas”, se activa el código de la Figura 48. El *shuttle* se desplaza hasta la mesa, carga el palet y los transporte a su destino en la línea. Gracias a la documentación y los medios audiovisuales disponibles en la red, se estima una velocidad del *shuttle* de 50m/min y un tiempo de carga o descarga de 15 segundos.

Además de transportar los palets a la línea, el *shuttle* también ejecuta las labores de descarga de palets. La orden de descarga se genera en el *ProcessFlow* “Operarios” (explicado en el capítulo 4.3) y activa el código que se muestra en la Figura 49.

Descarga shuttle

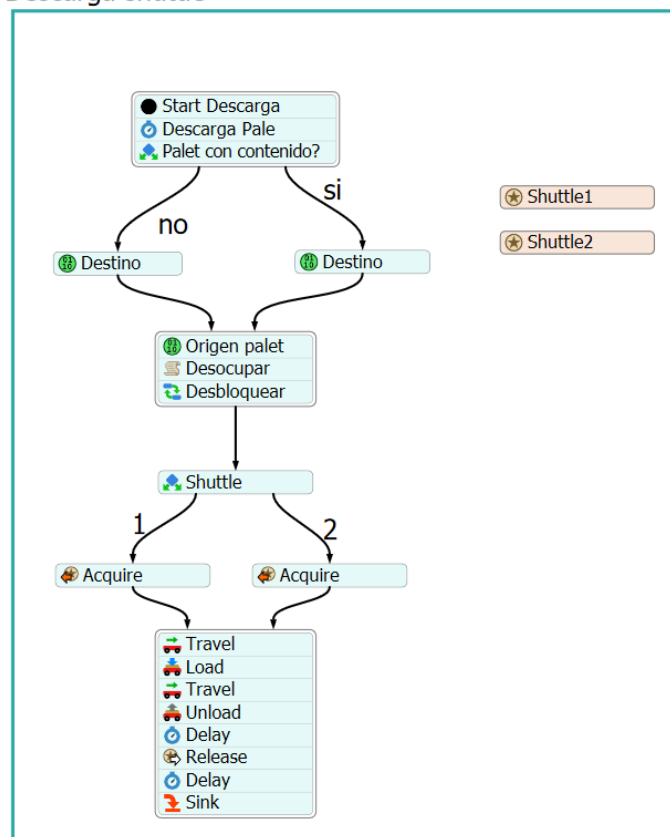


Figura 49: Gestión de la descarga de palets por parte de los shuttle. Elaboración propia.

La primera comprobación requiere conocer el número de elementos del palé a retirar. Si está vacío, el *shuttle* lo transporta un área asignada para ese fin. De lo contrario, lo traslada hacia otro tipo de mesas, las mesas de salida (*MesaSalida1*, *MesaSalida2*). Como se observa en la Figura 49, se ha incluido el código de “Desbloqueo” explicado anteriormente. La interacción entre carretillas, línea (robots + operario) y el *shuttle* aumenta las posibilidades de bloqueo de la línea, por lo que este tipo de código adquiere mayor importancia.

Una vez el palé llega a estas mesas de salida, se envía dicho palé a la lista de transporte para que las carretillas lo recojan y lo muevan a las estanterías del almacén.

Gestión descarga

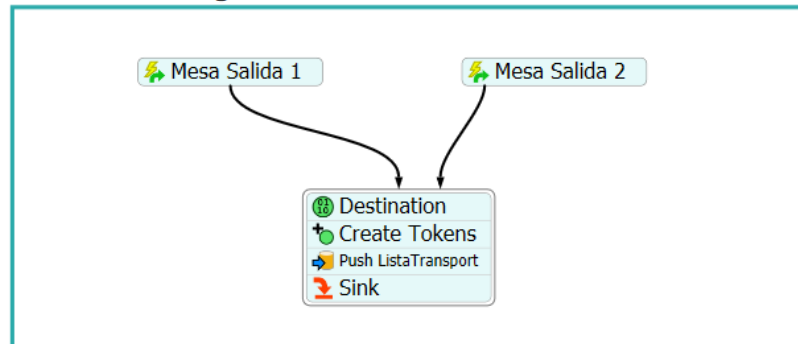


Figura 50: Gestión de la descarga por parte de las carretillas y asignación de destino. Elaboración propia.

5.3.3 Experimentación

Sin embargo, la exclusiva instalación de sistemas robóticos no asegura una tasa de producción superior y constante, pues este tipo de líneas poseen dos problemáticas separadas. Por un lado, está la alimentación del material a la línea que debe ser secuenciada y en un tiempo adecuado, y por otro lado, la propia colocación de las piezas, que marca la velocidad del robot. Por este motivo, se realiza un análisis por separado, para determinar por un lado cuáles son las ventajas y desventajas de los sistemas de alimentación propuestos y por otro lado, el número de robots necesarios y sus parámetros para la consecución de una tasa adecuada de producción que justifique la inversión en estos sistemas.

En cualquiera de los estudios se ha optado por utilizar el algoritmo de secuenciación descrito con un valor bajo del parámetro *fracRepetidos* (0.25), que favorece que se tiendan a agrupar productos en lotes con componentes iguales.

5.3.3.1 Estudio de la alimentación de la línea

En primer lugar, una cuestión a resolver es determinar la capacidad de alimentación de la línea de empaquetado que proporcionan los sistemas propuestos. Este primer paso del análisis busca determinar los rangos de operación en que, para automatizar la línea, se hace necesario actuar sobre la alimentación.

Por ello, se decide eliminar cualquier elemento que pueda resultar un cuello de botella excepto los elementos encargados de la alimentación de material a la línea (carretillas y *shuttle*). Es decir, para todos los elementos, excepto los que forman parte del sistema de alimentación, se garantiza que tengan velocidades suficientes, para que el cuello de botella del sistema se localice en la alimentación. Podríamos hablar en este caso de una línea con capacidad “infinita” pues se les atribuye a los robots unos tiempos de 0.01 segundos para la colocación de piezas y la velocidad de la línea es 4,5 veces la actual (450mm/s).

Tabla 9: Tasas de producción de kits por hora en el estudio de la alimentación de la línea.

		ESCENARIO ROBOTS SIN SHUTTLE	ESCENARIO ROBOTS CON SHUTTLE	PORCENTAJE MEJORA
CAJAS PEQUEÑAS	LOTES PEQUEÑOS	151	381	152%
	LOTES GRANDES	269	878	226%
MIXTO	LOTES PEQUEÑOS	144	482	233%
	LOTES GRANDES	257	903	251%

De las cuatro soluciones propuestas, se comparan la que tiene la alimentación exclusivamente con 2 carretillas con la que cuenta con también 2 carretillas y 2 shuttles a mayores. Según la Tabla 9, la instalación del *shuttle* supone una mejora significativa para cualquiera de las muestras de datos planteadas. Para un mismo escenario se observa que funciona mejor para lotes más grandes, lo cual es lógico, pues tanto los *shuttle* como las carretillas deben realizar menos viajes. Por otra parte, se distingue una mayor mejora para el escenario que combina cajas grandes y pequeñas. Podría suceder que en el escenario sin *shuttle* los robots tuvieran acceso a 4 mesas de palés, pero si las piezas son grandes sólo tienen acceso a 2. Sin embargo, en la distribución que sí lo incluye, los palés disponen de 3 mesas en las que caben una pieza larga en cada una. De esta forma, en el caso de estos kits más grandes, la posibilidad de tener un *buffer* más grande, supone una mejora sustancial.

5.3.3.2 Estudio de la preparación de kits

En este caso, se escogen unos parámetros de línea realistas. Por ejemplo, a la línea se le asigna una velocidad de 200mm/s, que sería suficiente para el movimiento de las piezas dentro de la zona de alcance de cada robot. Aunque en la simulación, este movimiento se realiza con una velocidad constante, en la práctica, dependiendo del modelo de caja de cartón empleada, podría ser conveniente emplear un sistema de rodillos con velocidad variable que mantuviera la caja inmóvil mientras el robot coloca la pieza, y que la expulsara una vez completada la colocación acelerándola hacia la siguiente zona. Desde el punto de vista del modelo de simulación, ambas configuraciones son equivalentes siempre y cuando la ventana de tiempo de la caja en el puesto de empaquetado sea idéntica.

El parámetro fundamental en este proceso son los tiempos de ciclo de los robots. Estos tiempos dependen de las características del mismo, su posicionamiento, la distancia recorrida y el tipo de manipulador empleado. En la práctica se encuentran multiplicidad de diseños optimizados para cada línea. Ya que el objeto de este trabajo no es entrar en los detalles de diseño de la celda robótica sino hacer un estudio desde el punto de vista operativo. En este trabajo se muestra un análisis de sensibilidad de las tasas de producción a los tiempos de ciclo en combinación con el número de robots de la línea.

En el caso de los robots y, tras observar vídeos de diversos robots industriales realizando tareas similares, se establece una horquilla de sus tiempos de ciclo entre 4 y 16 segundos para cubrir un rango amplio y factible que nos permita determinar las variables de más peso.

Estos tiempos de ciclo se usan para recoger diversas opciones de configuración que se podrían emplear con los robots:

- Un robot puede tener un tiempo de ciclo largo (del orden de 16 segundos) realizando un movimiento en que coja las piezas de un componente para una caja.
- Este mismo robot se puede hacer más rápido alcanzando tiempos de ciclo menores. Como referencia, se han observado robots de paletizado con tiempos de ciclo de hasta 5 segundos.
- Otra alternativa para incrementar la productividad del robot puede ser emplear un manipulador más complejo que permite coger las piezas suficientes para colocar en dos cajas a la vez, aunque a costa necesariamente de encarecer el diseño del actuador.



Figura 51: Ejemplo de manipulador que permite colocar cuatro piezas simultáneamente. (Yaskawa UK 2011)

En cuanto al número de robots de la línea, se prueban escenarios entre 3 y 6 robots para que, en función de la tasa de producción buscada, se pueda dimensionar la línea.

Dada la multiplicidad de opciones abiertas, el resultado que mayor valor aporta en esta etapa es el análisis de sensibilidad que permite determinar los tiempos de ciclo y número de robots necesarios para alcanzar determinados objetivos de producción.

Las siguientes tablas presentan las tasas de producción por hora para cada distribución en planta y variando el número de carretillas y de *shuttle*.

En primer lugar, el lector puede observar que existen escenarios que no cuentan con ningún valor. Este hecho sucede sobre todo en los escenarios que cuentan únicamente con 3 robots. El bloqueo de la línea da muestra de que este es el caso más desfavorable y la línea no es capaz de producir las órdenes de fabricación adecuadas. Este hecho tiene sentido para el escenario sin *shuttle*, especialmente para las muestras de cajas grandes, pues los robots, como se ha explicado anteriormente, cuentan con menos mesas de carga preparadas para piezas grandes que, por ejemplo, en los escenarios que sí incluye el *shuttle*. En el caso del *shuttle*, el número de bloqueos es menor por este motivo y en ocasiones puntuales con pocos robots que presentan tiempos de ciclo elevados.

En segundo lugar, y como se explicado antes, se prueba a duplicar de la capacidad de los sistemas de alimentación (carretillas y *shuttle*) para cada *layout*. Incluir dicha variación permite el estudio comparativo de la mejora entre utilizar una carretilla o dos y el mismo caso con los *shuttle*. En este último *layout*, se asume que para suplir dos *shuttle* con dos puntos de

carga diferentes, son necesarias dos carretillas elevadoras. En la Tabla 12 y Tabla 15, se comprueba que existen combinaciones en los que existe una mejora del 103% en el caso de la alimentación sin *shuttle* y 66% con *shuttle*. En el escenario sin *shuttle* se observa que el incremento es más elevado, cuanto menor tiempo de ciclo tengan los robots, lo cual tiene sentido, pues ya en el modelo base manual, en los escenarios de lotes pequeños, la carretilla presentaba una alta tasa de ocupación. Un hecho que podría desconcertar al lector es el empeoramiento de las tasas de mejora en la inclusión de dos carretillas y dos *shuttle* para ciertos escenarios. Pero este resultado carece de relevancia práctica ya que entra dentro de la variabilidad estadística de las propias simulaciones. Naturalmente al tratarse de una simulación estocástica, un resultado puede ser algo diferente de otro, pero en este caso, por valores que presentan los resultados, la diferencia no estadísticamente significativa.

Tabla 10: Tasas de producción por hora para el escenario con robots y alimentación actual mediante una carretilla. Elaboración propia.

ESCENARIO ROBOTS SIN SHUTTLE (una carretilla)						
KITS PEQUEÑOS						
LOTES PEQUEÑOS						
TIEMPO DE CICLO	4	6	8	12	14	16
<i>esperaRobots</i>	2	4	6	10	12	14
3 Robots	154	152	143	124	113	105
4 Robots	151	148	146	135	128	119
5 Robots	151	148	149	149	146	142
6 Robots	145	144	146	145	147	144
LOTES GRANDES						
TIEMPO DE CICLO	4	6	8	12	14	16
<i>esperaRobots</i>	2	4	6	10	12	14
3 Robots	270	243	205	143	-	-
4 Robots	267	265	237	190	169	151
5 Robots	270	268	254	218	196	177
6 Robots	263	260	260	244	224	206
MIXTO						
LOTES PEQUEÑOS						
TIEMPO DE CICLO	4	6	8	12	14	16
<i>esperaRobots</i>	2	4	6	10	12	14
3 Robots	-	-	-	-	-	-
4 Robots	175	-	-	-	-	-
5 Robots	173	172	166	138	125	115
6 Robots	169	169	168	155	147	137
LOTES GRANDES						
TIEMPO DE CICLO	4	6	8	12	14	16
<i>esperaRobots</i>	2	4	6	10	12	14
3 Robots	-	-	-	-	-	-
4 Robots	264	-	-	-	-	-
5 Robots	260	257	248	207	188	172
6 Robots	253	253	251	232	220	205

Tabla 11: Tasas de producción por hora para el escenario con robots y alimentación actual mediante dos carretillas. Elaboración propia.

ESCENARIO ROBOTS SIN SHUTTLE (dos carretillas)						
KITS PEQUEÑOS						
LOTES PEQUEÑOS						
TIEMPO DE CICLO	4	6	8	12	14	16
<i>esperaRobots</i>	2	4	6	10	12	14
3 Robots	285	244	205	149	130	115
4 Robots	290	268	237	181	159	142
5 Robots	298	298	280	235	212	191
6 Robots	295	291	286	281	264	241
LOTES GRANDES						
TIEMPO DE CICLO	4	6	8	12	14	16
<i>esperaRobots</i>	2	4	6	10	12	14
3 Robots	402	289	222	151	130	-
4 Robots	467	382	302	206	177	155
5 Robots	487	428	355	243	210	191
6 Robots	499	486	419	295	254	223
MIXTO						
LOTES PEQUEÑOS						
TIEMPO DE CICLO	4	6	8	12	14	16
<i>esperaRobots</i>	2	4	6	10	12	14
3 Robots	-	-	-	-	-	-
4 Robots	266	259	-	-	-	-
5 Robots	277	270	262	215	190	180
6 Robots	267	269	266	241	222	204
LOTES GRANDES						
TIEMPO DE CICLO	4	6	8	12	14	16
<i>esperaRobots</i>	2	4	6	10	12	14
3 Robots	-	-	-	-	-	-
4 Robots	427	386	279	190	164	144
5 Robots	446	404	340	238	206	181
6 Robots	464	460	412	293	253	222

Tabla 12: Porcentaje relativo de diferencia entre las tasas de producción por hora para el escenario con robots y alimentación actual mediante una y dos carretillas. Elaboración propia.

ESCENARIO ROBOTS SIN SHUTTLE						
KITS PEQUEÑOS						
LOTES PEQUEÑOS						
TIEMPO DE CICLO	4	6	8	12	14	16
<i>esperaRobots</i>	2	4	6	10	12	14
3 Robots	-	-	-	-	-	-
4 Robots	92%	81%	63%	34%	25%	19%
5 Robots	97%	102%	88%	58%	45%	35%
6 Robots	103%	101%	96%	94%	79%	67%
LOTES GRANDES						
TIEMPO DE CICLO	4	6	8	12	14	16
<i>esperaRobots</i>	2	4	6	10	12	14
3 Robots	49%	19%	8%	5%	-	-
4 Robots	75%	44%	27%	8%	5%	3%
5 Robots	80%	60%	40%	11%	7%	8%
6 Robots	90%	87%	61%	21%	13%	8%
MIXTO						
LOTES PEQUEÑOS						
TIEMPO DE CICLO	4	6	8	12	14	16
<i>esperaRobots</i>	2	4	6	10	12	14
3 Robots	-	-	-	-	-	-
4 Robots	52%	-	-	-	-	-
5 Robots	60%	57%	58%	56%	51%	57%
6 Robots	58%	60%	58%	56%	51%	49%
LOTES GRANDES						
TIEMPO DE CICLO	4	6	8	12	14	16
<i>esperaRobots</i>	2	4	6	10	12	14
3 Robots	-	-	-	-	-	-
4 Robots	61%	-	-	-	-	-
5 Robots	72%	57%	37%	15%	10%	5%
6 Robots	84%	82%	64%	27%	15%	8%

Tabla 13 Tasas de producción por hora para el escenario con robots y alimentación mediante un *shuttle* y una carretilla. Elaboración propia.

ESCENARIO ROBOTS CON SHUTTLE (una carretilla)						
KITS PEQUEÑOS						
LOTES PEQUEÑOS						
TIEMPO DE CICLO	4	6	8	12	14	16
<i>esperaRobots</i>	2	4	6	10	12	14
3 Robots	220	191	167	130	117	106
4 Robots	262	238	211	168	151	136
5 Robots	273	272	258	222	202	185
6 Robots	264	262	260	240	214	203
LOTES GRANDES						
TIEMPO DE CICLO	4	6	8	12	14	16
<i>esperaRobots</i>	2	4	6	10	12	14
3 Robots	365	268	210	146	-	-
4 Robots	465	375	299	204	176	155
5 Robots	503	435	352	241	208	183
6 Robots	537	518	432	297	255	223
MIXTO						
LOTES PEQUEÑOS						
TIEMPO DE CICLO	4	6	8	12	14	16
<i>esperaRobots</i>	2	4	6	10	12	14
3 Robots	217	191	165	129	115	104
4 Robots	247	236	216	177	162	146
5 Robots	254	250	240	208	191	176
6 Robots	249	250	244	224	208	193
LOTES GRANDES						
TIEMPO DE CICLO	4	6	8	12	14	16
<i>esperaRobots</i>	2	4	6	10	12	14
3 Robots	338	256	204	144	-	-
4 Robots	428	349	275	189	163	144
5 Robots	451	404	339	239	206	181
6 Robots	489	483	411	294	254	222

Tabla 14: Tasas de producción por hora para el escenario con robots y alimentación mediante dos shuttles y dos carretilla. Elaboración propia.

ESCENARIO ROBOTS CON SHUTTLE (2 carretillas)						
KITS PEQUEÑOS						
LOTES PEQUEÑOS						
TIEMPO DE CICLO	4	6	8	12	14	16
<i>esperaRobots</i>	2	4	6	10	12	14
3 Robots	268	222	179	137	118	107
4 Robots	344	310	264	200	175	155
5 Robots	374	356	319	243	210	195
6 Robots	352	349	330	269	259	240
LOTES GRANDES						
TIEMPO DE CICLO	4	6	8	12	14	16
<i>esperaRobots</i>	2	4	6	10	12	14
3 Robots	378	274	214	146	-	-
4 Robots	472	366	282	191	164	143
5 Robots	506	443	356	241	207	181
6 Robots	538	527	438	297	255	223
MIXTO						
LOTES PEQUEÑOS						
TIEMPO DE CICLO	4	6	8	12	14	16
<i>esperaRobots</i>	2	4	6	10	12	14
3 Robots	283	228	190	140	123	110
4 Robots	370	315	258	182	159	140
5 Robots	422	401	353	256	222	166
6 Robots	394	391	352	312	270	203
LOTES GRANDES						
TIEMPO DE CICLO	4	6	8	12	14	16
<i>esperaRobots</i>	2	4	6	10	12	14
3 Robots	401	284	219	149	-	-
4 Robots	512	397	306	206	177	155
5 Robots	536	460	362	244	210	184
6 Robots	589	560	445	298	255	224

Tabla 15: Porcentaje relativo de diferencia entre las tasas de producción por hora para el escenario con robots y alimentación actual mediante shuttle y carretillas. Elaboración propia

ESCENARIO ROBOTS CON SHUTTLE						
KITS PEQUEÑOS						
LOTES PEQUEÑOS						
TIEMPO DE CICLO	4	6	8	12	14	16
<i>esperaRobots</i>	2	4	6	10	12	14
3 Robots	22%	16%	7%	5%	1%	1%
4 Robots	31%	30%	25%	19%	16%	14%
5 Robots	37%	31%	23%	9%	4%	5%
6 Robots	33%	33%	27%	12%	21%	18%
LOTES GRANDES						
TIEMPO DE CICLO	4	6	8	12	14	16
<i>esperaRobots</i>	2	4	6	10	12	14
3 Robots	4%	2%	1%	0%	-	-
4 Robots	2%	-3%	-5%	-7%	-7%	-7%
5 Robots	1%	2%	1%	0%	-1%	-1%
6 Robots	0%	2%	1%	0%	0%	0%
MIXTO						
LOTES PEQUEÑOS						
TIEMPO DE CICLO	4	6	8	12	14	16
<i>esperaRobots</i>	2	4	6	10	12	14
3 Robots	31%	19%	16%	9%	7%	6%
4 Robots	50%	33%	20%	3%	-2%	-4%
5 Robots	66%	60%	47%	23%	17%	-5%
6 Robots	58%	57%	45%	39%	30%	5%
LOTES GRANDES						
TIEMPO DE CICLO	4	6	8	12	14	16
<i>esperaRobots</i>	2	4	6	10	12	14
3 Robots	18%	11%	8%	4%	-	-
4 Robots	20%	14%	11%	9%	8%	8%
5 Robots	19%	14%	7%	2%	2%	2%
6 Robots	21%	16%	8%	1%	1%	1%

A continuación, se muestra la relación de las variables estudiadas para cada *layout* y un mismo escenario de órdenes de fabricación (kits de cajas pequeñas y lotes grandes). Como se puede observar que, para todos los modelos, al disminuir el número de robots la tasa de producción disminuye, excepto en un caso particular. Para tiempos de ciclo cortos el cuello de botella es claramente la carretilla, pues es lógico que presente tasas de ocupación elevadas y por eso apenas existe diferencias entre los valores de las tasas de producción por hora.

Otra variable a estudiar es la variación de los tiempos de ciclo. Al aumentar los tiempos, la tasa de producción decae. Sin embargo, esta relación no es lineal y existen puntos en los que la variación es mayor. Hay combinaciones de factores que cuando actúan conjuntamente multiplican el efecto sobre el incremento sobre la tasa de producción.

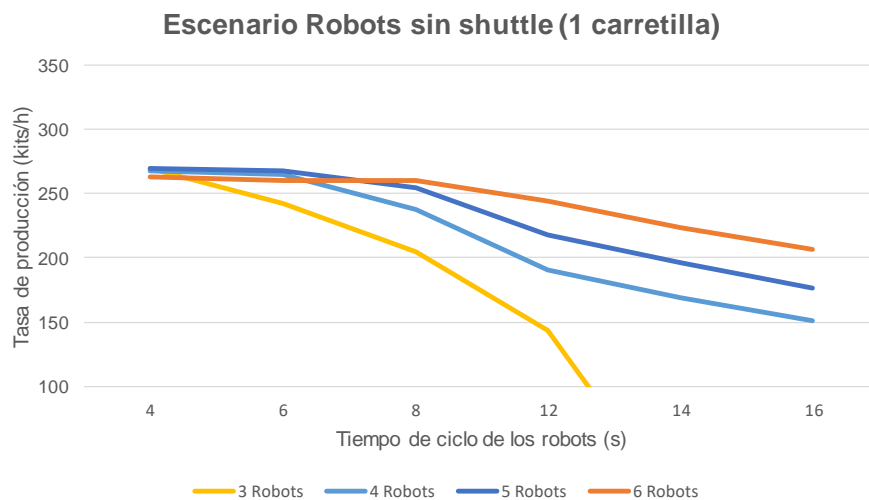


Figura 52: Variación de la tasa de producción de para el escenario con robots y alimentación sin shuttle con una única carretilla. Elaboración propia.

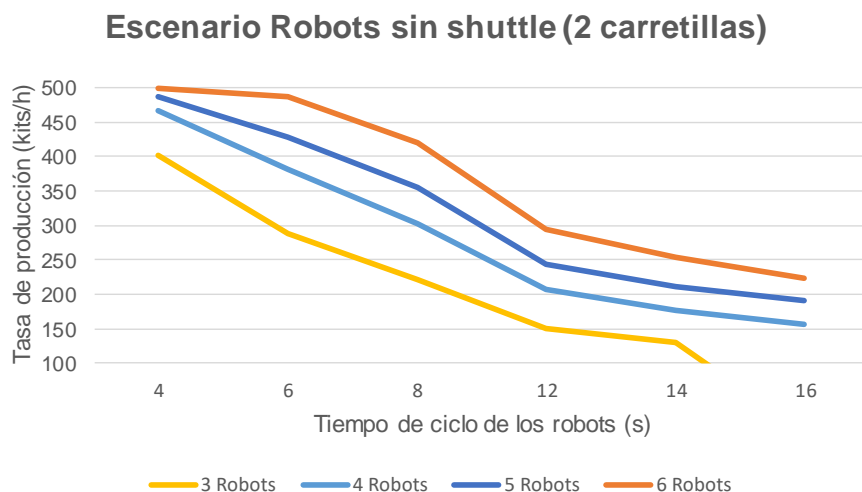


Figura 53: Variación de la tasa de producción de para el escenario con robots y alimentación sin shuttle con dos carretillas. Elaboración propia.

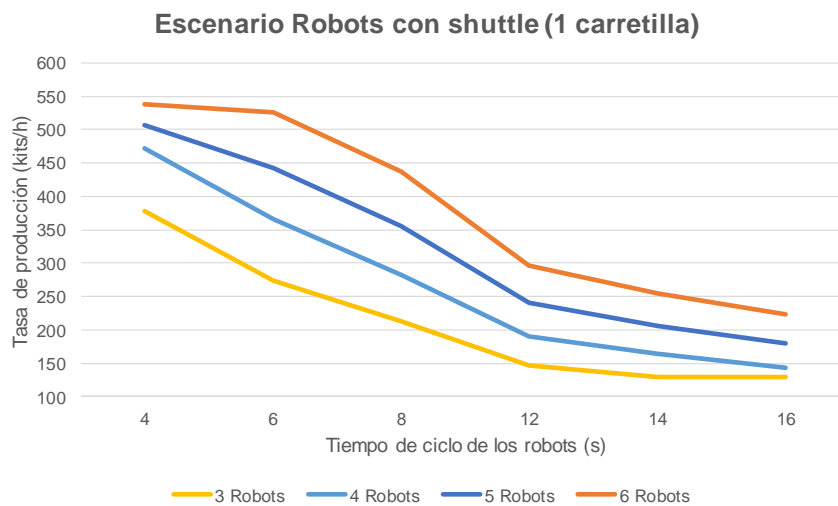


Figura 54: Variación de la tasa de producción de para el escenario con robots y alimentación con shuttle con una única carretilla. Elaboración propia.

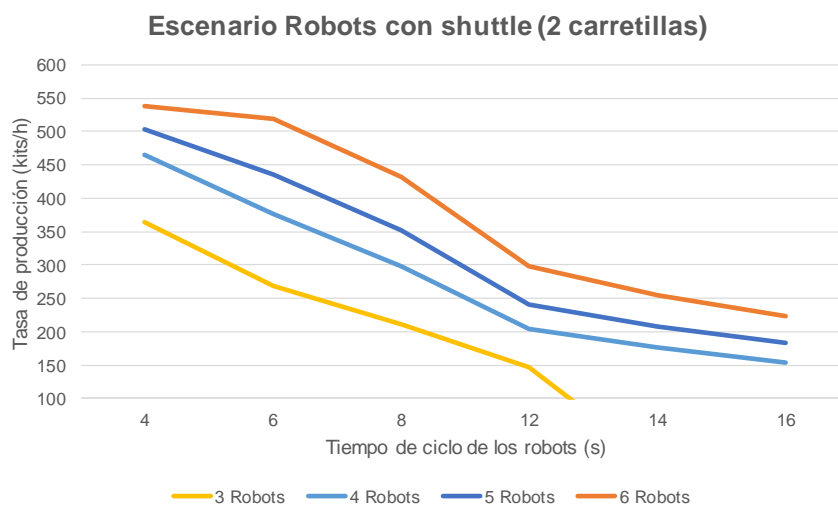


Figura 55: Variación de la tasa de producción de para el escenario con robots y alimentación con 2 shuttles con dos carretillas. Elaboración propia.

Por último, para ejemplificar la mejora que supondría incluir este tipo de sistemas respecto a la línea manual se incluye a continuación los porcentajes de mejora en las tasas de producción para cada *layout*. Se compara únicamente con los escenarios que cuentan con una única carretilla por ser el mismo número que se utilizó en ese modelo.

Se observa que el mayor incremento se produce, en general, en el escenario con *shuttle*, por lo que la hipótesis en el análisis realizado con una línea sin restricciones en los robots se confirma.

Por otro lado, es evidente que, si dispone de un número de robots insuficiente y tiempos de ciclo elevados, la línea puede perder tasa de producción, como se muestra en las tablas.

En este sentido, un resultado importante de la simulación es identificar las configuraciones de robots y alimentación que tienen sentido en esta línea para unas tasas de producción objetivo y una determinada inversión y facilitar la toma de decisiones.

Tabla 16: Porcentaje de mejora en la tasa de producción por hora en el escenario sin shuttle respecto al modelo base sin secuenciar. Elaboración propia.

ESCENARIO ROBOTS SIN SHUTTLE (1 carretilla)						
KITS PEQUEÑOS						
LOTES PEQUEÑOS						
TIEMPO DE CICLO	4	6	8	12	14	16
<i>esperaRobots</i>	2	4	6	10	12	14
3 Robots	16%	14%	7%	-7%	-15%	-21%
4 Robots	13%	11%	9%	1%	-4%	-11%
5 Robots	13%	11%	12%	12%	9%	6%
6 Robots	9%	8%	10%	9%	10%	8%
LOTES GRANDES						
TIEMPO DE CICLO	4	6	8	12	14	16
<i>esperaRobots</i>	2	4	6	10	12	14
3 Robots	53%	37%	16%	-19%	-	-
4 Robots	51%	50%	34%	8%	-4%	-15%
5 Robots	53%	52%	44%	23%	11%	0%
6 Robots	49%	47%	47%	38%	27%	17%
MIXTO						
LOTES PEQUEÑOS						
TIEMPO DE CICLO	4	6	8	12	14	16
<i>esperaRobots</i>	2	4	6	10	12	14
3 Robots	-	-	-	-	-	-
4 Robots	55%	-	-	-	-	-
5 Robots	53%	52%	47%	22%	11%	1%
6 Robots	49%	49%	48%	37%	30%	21%
LOTES GRANDES						
TIEMPO DE CICLO	4	6	8	12	14	16
<i>esperaRobots</i>	2	4	6	10	12	14
3 Robots	-	-	-	-	-	-
4 Robots	61%	-	-	-	-	-
5 Robots	58%	56%	51%	26%	14%	4%
6 Robots	54%	54%	53%	41%	34%	24%

Tabla 17: Porcentaje de mejora en la tasa de producción por hora en el escenario con shuttle respecto al modelo base sin secuenciar. Elaboración propia.

ESCENARIO ROBOTS CON SHUTTLE (1 carretilla)						
KITS PEQUEÑOS						
LOTES PEQUEÑOS						
TIEMPO DE CICLO	4	6	8	12	14	16
<i>esperaRobots</i>	2	4	6	10	12	14
3 Robots	65%	43%	25%	-2%	-12%	-20%
4 Robots	96%	78%	58%	26%	13%	2%
5 Robots	104%	104%	93%	66%	51%	39%
6 Robots	98%	97%	95%	80%	61%	52%
LOTES GRANDES						
TIEMPO DE CICLO	4	6	8	12	14	16
<i>esperaRobots</i>	2	4	6	10	12	14
3 Robots	107%	52%	19%	-17%	-	-
4 Robots	163%	113%	69%	16%	0%	-12%
5 Robots	185%	146%	99%	37%	18%	3%
6 Robots	204%	193%	145%	68%	45%	27%
MIXTO						
LOTES PEQUEÑOS						
TIEMPO DE CICLO	4	6	8	12	14	16
<i>esperaRobots</i>	2	4	6	10	12	14
3 Robots	92%	69%	46%	14%	2%	-8%
4 Robots	119%	109%	91%	57%	44%	29%
5 Robots	125%	121%	113%	84%	69%	55%
6 Robots	121%	121%	116%	98%	84%	70%
LOTES GRANDES						
TIEMPO DE CICLO	4	6	8	12	14	16
<i>esperaRobots</i>	2	4	6	10	12	14
3 Robots	106%	56%	24%	-13%	-	-
4 Robots	160%	112%	67%	15%	-1%	-13%
5 Robots	174%	146%	106%	45%	25%	10%
6 Robots	197%	194%	150%	79%	54%	35%

6 CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

6.1 CONCLUSIONES

Se consideran alcanzados los objetivos propuestos al comienzo del presente pues no sólo se ha desarrollado un modelo para el análisis de una línea de empaquetado manual utilizando el software de simulación de eventos discretos en 3D *Flexsim*, sino que se han estudiado mejoras mediante la introducción de sistemas automáticos.

El modelo presenta un carácter paramétrico con el fin de poder ser utilizado para diferentes productos y exigencias de la demanda. Dicho modelo es validado utilizando los datos de la muestra testada y la precisión es muy elevada llegando en algunos casos a niveles de error del 3%. La parametrización de este modelo permite el empleo por parte de personal no familiarizado con el mismo para ayudar en la planificación diaria de una planta similar e incluso, podría llegar a integrarse con el ERP (Enterprise Resource Planning) de la propia empresa y automatizar el proceso.

Asimismo, se cumple el segundo de los objetivos expuestos en este trabajo que es la propuesta y estudio de mejoras, incluyendo sistemas automáticos en la planta. Sin embargo, la primera mejora planteada no incluye ningún sistema automático físico, sino lógico: la secuenciación automática de órdenes de fabricación. Esta solución supone un incremento en la tasa de producción de hasta un 20% dependiendo de las características de demanda y de los productos manipulados, sin que esto suponga ningún tipo de inversión adicional.

Dentro de los sistemas automáticos físicos observados en la búsqueda bibliográfica inicial, se escogen dos elementos diferenciados para aportar el material a la línea incorporando un *shuttle* y para colocar las piezas en las cajas mediante robots. La utilización de la herramienta *Flexsim* para simular estas propuestas ofrece la posibilidad de examinar los parámetros significativos y conocer de antemano el comportamiento de los sistemas a la hora de satisfacer la demanda.

Se han considerado dos escenarios simulados: en primer lugar, la incorporación de robots exclusivamente y, en segundo lugar, la adición a mayores de un sistema *shuttle* para alimentación de palés a la línea. En cada caso, se ha simulado la duplicación de la capacidad de los sistemas de alimentación (carretillas y *shuttle*) para comprobar su efecto. Para cada distribución en planta y para cada muestra de datos de órdenes de fabricación (un total de 4), se han realizado 96 simulaciones correspondientes a la combinación de la variación del número de robots y del tiempo de ciclo de los mismos.

Como conclusión final, los resultados de este trabajo proporcionan una información fundamental para guiar las posibles etapas posteriores de diseño del sistema automatizado. En este sentido, el modelo permite conocer de antemano las condiciones de los puestos robóticos y del sistema de alimentación que permitirán el logro de los objetivos de producción que se establezcan previamente.

6.2 TRABAJO FUTURO

Como continuación de este trabajo, se abren las siguientes líneas de desarrollo con resultados esperables a corto, medio y largo plazo.

De forma inmediata, este trabajo proporciona un modelo aplicable a una línea real con la posibilidad de integrarse con el ERP de la propia empresa para poder hacer la simulación de la carga de trabajo real a medida que está disponible. Para ello sería necesario la capacitación del personal en el manejo del software y del modelo y la depuración del mismo para ajustar a diferencias mínimas entre el valor real y el valor simulado. Una vez lograda la implantación exitosa del mismo, el modelo podría ser utilizado para la planificación diaria, el control de la producción e incluso se podría llegar a su uso como ayuda en la negociación y el establecimiento de plazos en los pedidos de clientes.

A medio plazo, otra potencialidad de los modelos que incluyen los sistemas automáticos es la posibilidad de utilizarlo de forma iterativa en la posterior fase de diseño para probar las decisiones que se tomen en esta etapa. Esto evita las pruebas físicas que ralentizan el proceso de diseño y aumentan el coste del proyecto.

Siguiendo la línea de simulación de eventos discretos, se podría proponer la creación de un modelo que incluyese la gestión de stocks dentro de la línea actual o incluso ampliar dicha simulación a fases previas de fabricación que englobasen a la totalidad de la fábrica.

A largo plazo, una vez automatizada la línea, el modelo podría constituir la base para el control del funcionamiento global de la planta y lograr que ésta opere según los principios de la *Smart Factory*.

7 BIBLIOGRAFÍA

- AMAZON, 2017. Amazon Robotics. [en línea]. [Consulta: 4 julio 2017]. Disponible en: <https://www.amazonrobotics.com/#/>.
- BADGER, L., PATT-CORNER, R., VOAS, J., BADGER, L., PATT-CORNER, R. y VOAS, J., 2012. Cloud Computing Synopsis and Recommendations Recommendations of the National Institute of Standards and Technology. [en línea]. S.I.: Disponible en: <http://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/SP/nistspecialpublication800-146.pdf>.
- BANKS, JERRY, CARSON, JHON S., NELSON, BARRY L., NICOL, D.M., 2005. *Discrete-Event System Simulation* [en línea]. 4. S.I.: Pearson/Prentice Hall. ISBN 0131293427. Disponible en: <http://syndetics.com/index.php?isbn=0131293427/lc.jpg&client=brlibt&type=xw12>.
- CRESPO PEREIRA, D., 2013. *Modelos de Series Temporales para la Simulación de Procesos Industriales*. S.I.: Universidade Da Coruña.
- DE KOSTER, R.B.M., 2008. Warehousing in the Global Supply Chain. [en línea], no. May. DOI 10.1007/978-1-4471-2274-6. Disponible en: <http://link.springer.com/10.1007/978-1-4471-2274-6>.
- DE KOSTER, LE-DUC, T. y ROODBERGEN, K.J., 2007. Design and control of warehouse order picking : A literature review. , vol. 182, pp. 481-501. DOI 10.1016/j.ejor.2006.07.009.
- GOETSCHALCKX, M. y ASHAYERI, J., 1989. Classification and design of order picking systems. *Logistics Information Management*, vol. 2, no. 2, pp. 99-106.
- HANNOVER MESSE, 2016. Robot or cobot: The five key differences. [en línea]. [Consulta: 9 julio 2017]. Disponible en: <http://www.hannovermesse.de/en/news/robot-or-cobot-the-five-key-differences.xhtml>.
- HERMANN, M., PENTEK, T. y OTTO, B., 2016. Design principles for industrie 4.0 scenarios. *Proceedings of the Annual Hawaii International Conference on System Sciences*, vol. 2016-March, pp. 3928-3937. ISSN 15301605. DOI 10.1109/HICSS.2016.488.
- INTERNATIONAL FEDERATION OF ROBOTICS, 2016. *Executive Summary World Robotics 2016 Industrial Robots* [en línea]. 2016. Frankfurt am Main: s.n. Disponible en: <http://www.eu-nited.net/robotics/news-events/robotics-news/world-robotics-2016-industrial-robots.html>.
- ISO, 2012. ISO 8373:2012 (en) Robots and robotic devices - Vocabulary. [en línea]. [Consulta: 11 junio 2017]. Disponible en: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:8373:ed-2:v1:en>.
- KAGERMANN, H., WAHLSTER, W. y HELBIG, J., 2013. Recommendations for Implementing the Strategic Initiative INDUSTRIE 4.0: Final report of the Industrie 4.0 Working Group. . S.I.:
- KUKA, 2017a. Hello Industrie 4.0 _Glossary. . Augsburg:
- KUKA, 2017b. *KUKA Robotics_Range*. 2017. S.I.: s.n.
- LINGLE, R., 2015. Experts provide guidance for robots and cobots in packaging. *Packaging Digest* [en línea]. [Consulta: 9 julio 2017]. Disponible en: <http://www.packagingdigest.com/robotics/industry-experts-guidance-ino-robotics-cobots4packaging1512>.
- LU, Y., 2017. Industry 4.0: A Survey on Technologies, Applications and Open Research Issues. *Journal of Industrial Information Integration* [en línea], ISSN 2452414X. DOI 10.1016/j.jii.2017.04.005. Disponible en: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2452414X17300043>.

- MACDOUGALL, W. (GTAI), 2014. *Industrie 4.0: Smart Manufacturing for the Future. Germany Trade and Invest* [en línea]. S.l.: Disponible en: <http://books.google.de/books?id=eecgRH28dMsC>.
- MECALUX ESMENA, 2016. *Pallet Shuttle: Sistema de almacenaje compacto semiautomático y automático de alto rendimiento* [en línea]. 2016. Barcelona: s.n. Disponible en: <https://mecaluxes.cdnwm.com/catalogos-de-las-soluciones-de-almacenaje/sistema-pallet-shuttle.1.4.pdf>.
- MOURTZIS, D., DOUKAS, M. y BERNIDAKI, D., 2014. Simulation in manufacturing: Review and challenges. *Procedia CIRP* [en línea], vol. 25, no. C, pp. 213-229. ISSN 22128271. DOI 10.1016/j.procir.2014.10.032. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2014.10.032>.
- NOF, S.Y., 2009. *Springer Handbook of Automation* [en línea]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-540-78830-0. Disponible en: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-540-78831-7>.
- PWC, 2016. Shifting patterns: The future of the logistics industry. [en línea]. S.l.: Disponible en: <http://www.pwc.com/sg/en/publications/assets/future-of-the-logistics-industry.pdf>.
- SHANNON, R., 1998. Introduction To the Art and Science of Simulation. *Proceedings of the 30th conference on Winter simulation*, pp. 7-14. ISSN 1098-6596. DOI 10.1017/CBO9781107415324.004.
- SKOOGH, A. y JOHANSSON, B., 2008. A methodology for input data management in discrete event simulation projects. *Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference* [en línea], pp. 1727-1735. Disponible en: <https://pdfs.semanticscholar.org/f36e/2cefa1022c26802676e6c51209dd7a89d807.pdf>.
- SOCO SYSTEM, [sin fecha]. SOCO SYSTEM from case erecting to secured pallet loads. [en línea]. [Consulta: 27 junio 2017]. Disponible en: https://www.socosystem.com/demo/dk/the-socosystem-line/linie_presentation.html.
- SOKOLOWSKI, J.A. y BANKS, C.M., 2010. *Modeling and Simulation Fundamentals: Theoretical Underpinnings and Practical Domains* [en línea]. S.l.: Wiley. ISBN 9780470590614. Disponible en: <https://books.google.es/books?id=oza7FSuIIIDgC>.
- SWAIN, J., 2015. Simulation Software Survey. *OR/MS Today* [en línea]. [Consulta: 10 junio 2017]. Disponible en: <http://www.orms-today.org/surveys/Simulation/Simulation.html>.
- ULMA HANDLING SYSTEMS, 2016. Casos de éxito: INTERMARCHÉ. Ambicioso proyeyo logístico de automatización para intermarché. [en línea]. [Consulta: 29 mayo 2017]. Disponible en: <http://www.ulmahandling.com/es/casos-de-exito/almacenamiento-automatizado-intermarche>.
- WILLIAMS, E.J. y ÜLGEN, O.M., 2012. Simulation Applications in the Automotive Industry. En: S. BANGSOW (ed.), *Use Cases of Discrete Event Simulation: Appliance and Research*. Zwickau: Springer Berlin Heidelberg,
- YASKAWA UK, 2011. *Motoman robots packing IKEA book cases* [en línea]. 2011. S.l.: s.n. Disponible en: https://www.youtube.com/watch?v=plINJoO4_uU&list=PLGPcH0HEXZfl4fvB7HDY9Ucy0E4mopE2X&index=5.

