



UNIVERSIDADE DA CORUÑA



Escola Politécnica Superior

Trabajo Fin de Máster
CURSO 2017/2018

*SIMULACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE UN PROCESO DE
PINTADO*

Máster en Ingeniería Industrial

ALUMNO

Edgar López Antón

TUTOR

Diego Crespo Pereira

FECHA

SEPTIEMBRE 2018

RESUMEN

Simulación y optimización de un proceso de pintado

El presente trabajo desarrolla el diseño de un proceso de tratamiento de superficies de elementos de buques, limitado por las dimensiones de la nave industrial. Así mismo se simula el proceso de tratamiento de piezas comprobando la capacidad para cumplir demanda esperada. Para ello se realiza un estudio del arte de las tecnologías digitales de la Industria 4.0 y en concreto de la simulación. Continuando por el desarrollo de la metodología, que permite estudiar las variables clave en cada etapa de un proceso caracterizado por una alta variabilidad en cuanto a demanda, tamaños y tipologías de piezas. Con este propósito se crea un modelo paramétrico utilizando el software de simulación de eventos discretos *FlexSim*, con el que se validará tanto los *layouts* propuestos como la capacidad del proceso. A partir de este punto se estudiarán diferentes escenarios priorizando la optimización del proceso productivo.

RESUMO

Simulación e optimización dun proceso de pintado

Neste traballo desenvólvese o deseño dun proceso de tratamento de superficies de elementos de buques, limitado polas dimensións da nave industrial. Así mesmo simúlase o proceso de tratamento de pezas comprobando a capacidade para cumprir a demanda esperada. Para elo realizase un estudo do arte das tecnoloxías dixitais da Industria 4.0 e en concreto da simulación. Continuando polo desenrolo da metolodoloxía, que permite estudar as variables clave en cada etapa dun proceso caracterizado por unha alta variabilidade en canto á demanda, tamaños e tipoloxías de pezas. Con este propósito créase un modelo paramétrico empregando o software de simulación de eventos discretos *FlexSim*, có que se validará tanto o *layout* proposto como a capacidade do proceso. A partir deste punto se estudiarán diferentes escenarios priorizando á optimización do proceso productivo.

ABSTRACT

Simulation and optimization of a painting process

This thesis deals with the design of a process of surface treatment of ship elements, limited by the dimensions of the industrial unit. It also simulates the process of treatment of pieces, checking the capacity to keep to the expected demand. To that end, an bibliographic review of the Industry 4.0 digital technologies is conducted, mainly centered on the simulation methodology. It continues with the development of the methodology, which allows studying the key variables in each stage of a process characterized a high variability in terms of demand, sizes and types of pieces. For this purpose, a parametric model was developed using the *FlexSim* discrete event simulation software, which was used for validation of both the proposed *layout* and the capacity of the process. Finally, different scenarios were studied prioritizing the optimization of the productive process.



UNIVERSIDADE DA CORUÑA



Escola Politécnica Superior

**TRABAJO FIN DE GRADO/MÁSTER
CURSO 2017/2018**

*SIMULACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE UN PROCESO DE
PINTADO*

Máster en Ingeniería Industrial

Documento

MEMORIA

Índice de contenido

1 INTRODUCCIÓN.....	15
2 OBJETIVOS.....	16
3 ANTECEDENTES	17
3.1 La cuarta revolución industrial: Industria 4.0	17
3.2 Simulación de procesos industriales	19
3.3 Industria 4.0 y simulación de procesos en el sector naval.....	23
4 METODOLOGÍA	26
4.1 Descripción del proceso.....	26
4.2 Recopilación de datos y caracterización del proceso	27
4.2.1 Origen de los componentes.....	28
4.2.2 Objetivos de producción	29
4.2.3 Tiempos de ciclo de los tratamientos	30
4.3 Software de simulación	30
4.4 Diseño de Layouts.....	33
4.4.1 Configuración de Layout 1.....	33
4.4.2 Configuración de Layout 2.....	35
4.4.3 Comparativa de layouts	38
4.5 Diseño y modelado del proceso.....	38
4.5.1 Llegada de piezas.....	38
4.5.2 Proceso de carga.....	42
4.5.3 Estaciones de trabajo	46
4.5.4 Operarios	54
4.5.5 Movimientos internos de material.....	54
4.5.6 Modelado y simulación mediante una programación de entrada	57
5 RESULTADOS DE SIMULACIÓN	65
5.1 Capacidad de producción máxima	65
5.2 Nivel de ocupación de los recursos	66
5.2.1 Ocupación de operarios.....	67
5.2.2 Ocupación de cabinas	67
5.2.3 Ocupación de la grúa y AGV	68
5.2.4 Puestos de carga de carretones.....	69
5.2.5 Ocupación de los buffers	70
5.2.6 Efecto del número de carretones	71
5.3 Cumplimiento de plazos.....	73

5.3.1 Tiempos de flujo en la planta.....	73
5.4 Análisis de una muestra aleatoria programada.....	76
6 CONCLUSIONES.....	78
7 BIBLIOGRAFÍA.....	79

Índice de figuras

Figura 1 Tecnologías digitales de la Industria 4.0 (Fuente: http://grupovenit.com/industria-4-0/)	19
Figura 2 Clasificación de los modelos de simulación (Elaboración propia)	20
Figura 3 Pasos en un estudio de simulación (Law y Kelton,2000).....	22
Figura 4 Etapas de producción en la construcción naval (Basán, Archkar, Méndez y García-del-Valle,2017)	24
Figura 5 Posibles direcciones del AGV	26
Figura 6 Ejemplo de carretón y AGV para el transporte de piezas (Fuente: www.dta.es)	27
Figura 7 Diagrama de flujo del proceso (Elaboración propia)	29
Figura 8 Librería de recursos de FlexSim (Elaboración propia)	31
Figura 9 Recursos utilizados en el desarrollo del modelo (Elaboración propia)	32
Figura 10 Modelos 3D elaborados para la simulación en FlexSim	32
Figura 11 Accesos y sentido de flujo del <i>Layout 1</i>	33
Figura 12 Ubicación de las cabinas de tratamiento en el <i>Layout 1</i>	34
Figura 13 Ubicación de buffers de almacenamiento en el <i>Layout 1</i>	34
Figura 14 Carga y descarga de piezas en <i>Layout 1</i>	35
Figura 15 Accesos y sentido de flujo de <i>Layout 1</i>	36
Figura 16 Ubicación de las cabinas de tratamiento en el <i>Layout 2</i>	36
Figura 17 Ubicación de buffers de almacenamiento en el <i>Layout 2</i>	37
Figura 18 Carga y descarga de piezas en <i>Layout 2</i>	37
Figura 19 Llegada de piezas a la planta de tratamiento.....	39
Figura 20 <i>PF</i> de Generación de piezas	40
Figura 21 Actividad <i>Create Object</i>	41
Figura 22 Menú de configuración de <i>Triggers</i> (imagen superior) y asignación del tiempo de entrada (imagen inferior).....	41
Figura 23 Proceso de carga de piezas en carretones	43
Figura 24 <i>PF Puesto de Carga</i>	43
Figura 25 Cambio de estado del puesto de carga a <i>Busy</i>	44
Figura 26 Asignación de la capacidad del carretón.....	44
Figura 27 Decisión condicional de carga de carretón.....	44
Figura 28 Puertos de salida de los puestos de carga.....	45
Figura 29 Función de asignación de puertos de salida de los puestos de carga	45
Figura 30 Cambio de estado del puesto de carga a <i>Idle</i>	46
Figura 31 Cabina de limpieza para tratamiento de piezas en carretones.....	46

Figura 32 <i>PF de Limpieza</i>	47
Figura 33 Cambio de estado de la cabina a <i>Waiting for operator</i>	47
Figura 34 Cambio de estado del operario en tratamiento de Limpieza	47
Figura 35 Asignación de estados a la cabina	48
Figura 36 Liberación del operario (izquierda) y liberación de la cabina de limpieza (derecha)	48
Figura 37 Puertos de salida de la cabina de limpieza	48
Figura 39 Cabina de granallado para tratamiento de piezas en carretones	49
Figura 40 <i>PF de Granallado</i>	50
Figura 41 Puertos de salida de la cabina de limpieza	51
Figura 42 Función de asignación de puertos de salida de la cabina de granallado	51
Figura 43 Cabinas de pintado para el tratamiento de piezas en carretones	52
Figura 44 <i>PF de Pintado</i>	52
Figura 45 Lectura del número de capas necesarias.....	53
Figura 46 Cambio de estado del operario en tratamiento de Pintado.....	53
Figura 47 Incremento del índice de capas (izquierda) y comparación con las capas necesarias (derecha)	54
Figura 48 Elección del método de transporte en el recurso fijo	54
Figura 49 <i>Sub Process Flow de transporte de grúa</i>	55
Figura 50 <i>Sub Process Flow de transporte de AGV</i>	56
Figura 51 Principales recorridos de AGV en el <i>Layout 1</i>	56
Figura 52 Principales recorridos de AGV en el <i>Layout 2</i>	57
Figura 53 Interface de Excel en <i>FlexSim</i>	58
Figura 54 <i>PF de generación de piezas con toma de datos externa</i>	59
Figura 55 Asignación del número de capas mediante tabla externa Excel	59
Figura 56 <i>Process Flow del Puesto de carga modificado(izquierda) y asignación del atributo Type al carretón</i>	60
Figura 57 Selección de puerto de salida en función del item <i>Type</i>	61
Figura 58 Selección del puerto salida en los puestos de carga en función del atributo <i>Type</i>	62
Figura 59 Selección del puerto salida en la cabina de limpieza en función del atributo <i>Type</i>	63
Figura 60 Selección del puerto salida en la cabina de granallado en función del atributo <i>Type</i>	64
Figura 61 Ocupación de los operarios sobre el total del tiempo de simulación.....	67
Figura 62 Porcentaje de ocupación de las cabinas estimados por FlexSim sobre el total del tiempo de simulación.....	68
Figura 63 Nivel de ocupación de la grúa y del AGV	69
Figura 64 Nivel de ocupación de los puestos de carga	70

Figura 65 Nivel de ocupación de los buffers en número de carretones a lo largo de 3 semanas de simulación, en condiciones de producción máxima. La variable X es el tiempo en horas y la variable Y es el número de carretones en el buffer.....	71
Figura 66 Efecto del número de carretones en la tasa de producción.....	72
Figura 67 Tiempo de flujo total en la planta para las piezas completadas a lo largo de 3 semanas. El eje X representa el tiempo de simulación y el eje Y las horas de estancia en la planta de cada pieza.	74
Figura 68 Histograma de tiempos de flujo en la planta para las piezas procesadas. El eje X presenta distintos tiempos de flujo en la planta y el eje Y la probabilidad (frecuencia relativa) de cada tiempo de flujo.	75

Índice de tablas

Tabla 1 Líneas de investigación de la UMI	25
Tabla 2 Duración de las actividades	30
Tabla 3 Parámetros para la simulación de los sistemas de transporte interno de material	30
Tabla 4 Capacidad de almacenamiento en buffers intermedios en <i>Layout 1</i>	35
Tabla 5 Capacidad de almacenamiento en buffers intermedios en <i>Layout 2</i>	37
Tabla 6 Comparativa entre <i>Layout 1</i> y <i>Layout 2</i>	38
Tabla 7 Tabla de tamaños de lotes (izquierda) y asignación de <i>label bSize</i> (derecha) ..	40
Tabla 8 Distribución estadística del número de capas de pintado	42
Tabla 9 Parámetros de ordenación de la muestra en Excel	58
Tabla 10 Tasa de producción máxima	66
Tabla 11 Niveles y reparto de ocupación de los operarios durante los periodos del trabajo	67
Tabla 12 Distancia recorrida por cada medio de transporte interno	69
Tabla 13 Niveles de ocupación de los buffers durante la simulación en número de carretones	70
Tabla 15 Tasa de producción en piezas procesadas / hora en función del número de carretones	72
Tabla 16 Resultados del estudio de cumplimiento de plazos	73
Tabla 17 Distribuciones estadísticas de la muestra	76
Tabla 18 Resultados del estudio orden de entrada	77

1 INTRODUCCIÓN

El sector naval vive actualmente sumergido en una competitividad feroz causada por la globalización y la bajada de precios provocada por los excesos de capacidad. Ante esta situación, los astilleros afrontan el reto de evolucionar y dar paso a las nuevas tecnologías digitales abanderadas por la cuarta revolución industrial: la *Industria 4.0*. La implementación de las nuevas tecnologías en los procesos de construcción de buques es un punto fundamental tanto como apoyo a la planificación y programación de tareas como en la mejora de la eficiencia del proceso, reduciendo costes innecesarios y actividades que no aporten valor añadido al producto final.

El presente trabajo se centra en la problemática de dimensionar un proceso real de tratamiento de elementos de buques en reparación. Este tipo de procesos se caracteriza por grandes picos y valles de actividad y por una altísima variabilidad en lo referente a tipología y tamaños de las piezas a reparar. Por ello, el correcto dimensionamiento de la capacidad del proceso es esencial para rentabilizar la inversión, así como para minimizar los riesgos asumidos.

Frente al panorama de las últimas décadas, donde la toma de decisiones se fundamentaba principalmente en la experiencia del personal; el uso de la simulación y, en concreto, la simulación de eventos discretos proporciona un medio para realizar experimentos con sistemas de producción sin necesidad de actuar sobre ellos o antes de que sean implantados. En consecuencia, facilita la toma de decisiones aportando fundamentos sólidos basados en resultados contrastados.

A través de la simulación de eventos discretos se estudia el diseño del proceso y el dimensionamiento de su capacidad para cumplir con una demanda prevista. Este trabajo presenta la metodología seguida para abordar el diseño y estudio de varias propuestas de *layout* y obtener resultados concluyentes en los diferentes escenarios planteados con la finalidad de diseñar un proceso capaz de cumplir los objetivos propuestos.

Para ello se realiza previamente un estudio del arte tanto de las tecnologías disponibles en la cuarta revolución industrial como de la situación actual de la construcción naval. A continuación, se describe el proceso y su implementación en el software de simulación *FlexSim*. Para terminar, se analizarán los resultados de la experimentación, así como las conclusiones finales.

2 OBJETIVOS

El presente trabajo tiene como objetivo principal el diseño de un *layout* flexible y eficiente que satisfaga las tasas de demanda planteadas. Para ello se desarrolla un modelo de simulación de eventos discretos en el software *FlexSim* que sirva como herramienta de análisis del proceso real de tratamiento de elementos de buques en reparación. A partir de este modelo se plantearán diferentes distribuciones en plata en las que se experimentará con varios escenarios de demanda. En cada escenario se planteará una tasa de demanda diferente buscando validar la capacidad del proceso. A raíz de este estudio se pretende establecer las necesidades mínimas de personal, maquinaria, equipos, etc, así como la secuenciación óptima de entrada de piezas de forma que se logre cumplir con la demanda esperada minimizando el tiempo de permanencia de las piezas dentro del proceso de tratamiento.

En resumen, se pretende diseñar un instrumento de apoyo en la toma de decisiones del personal implicado, de forma que se minimicen los riesgos asumidos de una gran inversión en la que unas suposiciones incorrectas podrían convertir al proceso en un cuello de botella y poner en riesgo la reparación de los buques dentro del plazo aprobado.

3 ANTECEDENTES

Antes de abordar el tema central del presente trabajo es necesario realizar una pequeña introducción sobre la Industria 4.0 así como las tecnologías digitales que ella implica. Se profundizará sobre la tecnología de simulación aplicada al sector industrial. Por último, tratará la situación actual de la simulación en sector naval que es el punto central del trabajo.

3.1 La cuarta revolución industrial: Industria 4.0

En el desarrollo de la historia de la tecnología se pueden identificar tres grandes revoluciones industriales. La primera de ellas, que comenzó en el Reino Unido a final del siglo XVIII, se caracterizó por la introducción de sistemas de producción mecánicos con tracción hidráulica y de vapor. Ejemplo de ello son la máquina de vapor¹ y el telar mecanizado² gracias a los que se favoreció el desarrollo de la industria y el transporte.

La segunda revolución industrial se inició a mediados del siglo XIX y se caracterizó por el desarrollo de la electricidad y la invención del motor de explosión. Estos avances junto con la introducción de la cadena de producción, la división del trabajo y la cinta transportadora supondrían una revolución tanto para el sector del automovilismo como para toda la industria.

La tercera revolución industrial se ubica a finales de la década de 1960, cuando la empresa *Modicon* presenta el primer controlador lógico programable (PLC) que permitió la programación digital de sistemas de automatización mediante sistemas electrónicos y de las tecnologías de la información (TI).

En la actualidad, la sociedad se encuentra en medio de la cuarta revolución industrial, que basa sus principios en la introducción de las tecnologías digitales y su convergencia con las tecnologías físicas y la componente humana en la industria. A esta nueva “ola” se le conoce como Industria 4.0. El concepto de “Industria 4.0” aparece por primera vez a través del gobierno alemán en noviembre de 2011, como parte del programa “*High-Tech Strategy 2020*”. En abril de 2013, el término industria 4.0 aparece de nuevo en la feria industrial de Hannover, y rápidamente se postula como la estrategia nacional para posicionar a Alemania como líder del mercado y proveedor de soluciones avanzadas de fabricación.

En este contexto aparecieron tres conceptos que definen la hoja de ruta de la Industria 4.0: “**Fábricas Inteligentes**” (*Smart Factories*), “**Internet de las cosas**” (IoT) y **Sistemas Ciber-Físicos (CPS)**. Tal y como describe Kagermann (2013), la integración de las IoT con los procesos de fabricación es una herramienta clave en la cuarta revolución industrial. Las IoT permiten que “cosas” y “objetos” como RFID³, sensores, actuadores, *smartphones*, los cuales, a través de un único esquema de direccionamiento, interactúan entre ellos y con demás componentes “inteligentes” para cumplir objetivos comunes (Giusto, 2010). gracias a los CPS, los cuales se pueden definir como “integraciones entre computación y procesos físicos en los que los ordenadores integrados y las redes informáticas controlan y monitorizan los procesos informáticos” (Lee 2008), la fusión entre el mundo físico y virtual es posible. En

¹ Patentada por James Watt en 1769

² Patentada por Edmund Cartwright en 1785

³ Sistema de identificación por radiofrecuencia

consecuencia, de la integración de la IoT y de los CPS nacen las “Fábricas Inteligentes”. Estas son fábricas que asisten a máquinas y personas en la ejecución de las tareas y procesos a través de la recopilación de información tanto de la realidad física como de la virtual.

Si bien en el mundo industrial el término autómatas no es nuevo, las capacidades de la robótica avanzada van mucho más allá de sus predecesores. Los robots autónomos tienen capacidad para trabajar sin supervisión humana coordinándose para automatizar tanto tareas logísticas como de producción y son uno de los principales exponentes de las “Fábricas inteligentes”.

Debido a la interconexión y comunicación de los diferentes elementos que componen una “Fabrica inteligente” se generan de forma masiva datos de gran tamaño y complejidad, que deben ser analizados de forma continua. Para ello, la tecnología convencional se antoja incapaz de gestionar, almacenar y analizar tal cantidad de información, de ahí que haya surgido la necesidad de una tecnología que permita gestionar grandes masas de información en tiempo real: el **Big Data**.

Si a todo ello le sumamos el incipiente cambio en la demanda de los consumidores donde cada vez se exigen productos más personalizados, se manifiesta necesario contar con un sistema de producción dinámico y altamente flexible. En consecuencia, la **fabricación adictiva** se posiciona como uno de los grandes avances junto con la **integración de sistemas** a partir de diferentes herramientas de gestión, como son el ERP⁴,SCM⁵, o entre otros el MES⁶, los cuales se postulan esenciales para un desarrollo inteligente de la producción.

Aunque la bibliografía sobre la Industria 4.0 es amplia y no existe una conformidad total entre la comunidad de autores en cuanto a su definición, si existe un consenso en cuanto a las principales tecnologías que la conforman. Desde la perspectiva del BCG⁷, el término Industria 4.0 se refiere a la convergencia y aplicación de nueve tecnologías industriales digitales, algunas ya mencionadas anteriormente: Robótica avanzada, fabricación adictiva, realidad aumentada, simulación, integración horizontal/vertical, internet industrial⁸, la nube, ciberseguridad y Big Data.

En resumen, el panorama industrial actual se caracteriza por la continua necesidad de innovación y adaptación que sufren las empresas para lograr una producción en masa de bienes personalizados. Además, la globalización obliga a muchas industrias a competir con sectores productivos emergentes de países en vías de desarrollo. Por ello la comprensión y la implementación de las tecnologías mencionadas junto con técnicas avanzadas de fabricación se antoja como una apuesta clave para formar parte de la cuarta revolución industrial, evitar el desplazamiento de la producción a otros países y; lo más importante, asegurar la supervivencia empresarial. En este conjunto de técnicas y tecnologías no solo se incluyen las relativas a la industria 4.0 sino que también son importantes las técnicas de gestión de la organización “*lean manufacturing*” que en convergencia crean un prometedor paradigma (Shrouf et al. 2014).

⁴ Sistema de planificación de recursos empresariales (Enterprise Resource Planning)

⁵ Administración de la cadena de suministro (Supply Chain Management)

⁶ Sistema de ejecución de operaciones (Manufacturing Execution System)

⁷ Boston Consulting Group

⁸ Anteriormente citado como “Internet de las cosas”

Figura 1 Tecnologías digitales de la Industria 4.0 (Fuente: <http://grupovenit.com/industria-4-0/>)



3.2 Simulación de procesos industriales

En el transcurso del siglo XXI, la simulación se está convirtiendo en una tecnología esencial en el apoyo y mejora de los diferentes tipos de sistemas industriales, pasando de ser “el último recurso” al “método de elección” en la resolución de problemas (Sargent 2017). Tal y como menciona Tempelmeier (2003), la simulación de procesos industriales presenta un gran potencial en el desarrollo y la mejora de procesos de producción y fabricación.

Para entender en que se fundamenta la simulación hay que formularse la siguiente cuestión: ¿Qué es la simulación de procesos industriales? Diversos autores coinciden al considerarla como “la interpretación de un problema real de producción o servicio desde el punto de vista de un lenguaje de simulación capaz de representarlo” (Roberts and Pegden 2017). Para ello, la elaboración de modelos de simulación permite el correcto análisis y la comprensión del sistema de producción. Si bien en la actualidad existen diferentes técnicas que permiten el estudio y la mejora de los procesos industriales, es necesario clasificar el modelo de simulación y elegir el correcto método de estudio prestando atención a tres dimensiones (Law y Kelton 2000). En primer lugar, y en función del tiempo los modelos se dividen en: estáticos (en los que el tiempo no juega ningún papel) y en dinámicos, (en los que el modelo evoluciona en el tiempo). En segundo lugar, y en función de la variabilidad, se diferencian los modelos determinísticos (sin componente probabilística) y los modelos estocásticos (los resultados son aleatorios). Por último, en función del sistema, los modelos se diferencian entre los modelos discretos o los modelos continuos. En los modelos continuos las variables de estado cambian de forma continua en el tiempo mientras que en los modelos discretos las variables de estado cambian únicamente en un conjunto discreto de puntos en el tiempo.

Figura 2 Clasificación de los modelos de simulación (Elaboración propia)



Bajo esta clasificación se puede acotar el presente trabajo, en el que el modelo considerado será dinámico, estocástico y discreto. En consecuencia, el método de análisis elegido es la **simulación de eventos discretos(DES)**.

La DES es aquella en la que el estado del modelo cambia solo en instantes discretos, pero posiblemente aleatorios. Puntos en el tiempo llamados eventos. La DES se ajusta perfectamente a la mayoría de los procesos de fabricación y producción industrial, de ahí su amplia aplicación en el sector industrial. Como menciona Tempelmeier (2003), “La simulación de eventos discretos es una herramienta necesaria en la modelización y representación de flujos complejos y estocásticos tanto en líneas de producción como en sistemas logísticos”. Así mismo, Zúniga, Moris y Syberfeldt (2017) afirman que “A través de los modelos de simulación de eventos discretos, el análisis y comparación de las diferentes partes de un “área de producción” se presenta como una tarea “sencilla” y con una inversión relativamente pequeña”.

Como se ha descrito anteriormente, la modelización y la simulación del proceso objeto de estudio son unos de los puntos más críticos si bien no son los únicos y forman parte de un conjunto de tareas ordenadas cronológicamente entre las que figuran desde el diseño estadístico y experimental del modelo hasta la gestión de inversiones y personal. La Figura 3 muestra un ejemplo de los pasos a seguir en una simulación, no solo de eventos discretos sino que se extrapola al conjunto de técnicas de simulación. Aunque la comunidad de autores comparte una visión general similar, no existe un acuerdo total en cuales son los pasos a seguir. Así pues, autores como Banks and Carson (1984), Lawy MacComas (1990), Shannon (1975) o Gordon (1978) proponen procedimientos diferentes al que se plantea en este trabajo, pero totalmente compatibles. Además, no todos los estudios de simulación deben contener todas fases, ni tampoco deben seguir un orden preestablecido, ya que no se trata de un proceso secuencial. A medida que se profundiza en un proceso industrial el conocimiento y comprensión del mismo es mayor, por lo que, en ciertos casos, es una buena práctica realizar de nuevo pasos previos.

A continuación, se presentan los pasos definidos por Law y Kelton (2000) en un estudio de simulación.

1. Formulación del problema y planificación del estudio. Todo estudio debe comenzar con un planteamiento claro de los objetivos generales y problemas a resolver; sin la realización de este primer paso el estudio tiene pocas oportunidades de concluir de forma exitosa. En este punto también se deberían estudiar y proponer los diseños alternativos del sistema, así como los criterios a seguir en la evaluación de la eficacia

de las mismas. Aunque como se mencionó anteriormente existe cierta incertidumbre en las fases iniciales, se debe planificar la dedicación de personal, coste y tiempo requerido en cada aspecto del estudio y gestionar las desviaciones con respecto a lo previsto.

2. Toma de datos y definición del modelo. La información se debe extraer del sistema real (en caso de existir) y utilizarlo para especificar el funcionamiento y las distribuciones de probabilidad de las variables aleatorias utilizadas en el modelo. El diseño del modelo de simulación es considerado tanto un arte como una ciencia (Shannon,1975). A pesar de que existen pocas directrices en el proceso de modelado, la mayoría de los autores están de acuerdo en que es una “buena práctica” partir de un modelo sencillo que detalle la esencia del sistema sin necesidad de plasmar todos los elementos del sistema.
3. Validación. Aunque la tarea de validación se debería realizar durante todo el estudio de simulación, existen varios puntos donde la validación es particularmente apropiada. Uno de ellos es durante la definición del modelo. Para ello es muy apropiado involucrar al personal que está íntimamente familiarizado con el proceso de producción o fabricación. En consecuencia, aumentará la validez del modelo y la credibilidad (o validez percibida) por el encargado en la toma de decisiones.
4. Implementación y verificación del modelo. La implementación del modelo se puede realizar mediante un lenguaje de programación si bien actualmente lo más común es emplear un software específico para la simulación que permita obtener el resultado esperado con poca o sin codificación. Durante los últimos 20 años han ido apareciendo diferentes softwares como son: *Arena*, *AutoMod*, *ExtendSim*, *FlexSim*, *MicroSaint*, *ProModel*, *Quest*, *SIMUL8* y *WITNESS*. Entre todos los mencionados cabe destacar el software de simulación *FlexSim* por ser el empleado en el presente trabajo y por permitir animaciones 3D y la implementación de la realidad virtual, una de las principales tecnologías digitales de la industria 4.0. Así mismo, en modelos de gran complejidad, las animaciones pueden llegar a ser de gran utilidad en la verificación e detección de errores en la lógica del modelo. Además de las animaciones existen otras técnicas de verificación que han ido evolucionando a lo largo de los últimos 30 años (Sargent, 2017).
5. Realización de pruebas piloto. Tras “depurar” el modelo se realizan pruebas piloto para proceder a las validaciones en el siguiente punto.
6. Validación. Es posible que aun existan errores remanentes en el modelo debido a las hipótesis de partida. En consecuencia, se deben comprobar tanto las pruebas piloto como las animaciones para detectar dichos errores y modificar el modelo. los resultados numéricos y las animaciones. Por otro lado, es importante comprobar la sensibilidad de los resultados de modelo al realizar pequeños cambios en las variables de entrada. Si los resultados varían mucho, se debería obtener una mejor estimación de las variables de entrada. En el caso de que exista un sistema real del modelo de simulación, la mejor validación es comprobar que los resultados de adecuan al comportamiento del sistema real.
7. Diseño de experimentos. En este punto se deben definir en cada configuración y escenario contemplado del modelo las variables de entrada sobre las cuales se quiere simular el modelo. Con el fin de realizar una correcta interpretación de los resultados es crucial conocer cuáles son las variables sobre las que hay que prestar especial atención.

8. Simulación. El modelo se ejecuta para un posterior análisis.
9. Análisis de los resultados. Los resultados de la simulación permiten obtener una estimación numérica de las variables objeto de estudio. Estas estimaciones sirven de apoyo en la determinación de la eficacia de un sistema o en la elección del mejor diseño de un sistema.
10. Documentación, presentación e implementación. Puesto que los modelos de simulación son adaptables y no se limitan a un único análisis, es crucial la documentación de todas las hipótesis y suposiciones que se incluyeron en el modelo. Además, es fundamental la presentación del modelo y de los resultados de una forma sencilla, clara y directa al cliente que será en la mayoría de los casos el usuario modelo. A partir de los resultados obtenidos, se procede a la implementación de modelo en un sistema real o a la realización de los cambios oportunos en el sistema (si existe un sistema previo).

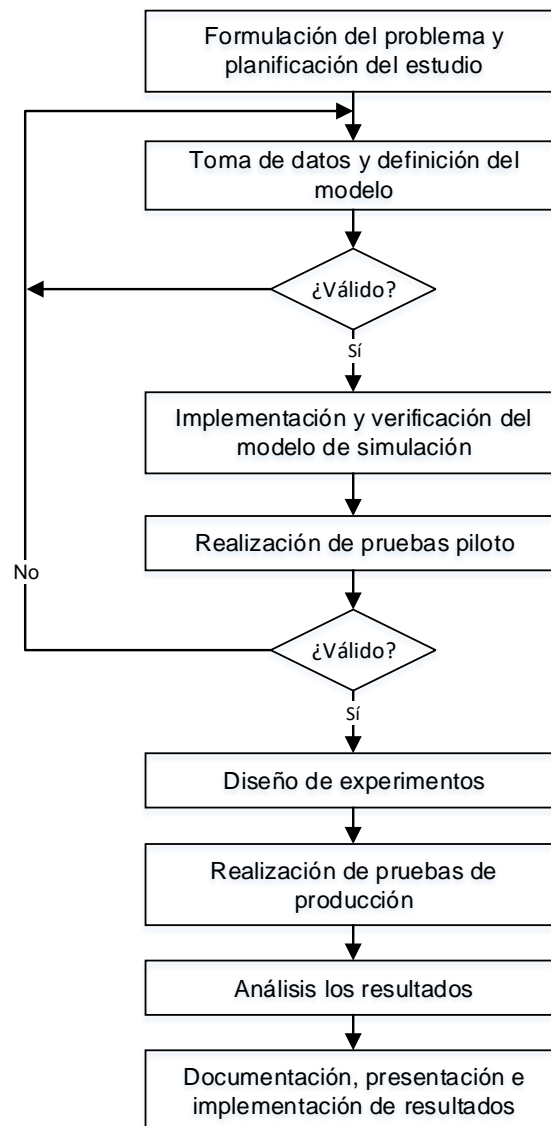


Figura 3 Pasos en un estudio de simulación (Law y Kelton,2000)

3.3 Industria 4.0 y simulación de procesos en el sector naval

El sector naval se caracteriza por poseer uno de los procesos de fabricación más complejos, debido a la gran cantidad de elementos que intervienen a lo largo de todo el proceso productivo. La principal característica de este sector es la exclusividad de los productos, con un alto valor añadido y considerables tiempos de construcción. Todo ello hace que el sector naval se desmarque de procesos en los que la producción es seriada.

La situación actual de mercado naval se define por una intensa competencia. Ante la baja de precios debido al exceso de capacidad, el sector debe hacer frente a la necesidad de adecuar sus procesos productivos buscando un aumento de rendimiento que les permita hacer frente a diferentes escenarios técnicos y de gestión para competir a nivel global (Lamb et al.2006). Cabe destacar el caso particular de la construcción de buques de guerra, donde debido a su carácter único, las fases de oferta, planificación y programación se vuelven extremadamente complejas al carecer de datos históricos en estas fases iniciales (Duclos, Vokurka, and Lummus 2003). Por ello, se antoja fundamental realizar de forma apropiada las fases de planificación y programación para la consecución de los objetivos propuestos. Así es que ante la gran cantidad de talleres involucrado en el proceso productivo es crucial la coordinación entre todos ellos para minimizar los cuellos de botella. De hecho, este es un factor crucial en la competitividad internacional, así como la entrega dentro de los plazos acordados con el cliente puesto que las penalizaciones por retrasos son considerables y podrían poner en jaque la rentabilidad del proyecto. Por ello es común en este sector la utilización por los planificadores del método de programación inversa⁹. Tal y como afirma Krause (2004), el montaje de bloques en grada suele ser uno de los principales cuellos de botella en la mayoría de astilleros europeos, limitando la capacidad de producción de los talleres de producción. Por lo tanto, una correcta planificación y programación de las tareas teniendo en cuenta las restricciones tanto de personal, equipos y materias primas son trabajos esenciales en el éxito del proyecto.

Debido a la naturaleza del proceso de construcción naval, se gestiona con un enfoque orientado a proyectos. Sin embargo, en las últimas décadas, los esfuerzos para aplicar los principios *Lean* y los procesos de estandarización, han conllevado el uso de un enfoque modular (Zhang 2015). Hoy en día se emplean diseños modulares integrados para construir buques. Los avances tanto en tecnología como en metodologías de planificación, han permitido la implantación de la prefabricación de bloques de hierro o estructuras, que luego, se ensamblan en el denominado proceso de montaje de bloques. Además, elementos de menor tamaño como son equipos electrónicos, tuberías y soportes se instalan previamente en los bloques. Por lo tanto, se podría afirmar que la construcción naval se lleva a cabo a partir de subunidades o módulos que incorporan e integran sistemas múltiples. Bajo este enfoque, la unidad común de producción para la mayoría de los pasos del proceso es un bloque o sub-bloque. Cada bloque tiene diferentes tamaños, tipos y consta de uno o varios sub-bloques ensamblados, según la tipología de buque. Estos son procesados y ensamblados por una secuencia dada, respetando las especificaciones del ensamblaje del buque. Las principales etapas del proceso de construcción naval se representan en la y se enumeran a continuación:

1. Corte
2. Pre-ensamblado
3. Pre-equipamiento
4. Ensamblado
5. Primer equipamiento

⁹ Inicia el cálculo a partir de la fecha de vencimiento para retroceder hasta determinar cuándo deberá cuándo llegará la tarea al centro de trabajo

6. Pintado
7. Segundo equipamiento
8. Montaje del bloque

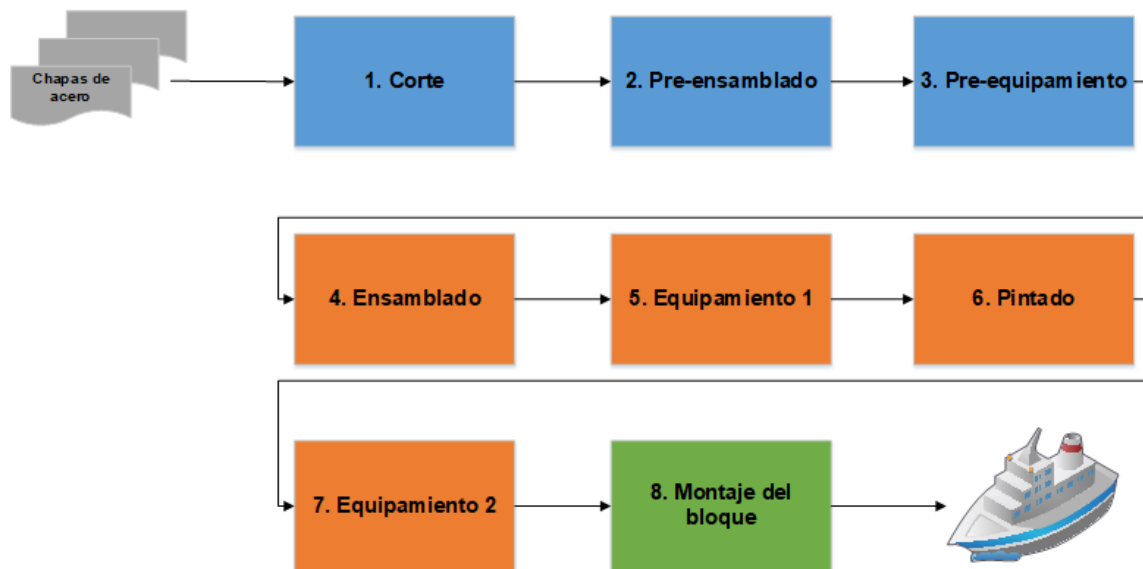


Figura 4 Etapas de producción en la construcción naval (Basán, Archkar, Méndez y Garcia-del-Valle,2017)

Ante las dificultades y complejidades que supone la planificación y programación de las tareas que se llevan a cabo en la construcción de buques, muchos astilleros han comenzado a trabajar con modelos de simulación de eventos discretos. Prueba de ello es la aplicación de estas tecnologías digitales en los astilleros alemanes de Flensburger Schiffbau-Gesellschaft, Meyer y Aker Ostsee además de muchos astilleros asiáticos. Hoy en día, en España, a diferencia de otros ámbitos como el aeroespacial y el automovilístico, donde está fuertemente consolidado, el uso de la simulación en la industria de la construcción naval aún no ha terminado de imponerse. Este proceso de introducción de la simulación de procesos en el sector naval español se ejemplifica con la situación del astillero de NAVANTIA en la comarca de Ferrol.

NAVANTIA inició su camino hacia el “Astillero 4.0” en el año 2015 y desde entonces ha venido realizando una intensa actividad de vigilancia tecnología con el objetivo de identificar las tecnologías clave, conocer su madurez y entender que oportunidades ofrecen en la industria naval.

Así pues, el modelo de Astillero 4.0 de NAVANTIA contempla 13 tecnologías entre las que se encuentra las tecnologías digitales de la cuarta revolución industrial y entre ellas, la tecnología en la que se centra este trabajo: la simulación de procesos. Debido a la necesidad de apostar por la transformación digital, NAVANTIA acuerda con la Universidad de A Coruña (UDC) establecer una colaboración en el campo del I+D+i para poder optar a la creación de una Unidad Mixta de Investigación (UMI) al amparo de la resolución de ayudas del GAIN¹⁰.

Así pues, el objetivo de la UMI es el desarrollo de nuevas técnicas y tecnologías que permitan incrementar la competitividad del astillero, para afrontar el desafío técnico industrial del Programa de fragatas F110, mediante la mejora de los procesos productivos existentes y el desarrollo de otros nuevos, de tal forma que se incremente la productividad y se reduzcan tiempos y costes.

¹⁰ Axencia galega de innovación

Para trabajar en las diferentes áreas de producción se han desarrollado las siguientes líneas de investigación:

Líneas de investigación	Actuaciones
Optimización De Procesos	M&S de procesos del Astillero
	Optimización de procesos (automoción)
	Robótica y automoción
	M&S de procesos de eólica marina
	Proyecto “tubo de cierre”
	Control estadístico de procesos
Tecnologías de la Información y Comunicaciones (Tics)	Trazabilidad /Auto ID de tuberías
	Información en planta y realidad aumentada
	SIGI. Industrial Internet of Things
Tecnologías Disruptivas (F110)	Proyecto “sin cables” (s. eléctrico+com. &datos)
	Sistemas auto-reconfigurables
	Proyecto “adhesivos”
Ciberseguridad	Proyecto Ciberseguridad
Vehículos Autónomos	Proyecto UAV

Tabla 1 Líneas de investigación de la UMI

Como muestra la Tabla 1 Líneas de investigación de la UMI Tabla 1, gran parte de las actuaciones de la UMI se centran en la optimización de procesos y en concreto una de ellas desenvuelve el modelado y simulación de los procesos que se desarrollan en el astillero.

En resumen, el estudio del arte de la situación actual del sector naval muestra como la apuesta por la Industria 4.0 es una realidad y como la simulación de procesos es una de las tecnologías clave para hacer de la fabricación de buques un proceso eficiente, flexible y facilitar tanto la planificación como la toma de decisiones, minimizando los riesgos asumidos.

4 METODOLOGÍA

El presente trabajo se centra en el análisis de un proceso de tratamiento de piezas de buques en reparación. El estudio de proceso nace ante la necesidad de NAVANTIA, empresa del sector de la construcción naval, de mejorar su unidad de producción destinada a reparaciones de buques. En esta unidad, se llevan a cabo diversas actividades de reparación y mantenimiento, entre las que se encuentran operaciones de tratamiento de superficie, protección anticorrosiva y acabado de elementos de buques. Para ello, NAVANTIA tiene la intención de llevar a cabo la construcción de una nave industrial para desarrollar dichas actividades. En base a las posibles disposiciones de la nave industrial se plantearán dos *layouts* verificando su validez y analizando los resultados obtenidos en cada uno de ellos.

4.1 Descripción del proceso

El proceso de tratamiento comienza con la llegada de las piezas a la nave, en general por medio de camiones y/o carretillas, las cuales serán descargadas mediante un puente grúa en las zonas reservadas para la descarga de piezas. Las piezas se colocarán encima de **carretones**¹¹ especialmente diseñados para esta instalación de tratamiento. Una vez las piezas están cargadas encima de los carretones, se procede a transportarlas a través de un AGV¹² a la zona donde se realizará el tratamiento necesario. Estos vehículos permiten realizar los trabajos con una gran versatilidad al poder entrar por la parte larga del carretón o por la parte ancha, pudiendo manipularlo sin realizar grandes maniobras. Además, permiten transportar grandes cargas con muy poca altura al ubicarse debajo del carretón y elevarlo lo suficiente como para levantarlo del suelo. Actualmente el control de los AGVs se pueden realizar mediante diferentes sistemas (filoguiado¹³, láser, sistemas ópticos, etc.), si bien, debido a la complejidad del proceso, el más idóneo es el guiado a través de un mando controlado por un operario.

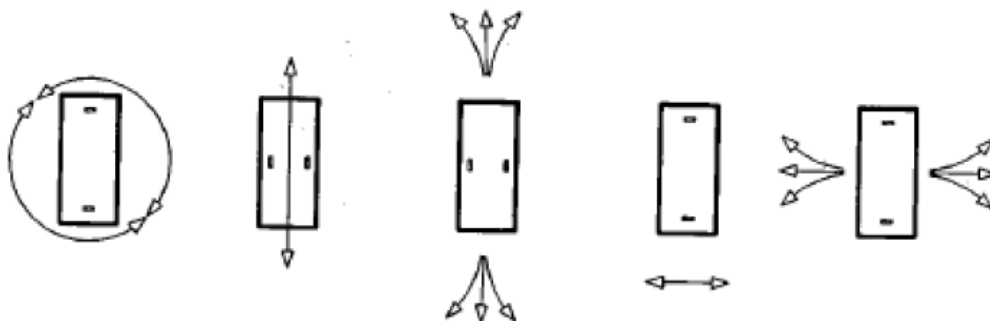


Figura 5 Posibles direcciones del AGV

¹¹ Mesa sin ruedas de 8 x 3,5 m sobre la que se apoyan las piezas

¹² Vehículo Auto guiado (*Automatic Guided Vehicle*)

¹³ Sistema de guiado mediante hilos, empotrados en el suelo, que generan campos magnéticos

Los tratamientos superficiales que se llevarán a cabo en la nave son: **Limpieza**¹⁴, **granallado**¹⁵ y **pintado**. Para ello se dispondrá de cabinas específicas para la realización de cada tratamiento. Aunque los procesos se pueden entender en ese orden, no todas las piezas que lleguen a la nave de tratamiento requerirán necesariamente pasar por todos ellos. Asimismo, los procesos exactos y, por tanto, los tiempos de proceso dependerán de las piezas a tratar (por ejemplo, diferentes tipos de piezas pueden requerir la aplicación de un mayor o menor número de capas de pintura). Todos estos aspectos y variantes se detallarán a lo largo del presente trabajo.

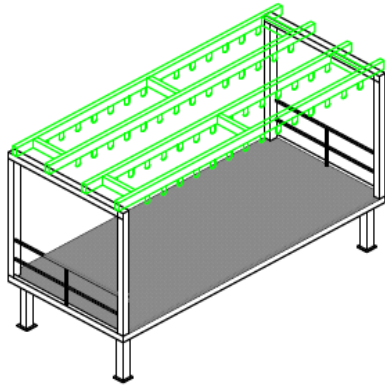


Figura 6 Ejemplo de carretón y AGV para el transporte de piezas (Fuente: www.dta.es)

4.2 Recopilación de datos y caracterización del proceso

En el desarrollo de un modelo de simulación que permita representar con fidelidad el comportamiento de un proceso industrial, la recopilación de datos y su análisis posterior son dos tareas fundamentales. Para ello la elección de las oportunas distribuciones probabilísticas es un punto crucial en la elaboración de modelos de simulación basados en datos de partida.

En la práctica se pueden dar diferentes situaciones relacionadas tanto con el proyecto como con el proceso que condicionen la disponibilidad de datos de partida:

- **Caso 1.** Existen datos previos al desarrollo del modelo de simulación por lo que estos son conocidos y están disponibles.
- **Caso 2.** No existen datos previos, pero es posible la recopilación de los mismos mediante el análisis del proceso.
- **Caso 3.** No existen datos previos y tampoco es posible la recopilación de los mismo mediante el análisis del proceso.

El caso 3, habitual en procesos nuevos de los que no existe un histórico de datos, es el más adverso para la validación del modelo puesto que implica mayores incertidumbres e hipótesis asumidas además de que imposibilita realizar la verificación del modelo con pruebas en el propio proceso. Ante esta situación, la solución más común es recurrir a la experiencia del personal implicado en el desarrollo del proceso. Gracias a su amplio conocimiento del proceso se pueden definir parámetros básicos como son el tiempo más optimista y pesimista de

¹⁴ Consiste en un hidroLimpieza a presión

¹⁵ Tratamiento superficial que consiste en chorrear por aire un abrasivo sobre las piezas a tratar

duración de las tareas. Para la consecución de este fin, es imprescindible el contacto con el cliente, así como el continuo flujo de información entre ambos para definir correctamente el modelo.

Por ello es necesario que tras definir el esquema conceptual del proceso y las necesidades del mismo se plateen los datos necesarios para caracterizarlo. Como ejemplo de ello son:

- Objetivos de producción
- Tasa de llegada de piezas
- Tipología de las piezas
- Tratamientos necesarios para cada tipo de pieza
- Tiempo de ciclo de cada tratamiento
- Tiempos de carga y descarga
- Tiempos de transporte

Las consideraciones y comentarios sobre los datos de partida necesarios se detallan en parte a continuación y a lo largo de la presente memoria a medida que se profundice en el proceso.

4.2.1 Origen de los componentes

Puesto que un buque se compone de multitud de piezas de diferentes tipologías, tamaños y características, los tratamientos que deben recibir varían de unas a otras. Las piezas que se tratarán en el buque se han agrupado en los siguientes grupos:

- Aceros y plomeros. En este grupo se incluyen los sellos de gas inerte, hongos de ventilación, carcasas de ventilación, polines, tubos grandes, carcasas de filtros...
- Marineros. Este grupo incluye las anclas y las cadenas.
- Taller. Este grupo incluye las bombas, *thrusters*¹⁶, seguridad de carga y componentes de turbina.

Gran parte de las piezas necesitan un tratamiento previo de Limpieza, debido a la suciedad con la que llegan al taller. Algunas de estas piezas únicamente necesitan un tratamiento de Limpieza y saldrán del taller mientras que la mayoría necesitan un tratamiento de Granallado. Si las piezas carecen de suciedad, como las tuberías nuevas, comienzan directamente por el tratamiento de Granallado. Así mismo no todas las piezas que salen de Granallado necesitan un tratamiento de Pintado, por lo que solo una parte de ellas se dirigirán a las cabinas de Pintado.

Como se ha mencionado ya anteriormente, no se dispone ni de un histórico de datos ni tampoco de un sistema de producción sobre el que realizar la toma de datos. Por este motivo se ha partido de las estimaciones, facilitadas por NAVANTIA, del flujo de piezas que se dirigen a cada etapa del proceso. En base a los datos de partida se realiza el siguiente diagrama de flujo.

¹⁶ Propulsores o hélices de maniobra

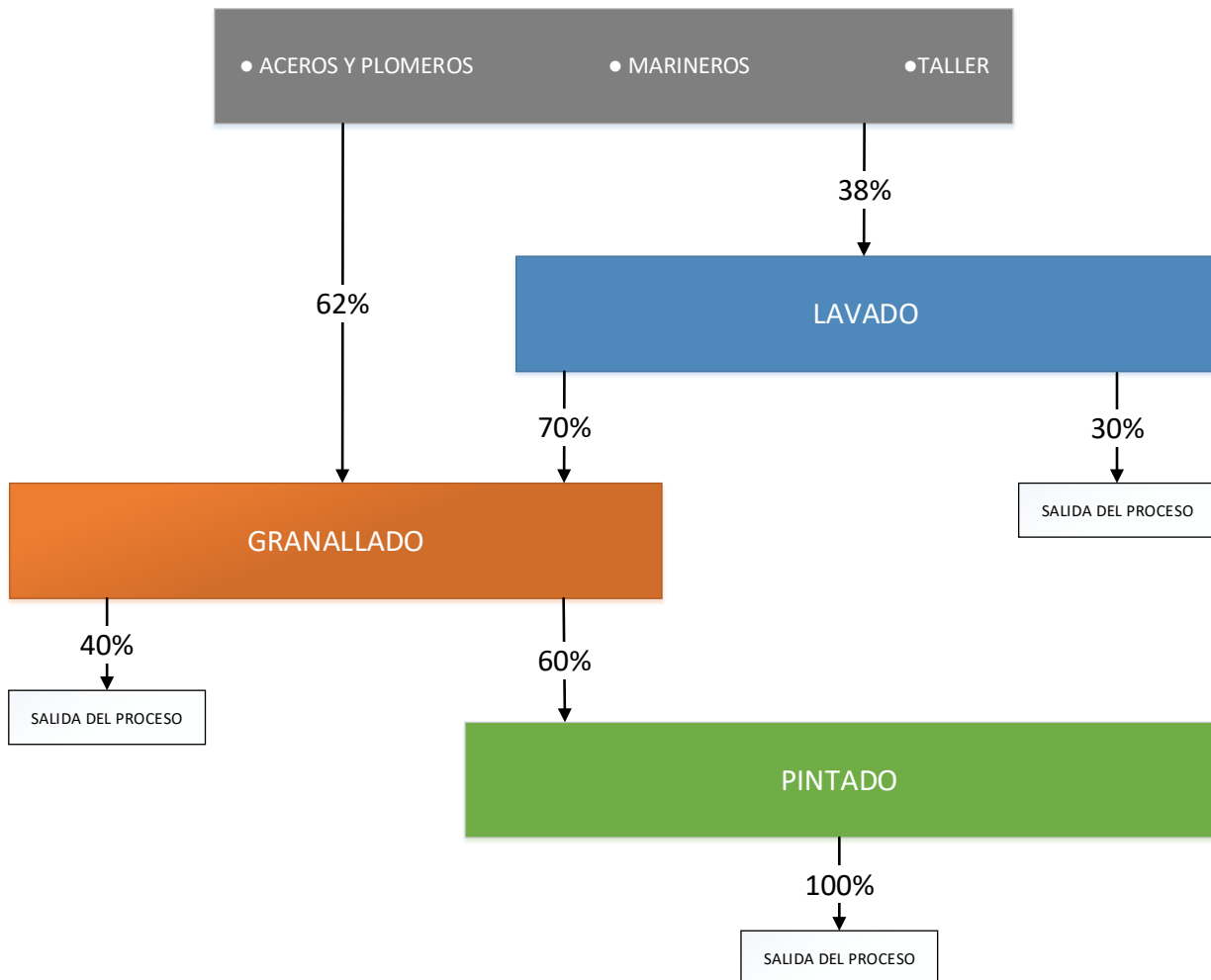


Figura 7 Diagrama de flujo del proceso (Elaboración propia)

4.2.2 Objetivos de producción

El propósito fundamental de la planta será atender la futura demanda de reparación de piezas. Para ello, NAVANTIA ha fijado tres objetivos de producción mediante los cuales se pueden establecer diferentes escenarios de carga de trabajo:

- **Escenario 1.** Atender la demanda de reparación de un buque con 240 piezas a ser tratadas en un plazo de 8 días laborables.
- **Escenario 2.** Atender la demanda de reparación de dos buques con un total de 480 piezas a ser tratadas en un plazo de 11 días laborables.
- **Escenario 3.** Atender la demanda de reparación de dos buques con un total de 720 piezas a ser tratadas en un plazo de 12 días laborables.

Como jornada normal de trabajo por día se consideran 11 horas, aunque este es un parámetro regulable y adaptable, en caso de necesidad, a la carga de trabajo.

4.2.3 Tiempos de ciclo de los tratamientos

Como se explica anteriormente, a falta de datos históricos con los que alimentar la simulación, se ha partido de los datos proporcionados por NAVANTIA.

En el caso del tratamiento de Limpieza y en base a las estimaciones del personal especializado en las tareas de tratamiento se establece la duración habitual (moda) y las duraciones extremas (mayor y menor). Por este motivo, se opta por emplear una distribución estadística triangular para modelar el proceso de Limpieza. Por otro lado, en los tratamientos de Granallado y Secado, es más complicado definir una moda, por lo tanto, se define mediante una distribución uniforme de manera que todos los valores comprendidos entre los dos extremos de tiempo tengan la misma probabilidad. En cuanto a la actividad de Pintado, los tiempos de trabajo están estandarizados por lo que se ha establecido una duración determinada de Pintado por capa. Para la simulación se han considerado los siguientes tiempos de duración de los procesos.

Actividad	Duración
Limpieza	<u>Distribución Triangular</u> (Min: 30 min, Máx.: 120 min, habitual 60 min)
Granallado	<u>Distribución Uniforme</u> (Min:180 min, Máx:240 min)
Pintado	60 min por capa
Secado	<u>Distribución Uniforme</u> (Min: 180 min, Máx:300 min) por capa

Tabla 2 Duración de las actividades

En cuanto a los transportes interiores se han considerado los siguientes parámetros que determinan el cálculo de tiempos:

Parámetro	Valor
Velocidad media AGV	10 m/min
Carga/Descarga de carretón en AGV	2 min
Carga de pieza en grúa	Distribución Exponencial Media 1 min / pieza
Descarga de pieza en grúa	Distribución Exponencial Media 1 min / pieza

Tabla 3 Parámetros para la simulación de los sistemas de transporte interno de material

4.3 Software de simulación

El presente trabajo tiene como pilar fundamental el software para la simulación de eventos discretos *FlexSim* que permite modelar, analizar, visualizar y optimizar cualquier proceso industrial, como fabricación, embalaje, almacenamiento, manejo de materiales, cadenas de suministro y muchos otros. *FlexSim* incluye una gran variedad de herramientas que permiten construir y ejecutar el modelo desarrollado en una simulación dentro de un entorno 3D y obtener una colección de informes estadísticos que permiten medir cualquier indicador de

rendimiento en el proceso. En la actualidad, el software de simulación *FlexSim* es comúnmente utilizado por empresas multinacionales para simular sus procesos productivos antes de ejecutarlos. Ejemplo de ello son *Coca Cola*, *Siemens* o *FedEx*, entre otras.

Un modelo desarrollado con el software *FlexSim* es básicamente un sistema de flujo de entidades (*flowitems*), colas (*queues/buffers*), procesos (*processor*) y sistemas de transporte (*transportation*). En general, el proceso consiste en un retraso forzado (*delay*) realizado por una máquina, el transporte consiste en el movimiento de entidades de un recurso a otro, y las colas son un acumulamiento de entidades a la entrada de un proceso esperando para su procesamiento.

Básicamente, un modelo en *FlexSim* consta de los siguientes recursos:

- Recursos constantes o fijos (*fixed resources*). Aquí entrarían las colas (*queues/buffers*), las máquinas o procesos (*processor*) y las cintas transportadoras (*conveyors*).
- Recursos compartidos (*shared resources*). En este apartado están los operarios.
- Recursos móviles (*mobile resources*). En este apartado entran los sistemas de transporte tales como elevadores, AGVs, robots industriales, etc.

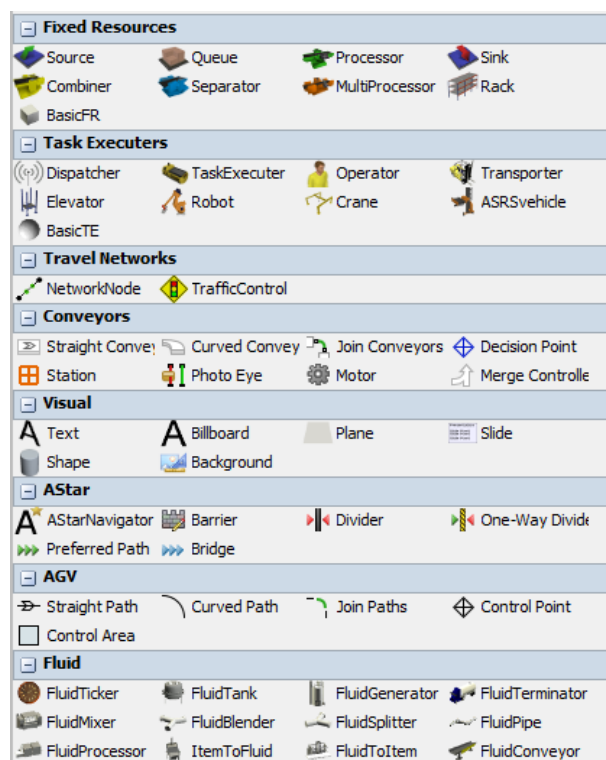


Figura 8 Librería de recursos de FlexSim (Elaboración propia)

El modelado del proceso se basa principalmente en la combinación de grúas y AGVs (recursos móviles), operarios (recursos compartidos) y colas de espera (recursos fijos). Tanto las cabinas, los *buffers*, y los puestos de carga y descarga de piezas se modelarán partir del recurso *queue* programando tiempos de espera que simulen el tiempo empleado en cada operación.

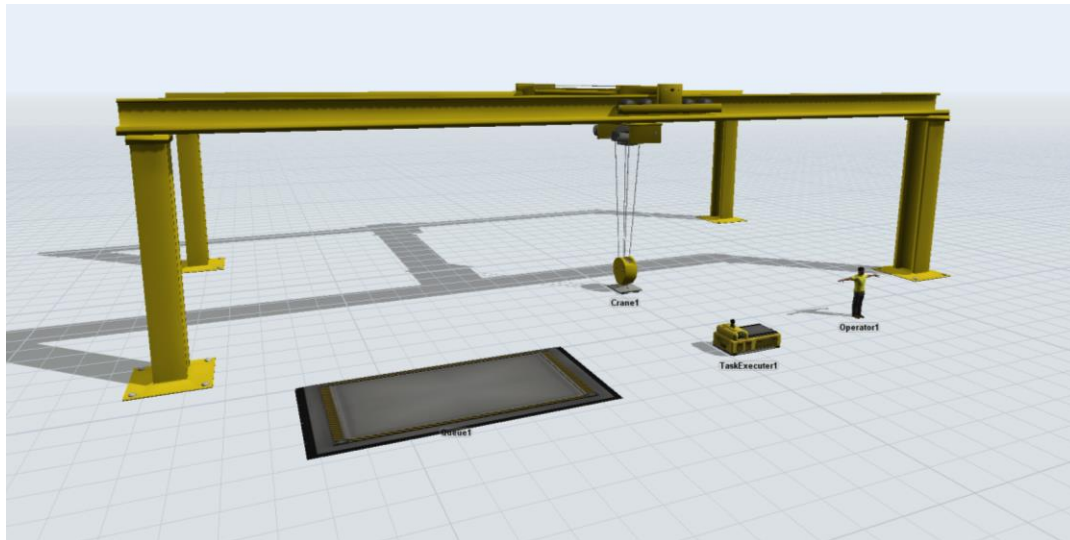


Figura 9 Recursos utilizados en el desarrollo del modelo (Elaboración propia)

Además, con el objetivo de simular un entorno más realista, se ha partido de *basicFR* (elementos de la librería) para introducir en el modelo de *FlexSim*, modelos en 3D previamente definidos.

Para ello, se ha empleado el software *Solidworks* para modelar los carretones y las cabinas. En el caso de la nave industrial, se parte del modelo en *Revit* facilitado por la empresa *PROYFE, S.L.*, encargada de realizar el proyecto constructivo de la nave. En la siguiente figura se muestran los modelos diseñados para la nave industrial, los carretones y las cabinas de limpieza (color azul), granallado (color verde) y pintado (color naranja):

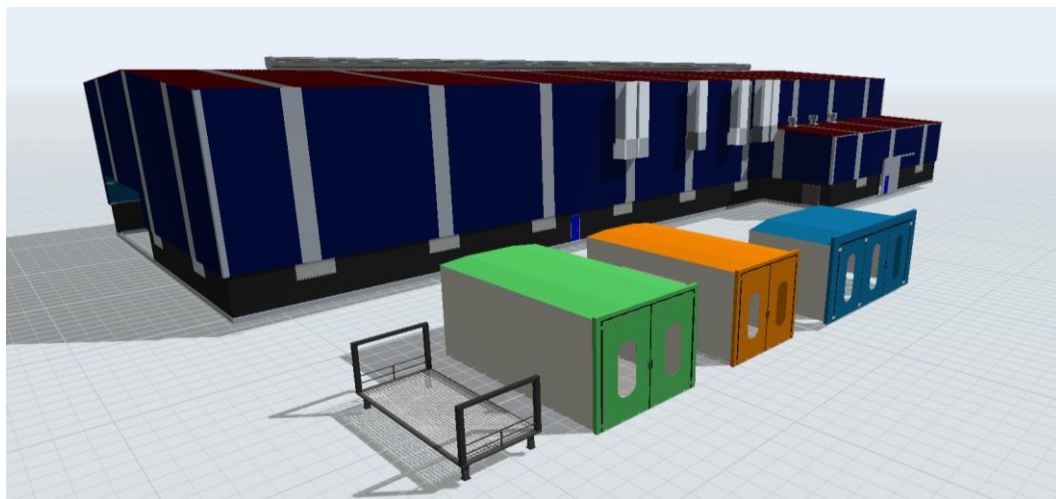


Figura 10 Modelos 3D elaborados para la simulación en FlexSim

En cuanto a la nomenclatura de *FlexSim*, al elemento producido o producto en elaboración, que fluye por cada uno de los recursos del modelo, se le denomina *flowitem*. En el presente modelo los *flowitems* son los cilindros blancos (piezas) y los carretones. Estos elementos pueden guardar información relativa a dicho producto, tales como etiquetas o *labels* (por ejemplo, el código de barras de un producto determinado) y el tipo o *ítem type*, que tipifica los productos. Estas dos propiedades pueden utilizarse para definir tiempos de proceso o encaminar las entidades por el flujo de producción correcto. En los recursos fijos (*buffers*, máquinas, etc.), el usuario deberá configurar el tiempo de proceso que consume una entidad mientras se elabora o procesa en dicho recurso, si es necesario transportarlo mediante un recurso compartido, como puede ser un operario, o si es necesario llamar a un recurso móvil. Además, en los recursos fijos se pueden definir eventos que en el momento concreto que

sucedan descenderán acciones. Estos eventos se denominan en como *FlexSim triggers* y permiten la configuración de multitud de situaciones.

Pero sin duda, la principal ventaja de utilizar el software *FlexSim* es la herramienta *Process Flow*. Esta herramienta hace que sea más sencillo modelar sistemas complejos gracias a que reemplaza casi toda la escritura de código por diagramas de flujo, haciendo que sea mucho más visual, organizado e intuitivo el desarrollo del modelo.

De igual forma que en el modelado 3D, en los *Process Flow* también existe la posibilidad de modelar empleando una librería de actividades y acciones a través de las cuales también circularán elementos similares a los *flowitems* a los que se les conoce como *tokens*. Estos recursos son muy similares a los anteriores ya que se mueven de una actividad a la siguiente, de igual forma que un elemento de flujo se mueve de una máquina a una cola o a un proceso. Pero a diferencia de los elementos de flujo, los *tokens* no necesariamente tienen que representar un objeto físico, si no que pueden ser más abstractos, lo que significa que pueden representar cualquier cosa que desee que representen.

Con los elementos aquí definidos se modela el proceso de tratamiento de piezas y se estudian las diferentes configuraciones de *layout* que se describen a continuación.

4.4 Diseño de Layout

Para la implantación del proceso de tratamiento de piezas se han proyectado dos posibles naves industriales. En función de las dimensiones y características de cada nave se ha diseñado un *layout* específico para cada una de ellas. A continuación, se detallan los dos *layouts* estudiados y se analizan las diferencias más significativas entre ambos:

4.4.1 Configuración de Layout 1

La primera configuración se implementa en una nave de 85x35 m en planta, con dos accesos por cada uno de los laterales. Por las características de la nave, un acceso en cada extremo, y, teniendo en cuenta que el flujo de piezas sigue prácticamente la secuencia de Limpieza-Granallado-Pintado, se configura el flujo para que éste circule desde el acceso de la izquierda hasta la salida de la derecha, tal y como muestra la siguiente figura:

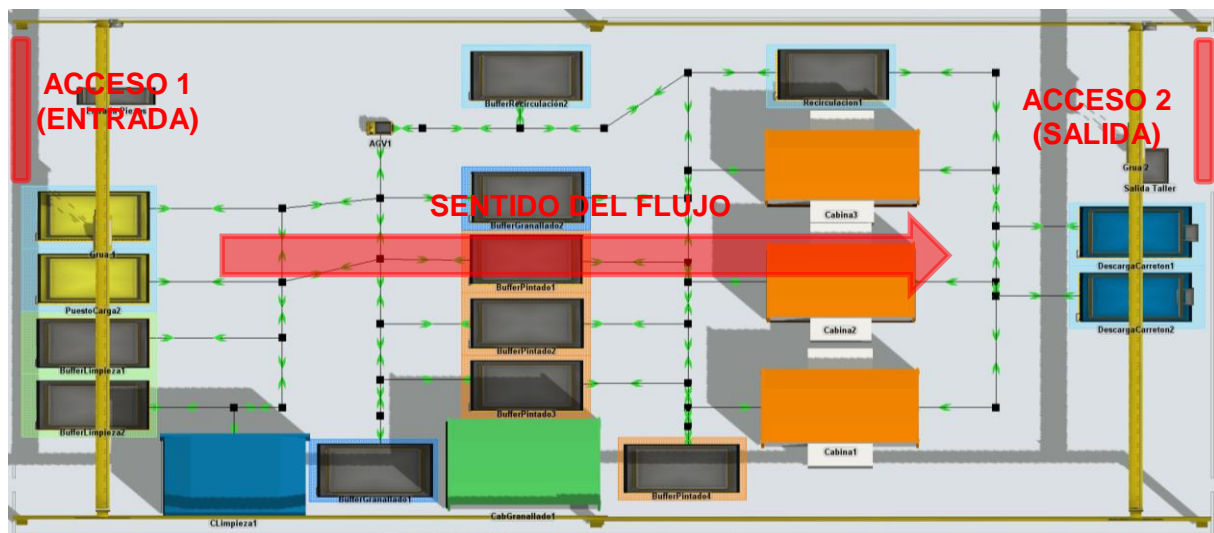


Figura 11 Accesos y sentido de flujo del Layout 1

Las piezas serán tratadas en cabinas especialmente diseñadas para cada uno de los tratamientos. Se dispondrá de una cabina para Limpieza y Granallado respectivamente y tres cabinas para Pintado. Las cabinas se disponen de tal modo que el flujo de entrada a salida sea lineal.

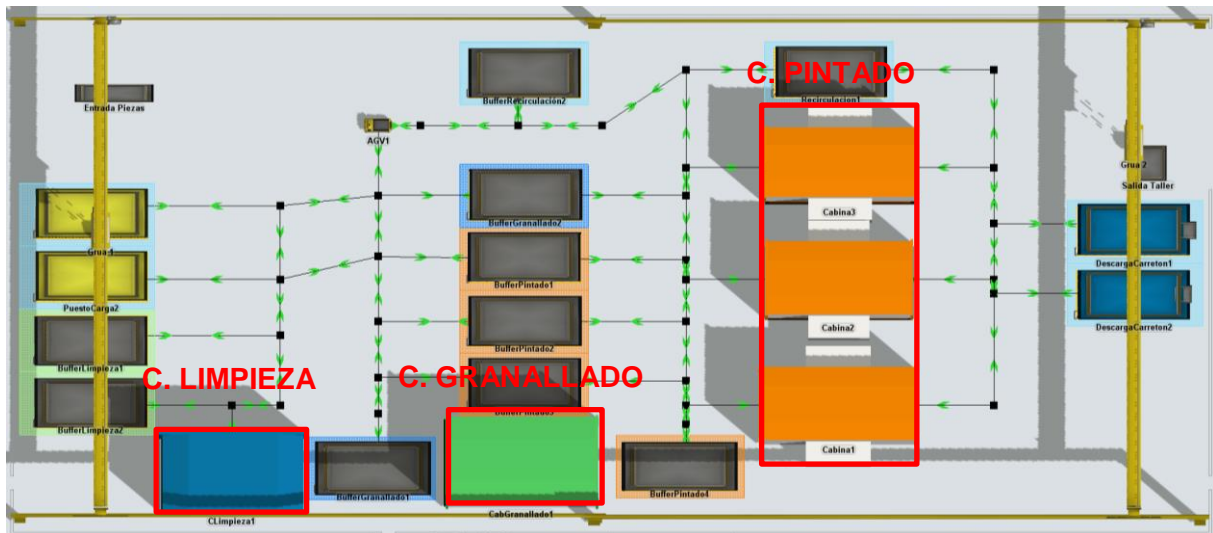


Figura 12 Ubicación de las cabinas de tratamiento en el *Layout 1*

Dado el tamaño de los carretones, no es posible almacenar un número ilimitado de ellos en el espacio de la planta de tratamiento. Por ello, en la simulación se tienen en cuenta las limitaciones de espacio del proceso. En el modelo de simulación se considera la siguiente distribución de buffers en la planta:

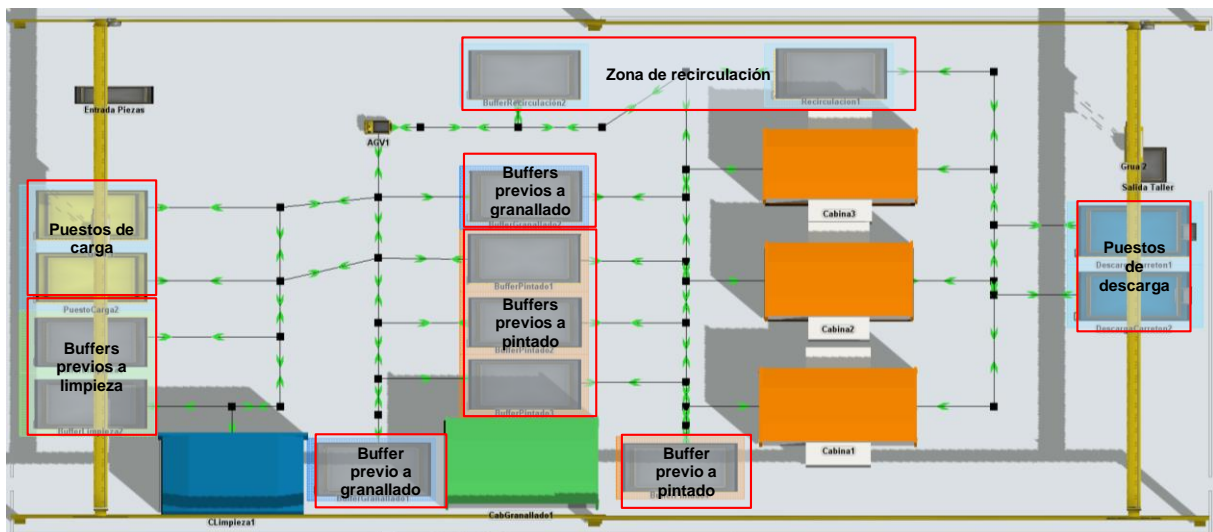


Figura 13 Ubicación de buffers de almacenamiento en el *Layout 1*

Nótese que esta es la configuración que se ha simulado, pero la definición de estos buffers intermedios es fácilmente modificable en la práctica. En concreto, las restricciones de espacio hacen que no se pueda variar (aumentar) significativamente el número de zonas de buffer, pero sí sería posible en la práctica su reasignación a tareas distintas en momentos puntuales.

En resumen, los buffers considerados para las diferentes tareas son los siguientes:

Buffer	Capacidad
Buffer previo a Limpieza	2
Previo a Granallado	2
Previo a Pintado	4
Puestos de carga	2
Puestos de descarga	2
Recirculación de carretones (en espera)	2

Tabla 4 Capacidad de almacenamiento en buffers intermedios en *Layout 1*

Por último, la carga y descarga de piezas se realiza a través de 2 puentes grúa dispuestos en cada extremo de la nave, encargándose uno de la carga de piezas y otro de la descarga.

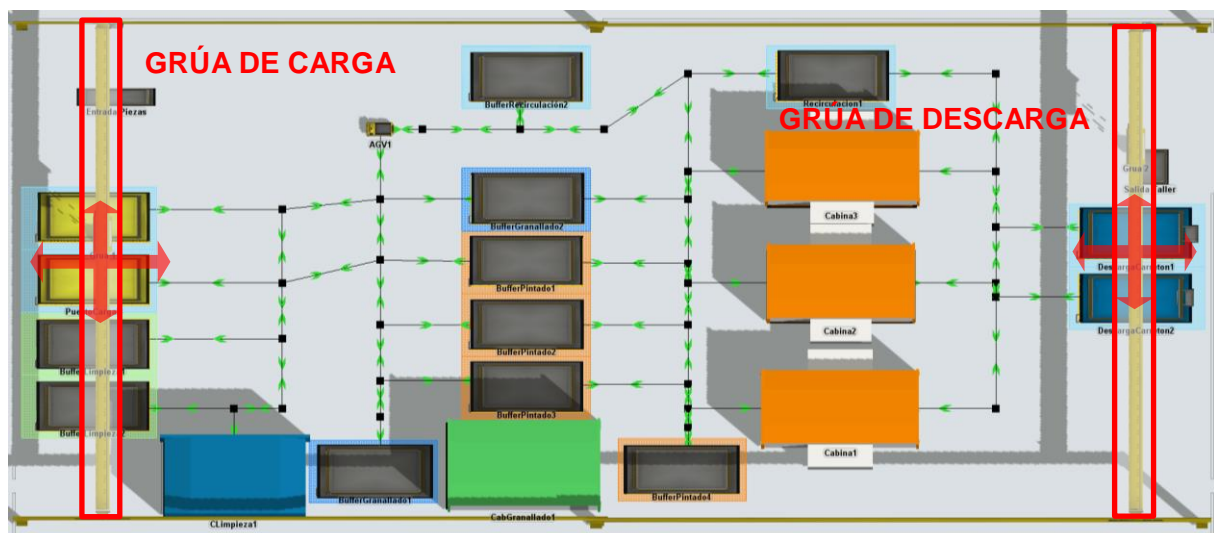


Figura 14 Carga y descarga de piezas en *Layout 1*

4.4.2 Configuración de *Layout 2*

La segunda configuración se implementa en una nave de 78x30 m en planta y con un único acceso por uno de los laterales. Por las características más compactas de la nave y por disponer de un único acceso, el flujo deberá realizarse en ambos sentidos, de manera que la entrada y salida de piezas se produce por el mismo acceso, tal y como muestra la siguiente figura:

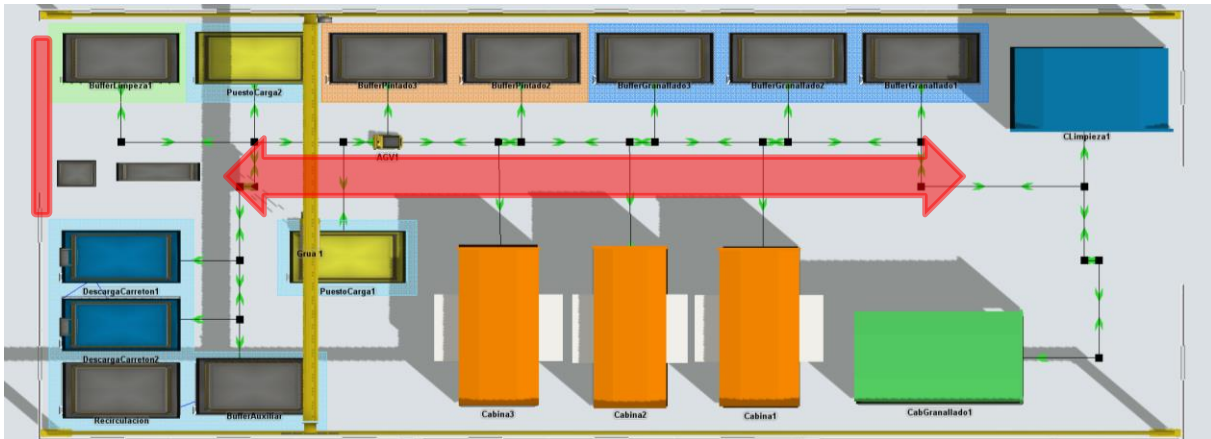


Figura 15 Accesos y sentido de flujo de *Layout 1*

De igual modo que en el *Layout 1*, las piezas serán tratadas en cabinas especialmente diseñadas para cada uno de los tratamientos. Se dispondrá de una cabina para Limpieza y Granallado respectivamente y tres cabinas para Pintado. En este caso no es posible realizar un flujo lineal por lo que las cabinas se colocarán en los extremos de la nave de tal modo que se disponga de un carril central de paso para el transporte de los carretones mediante AGV:

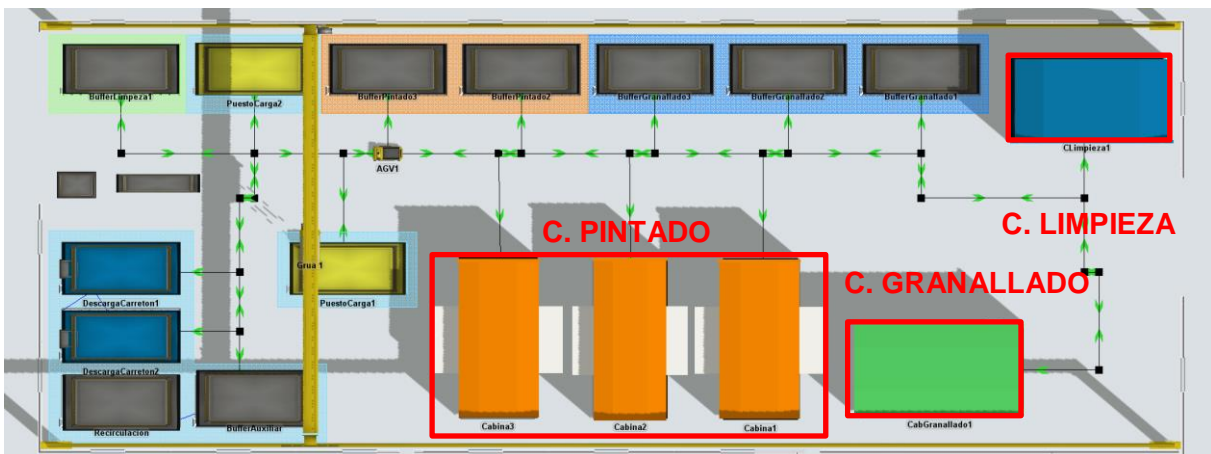


Figura 16 Ubicación de las cabinas de tratamiento en el *Layout 2*

Así mismo, en la simulación se tienen en cuenta las limitaciones de espacio del proceso. Para ello se agrupan en las inmediaciones del acceso a la nave los puestos de carga, los puestos de descarga y la zona de recirculación, para facilitar el flujo de carretones y la entrada/salida de piezas. En el modelo de simulación se considera la siguiente distribución de buffers en la planta:

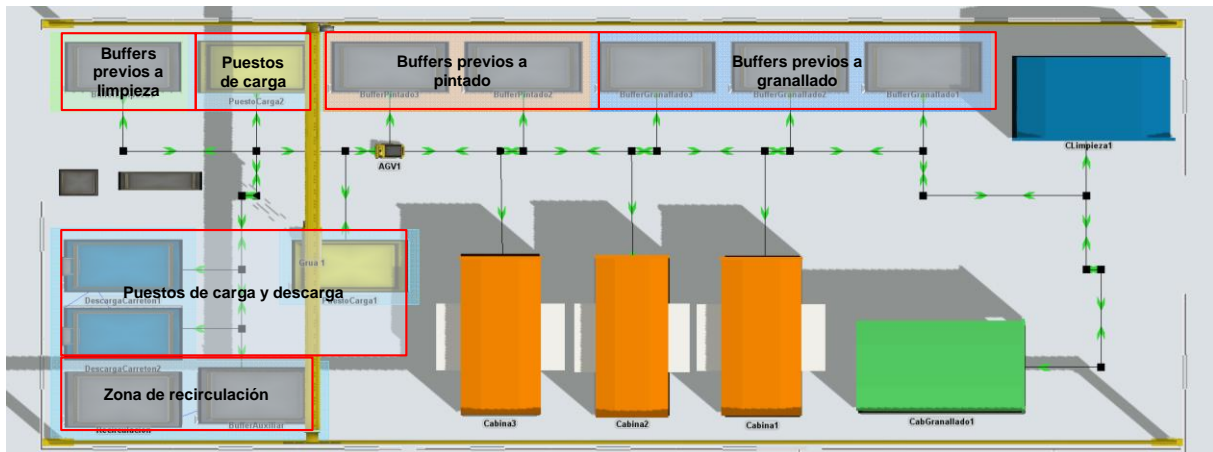


Figura 17 Ubicación de buffers de almacenamiento en el *Layout 2*

Del mismo modo que en el *Layout 1*, la definición de estos buffers intermedios es fácilmente modificable en la práctica, reasignándolos a tareas distintas en momentos puntuales.

En resumen, los buffers considerados para las diferentes tareas son los siguientes:

Buffer	Capacidad
Buffer previo a Limpieza	1
Previo a Granallado	3
Previo a Pintado	2
Puesto de carga	2
Puesto de descarga	2
Recirculación de carretones (en espera)	2

Tabla 5 Capacidad de almacenamiento en buffers intermedios en *Layout 2*

Por último, la carga y descarga de piezas se realiza a través de un único puente grúa.



Figura 18 Carga y descarga de piezas en *Layout 2*

4.4.3 Comparativa de layouts

Las dos principales diferencias entre los dos *layouts* son las dimensiones de la nave y los accesos. Comparativamente, la nave considerada en el *Layout 1* dispone de 635 m² de espacio en planta que el *Layout 2*, además, cuenta con dos accesos en ambos extremos de nave mientras que el *Layout 1* dispone de un único acceso.

En base a lo anterior, en el *Layout 1* se aprovechan los dos accesos para que el flujo de piezas sea prácticamente lineal (de un extremo de la nave a otro), mientras que en el *Layout 2* necesariamente debe realizarse en ambos sentidos. Así mismo, el disponer de más espacio en el *Layout 1*, supone contar con una zona de paso más amplia y 2 *buffers* intermedios más que en el *Layout 2*. Por otro lado, en el *Layout 1* se han dispuesto 2 puentes grúa debido a la separación entre los puestos de carga/descarga, mientras que en el *Layout 2*, al estar agrupados, se considera de un único puente grúa.

En la siguiente tabla se resumen las diferencias entre en cada una de las configuraciones de *layout*.

Características de la nave	Layout 1	Layout 2
Dimensión en planta	85x35 m	78x30 m
Nº de Accesos	2	1
Nº de Recursos	Layout 1	Layout 2
Buffers previos a Limpieza	2	1
Buffers previos a Granallado	2	3
Buffers previos a Pintado	4	2
Puestos de carga	2	2
Puestos de descarga	2	2
Buffers recirculación de carretones	2	2
Puentes grúa	2	1
Cabinas de Limpieza	1	1
Cabinas de Granallado	1	1
Cabinas de Pintado	3	3

Tabla 6 Comparativa entre *Layout 1* y *Layout 2*

4.5 Diseño y modelado del proceso

A continuación, se define la lógica interna del proceso de tratamiento de piezas. En este punto no se realizará la diferenciación entre *Layout 1* y *Layout 2* puesto que la programación y el tipo de estaciones de trabajo es idéntica para ambos casos.

4.5.1 Llegada de piezas

La recepción de piezas se realizará a través de camiones o carretillas que transportan el material desde el origen hasta la planta de tratamiento. Para modelar este proceso de llegada, se utiliza una lógica que genera piezas agrupadas por códigos o *labels*. Estos *labels* tienen la función de asignar un carretón para el transporte de las piezas por todo el flujo de proceso (*Process Flow*) correspondiente. Es decir, se simulan aleatoriamente, conjuntos distintos de piezas (aceros y plomeros, marineros y taller).

Las piezas se generan en interior del *buffer de Llegada a taller*, simulando la llegada de las piezas mediante camiones o carretillas. El ritmo de llegada se puede establecer mediante una programación de llegada o bien al máximo ritmo posible (sistema Push¹⁷). Este sistema consiste en procesar piezas siempre que sea posible, esto es, siempre que la estación de trabajo no se vea bloqueada por otras estaciones de trabajo o buffers con capacidad limitada aguas abajo. La principal ventaja de simular el proceso al mayor ritmo posible, es que una vez se obtienen los resultados de la simulación, se pueden planificar de manera más precisa los plazos de producción al conocer la capacidad de producción máxima.

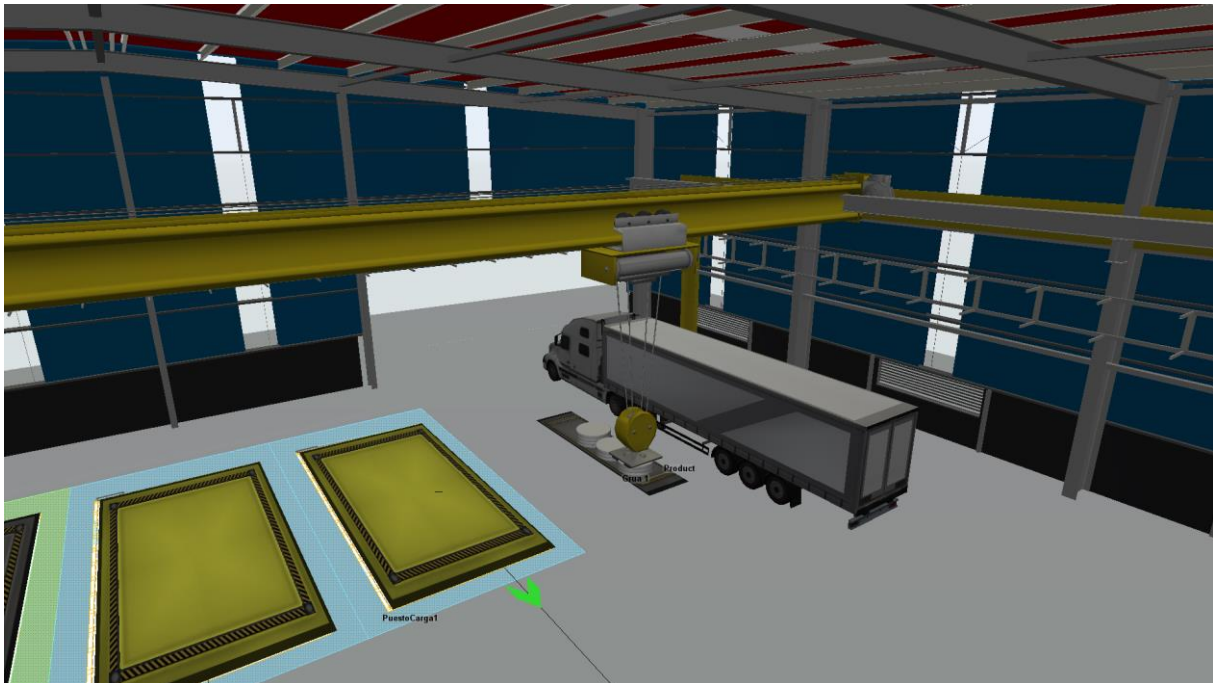


Figura 19 Llegada de piezas a la planta de tratamiento

Aunque en el punto 4.2.1 se ha mencionado que en la planta de tratamiento se procesan tres grupos de piezas, que a su vez incluyen subgrupos de diferentes tipologías, el definir todas las tipologías de piezas con todas sus variantes (tamaños, necesidades de tratamiento y capas de pintado) sería una tarea muy laboriosa y tampoco se dispone de suficiente información de todas las posibles tipologías de piezas para realizar un modelado de detalle. En su lugar, se genera un único tipo de pieza (*Cylinder*) a la que le serán asignados una serie de *labels* que permitirán agruparlas en un mismo carretón y, posteriormente, transportarlas a la estación de trabajo correspondiente de acuerdo a una distribución estadística prefijada. Este proceso de generación de piezas se modela en el *Process Flow (PF)* denominado *Generación de piezas* de la Figura 20.

¹⁷ Sistema de control de la producción por empuje en el que el flujo de órdenes de producción tiene el mismo sentido que el flujo de órdenes de producción.

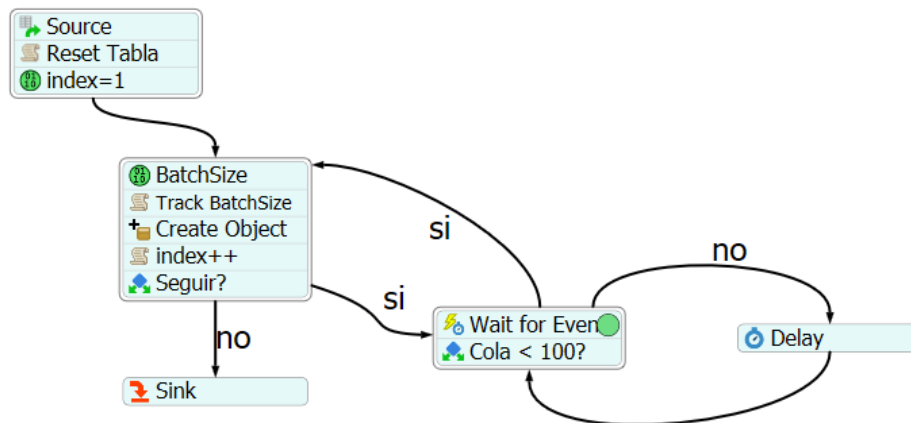


Figura 20 PF de Generación de piezas

En el *PF de Generación de piezas* se crean cíclicamente lotes de piezas con un tamaño que está determinado estadísticamente de acuerdo a una distribución prefijada.

Una vez comenzada la simulación, se crea un *label* denominado *bSize* que asigna el tamaño de lote de piezas que se va a generar según la *Tabla 7*. Puesto que las piezas se podrían combinar de múltiples formas dentro de un mismo carretón, los tamaños de lotes serían a su vez proporcionales al número de combinaciones. Para simplificar el número de posibles lotes, NAVANTIA ha definido, en función de las dimensiones del carretón, una distribución estadística de tres tamaños de lotes.

	<i>BatchTable</i>	
	Probabilidad (%)	Número de piezas
<i>bSize 1</i>	34	10
<i>bSize 2</i>	33	5
<i>bSize 3</i>	33	30

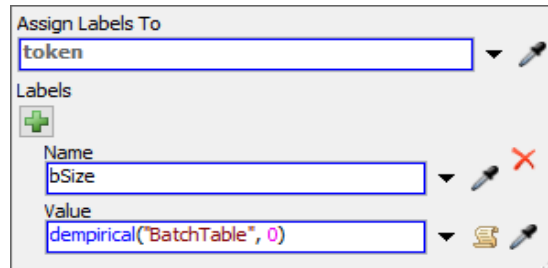


Tabla 7 Tabla de tamaños de lotes (izquierda) y asignación de *label bSize* (derecha)

Una vez asignado el tamaño de lote, se procede, por un lado, a la creación de las piezas (*Cylinders*) mediante la actividad denominada *Create Object*, y por otro, a la asignación de dos *labels* adicionales: "*code*" y "*capas*". El *label* denominado *code*, asigna a las piezas de un mismo lote un número identificativo que permite conocer el lote al que pertenecen. Este número identificado se asigna a partir del *label* denominado *index*, que ve incrementado¹⁸ su valor cada vez que se crea un lote. Por último, se crea el *label capas* que asignará el número de capas de pintado necesarias en la posterior actividad de Pintado.

¹⁸ El incremento se realiza en la actividad *Index++*.

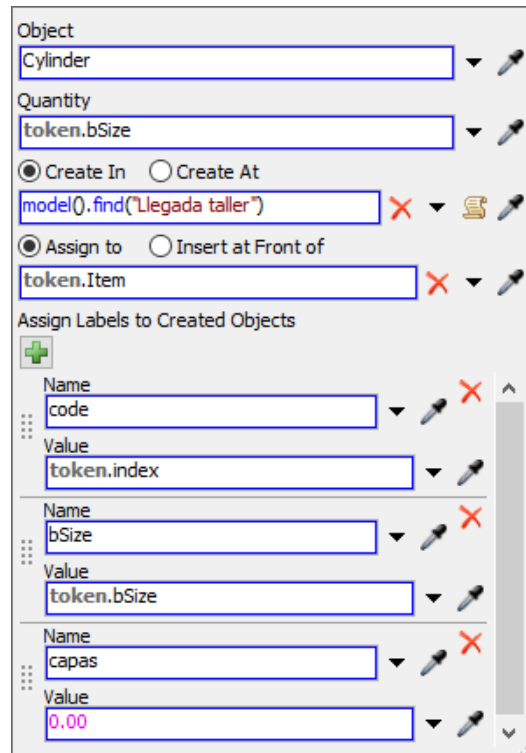


Figura 21 Actividad Create Object

Puesto que para análisis posteriores será necesario conocer el instante en el que las piezas entran al taller, se crea un *label* denominado *tEntrada*. El valor de esta etiqueta se genera mediante el uso de un *Trigger*. En este caso, en el momento en que las piezas se crean en el buffer de entrada se produce la asignación del momento de la simulación en el que las piezas se crean. Este parámetro será de utilidad en la fase de análisis y verificación del modelo.

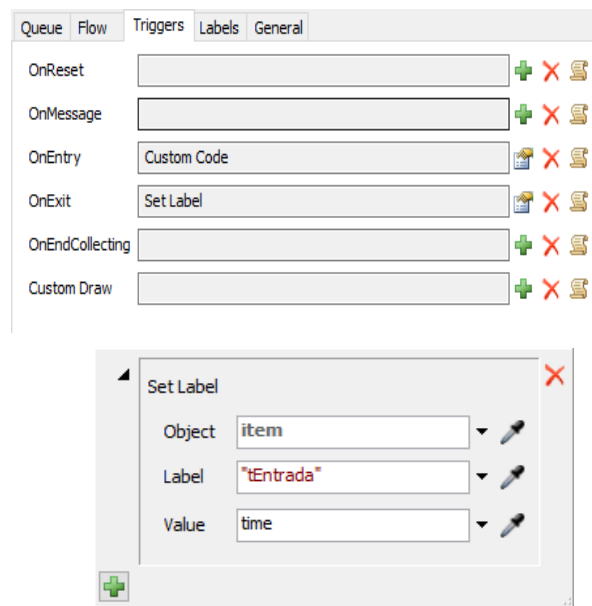


Figura 22 Menú de configuración de *Triggers* (imagen superior) y asignación del tiempo de entrada (imagen inferior)

A continuación, en el momento en que las piezas abandonan el buffer de entrada se asigna un valor al *label capas* de acuerdo a una distribución estadística fijada por NAVANTIA en base a experiencias previas de Pintado. La distribución con la que se asignan las capas a las piezas se muestra en la siguiente tabla:

Nº capas pintado	1	2	3	4	5	6
Probabilidad	40%	50%	4%	1%	1%	4%

Tabla 8 Distribución estadística del número de capas de pintado

A medida que se crean nuevos lotes, además de actualizar el número de lotes creados (*label index*) también se realiza una actualización del número acumulado de piezas generadas (*label totCreated*). El número piezas totales generadas se obtiene conociendo el tamaño del último lote generado y el total acumulado hasta el momento. La expresión de piezas totales generadas sería la siguiente:

$$totCreated = totCreated + bSize$$

FlexSim permite fijar un tiempo de simulación determinado de manera que se pueden obtener resultados de “*piezas máximas procesadas*” en un tiempo estipulado. Ya que también puede ser necesario simular el proceso desde el enfoque de “*tiempo que se tardaría en procesar un número concreto de piezas*”, se ha definido la variable global *WorkLoad*. Esta variable indica la carga de trabajo que se debe procesar de manera que cada vez que se crea un lote, se comprueba si se ha superado la carga de trabajo *WorkLoad* y, en caso de superarse, cesar de crear nuevas piezas; o en caso contrario, verificar si hay suficiente espacio¹⁹ en la zona de entrada para la carga del siguiente lote de piezas. En caso de no haberlo, se producirá una demora hasta que haya espacio disponible.

4.5.2 Proceso de carga

+

Si un carretón se encuentra disponible para la carga de piezas, se realiza el transporte ejecutando la subrutina de transporte mediante puente grúa (explicada posteriormente). En la simulación del proceso se ha asumido que las piezas serán descargadas mediante el puente grúa y la presencia de un operario (si bien en la práctica no siempre será necesario el puente grúa). Aunque los puentes grúa pueden realizar el transporte de varias piezas simultáneamente, en la simulación se realiza pieza a pieza para comprobar que la capacidad de la grúa es suficiente bajo las condiciones más desfavorables de trabajo.

¹⁹ El espacio en la zona de entrada es una variable programable en función de la capacidad de los medios de transporte

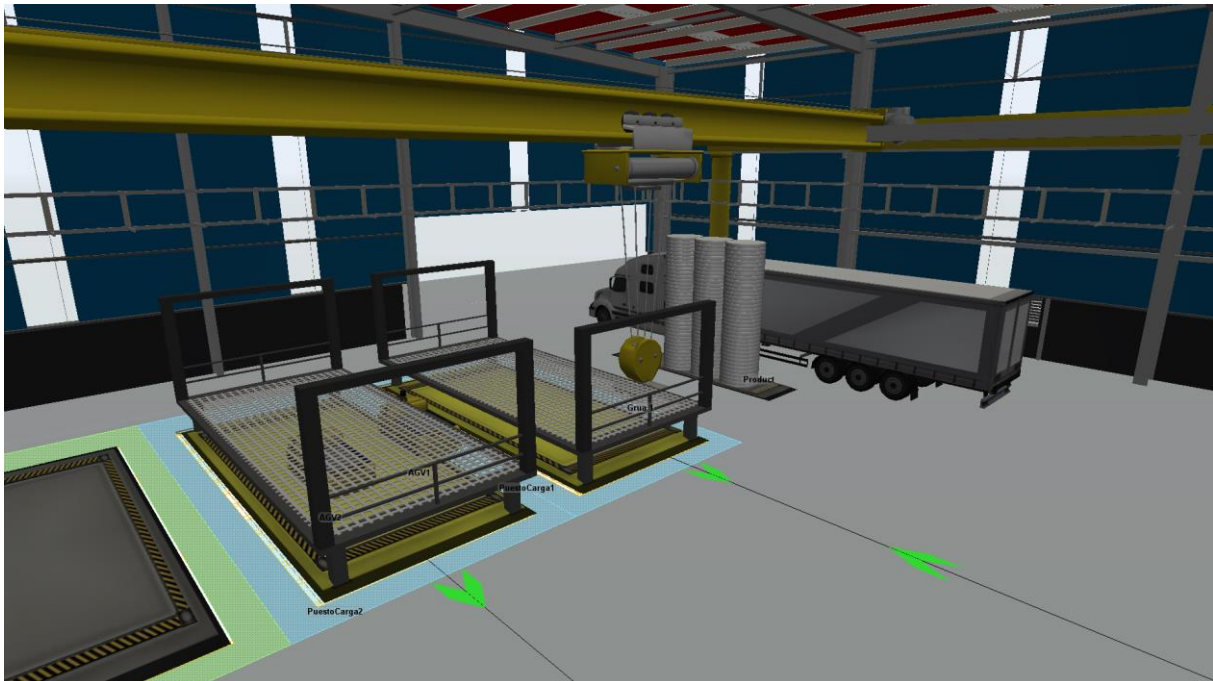


Figura 23 Proceso de carga de piezas en carretones

El modelado del proceso de carga de piezas en los carretones se realiza mediante el *Process Flow* denominado *Puesto de carga* que se muestra en la Figura 24 .

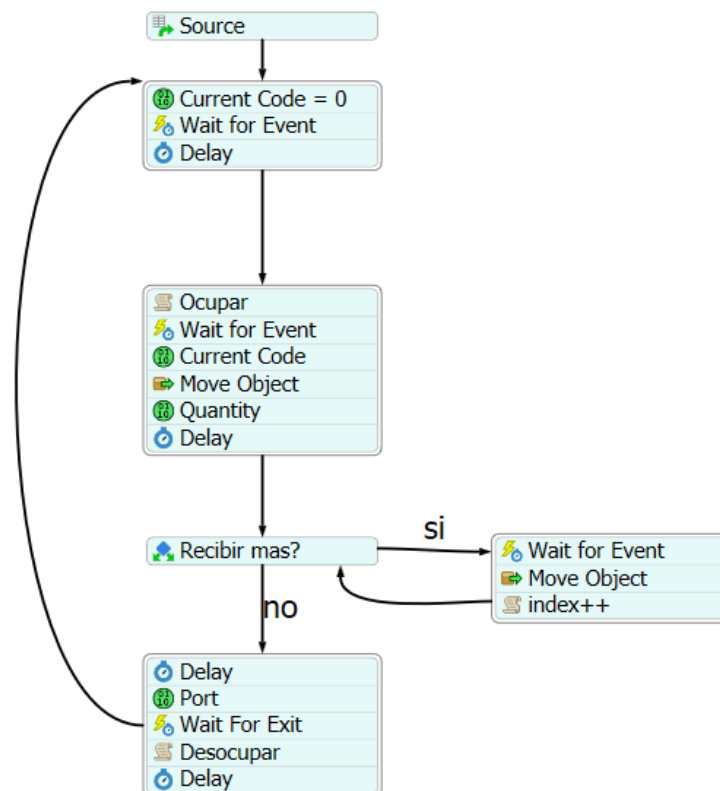


Figura 24 PF Puesto de Carga

Una vez el carretón entra en el *Puesto de carga* se ejecuta la actividad *Ocupar* que le asigna el estado *Busy* al *Puesto de carga*. De esta forma bloquea la entrada de otros carretones hasta que finalice el proceso de carga del actual carretón y sea transportado a las siguientes etapas del proceso.

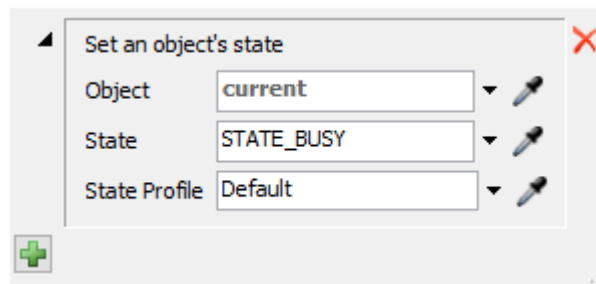


Figura 25 Cambio de estado del puesto de carga a *Busy*

En ese momento el carretón está listo para comenzar a recibir piezas del *buffer* de *Llegada a taller*. Para conocer el número de piezas que se deben cargar dentro de un mismo carretón, se crea un *label* denominado *q*, al que se le asigna el tamaño de lote de la primera pieza que se carga en el carretón, siendo ésta la que marcará la capacidad del carretón.

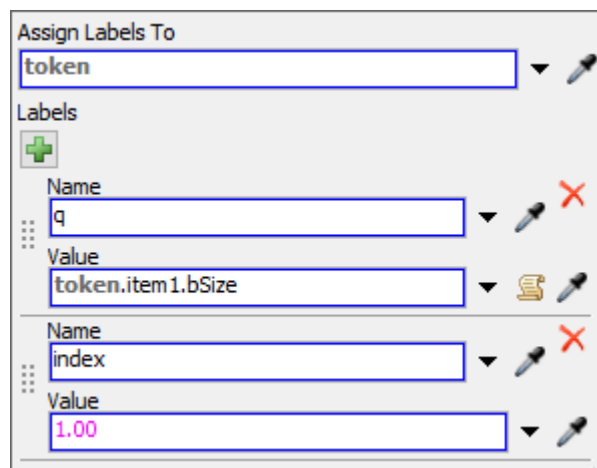


Figura 26 Asignación de la capacidad del carretón

Por otro lado, para contabilizar el número de piezas que se han introducido en el carretón se crea un *label* denominado *index* que incrementará su valor en una unidad cada vez que se cargue una pieza en el carretón. Así, antes de cargar una pieza en el carretón se comprobará que el número de piezas que contiene el carretón es menor a su capacidad y, en ese caso, se procederá a seguir cargando el carretón. En caso contrario, finaliza el proceso de carga y se procederá a transportar en carretón a la siguiente estación.

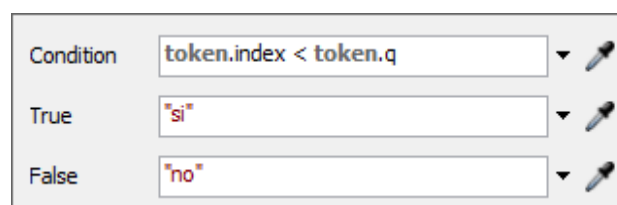


Figura 27 Decisión condicional de carga de carretón

Tal y como se establece en la Figura 7, el carretón se dirigirá bien a Limpieza o bien a Granallado de acuerdo a una distribución estadística. Además, los puestos de carga están unidos, mediante conectores, a los buffers intermedios creando un puerto de salida por cada conexión. A cada puerto de salida se le asigna un valor numérico de acuerdo al orden de unión. Por este motivo, el número de cada puerto de salida es un dato conocido y se muestra en la siguiente figura:

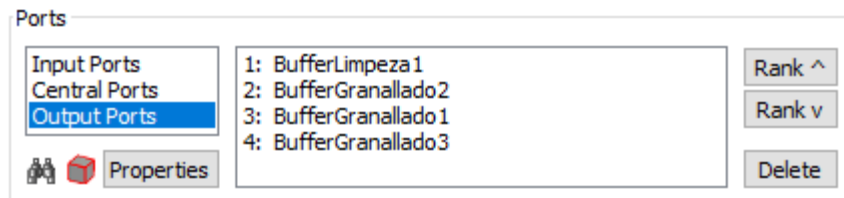


Figura 28 Puertos de salida de los puestos de carga

En consecuencia, cada vez que un carretón salga del *Puesto de carga* deberá tomar el puerto número 1 para dirigirse a Limpieza y los puertos 2,3 y 4 para dirigirse a Granallado.

El puerto de salida del carretón se establecerá mediante la función de la Figura 29. En este caso existe un 38% de probabilidad de que el carretón se dirija al *buffer* de Limpieza mientras existe un 62% de probabilidad de que dirija al *buffer* de Granallado. Como en este caso, existen tres *buffers* de Granallado, se emplea un *bucle for* para comprobar la ocupación de todos los *buffers* de Granallado. Cuando uno de ellos esté libre, la función devolverá el número de puerto correspondiente para transportarlo.

```
1 /**Custom Code*/
2 Object item = param(1);
3 Object current = ownerobject(c);
4
5
6 int stream = 0;
7 double randomnum = uniform(0.0, 100.0, stream);
8 double total = 0.0;
9
10 total += 38;
11 if (randomnum <= total)
12     return 1;
13 total += 62;
14 if (randomnum <= total)
15 {
16     for (int i=2; i<=current.outObjects.length; i++)
17     {
18         if (opavailable(current,i))
19             return i;
20     }
21 }
22 return 0;
```

Figura 29 Función de asignación de puertos de salida de los puestos de carga

Una vez el AGV cargue el carretón y abandone el *Puesto de carga*, se ejecuta la actividad *Desocupar* que le asigna el estado *Idle*. De esta forma, se permite la entrada de carretones para comenzar de nuevo el proceso de carga.

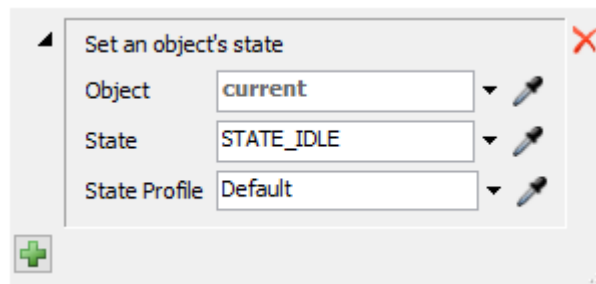


Figura 30 Cambio de estado del puesto de carga a *Idle*

4.5.3 Estaciones de trabajo

En el modelo de simulación se incluyen tres tipos de estaciones de trabajo correspondientes a los tres tipos de cabinas que realizan cada uno de los tratamientos detallados anteriormente (Limpieza, Granallado y Pintado).

– Cabina de Limpieza

Como se ha descrito en el punto 4.5.2, una vez los carretones se han cargado por completo, el proceso se bifurca en dos direcciones. Una de ellas comienza en la estación de Limpieza.

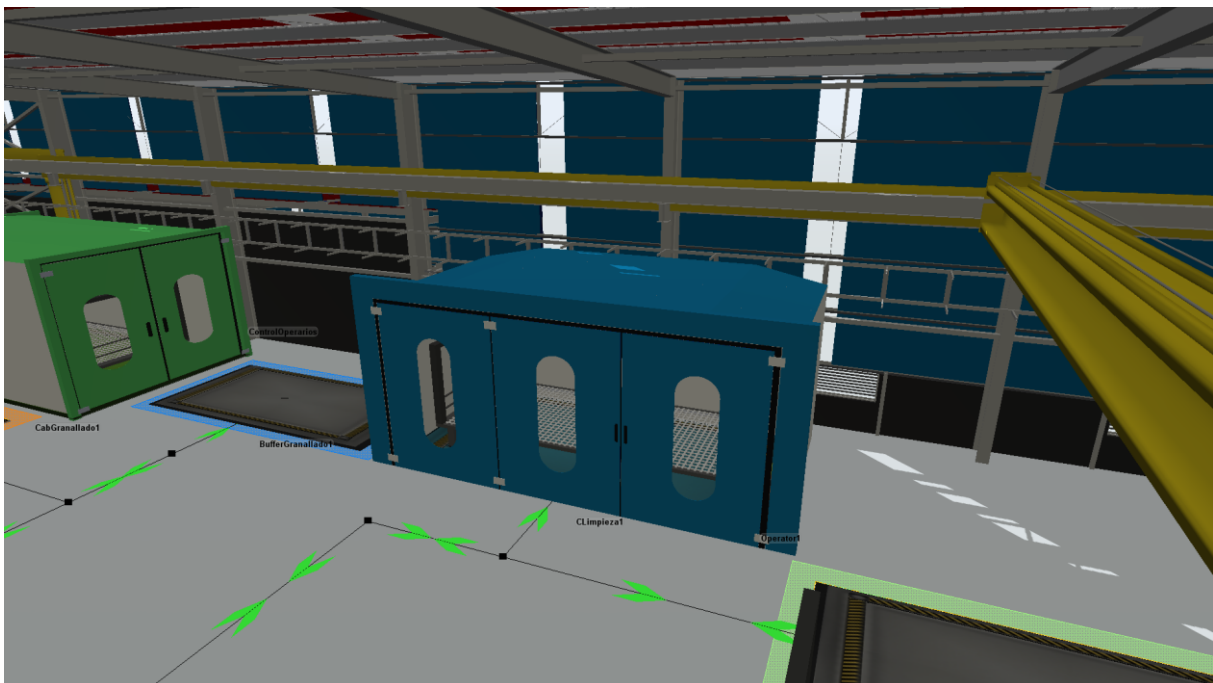


Figura 31 Cabina de limpieza para tratamiento de piezas en carretones

El modelado del proceso de Limpieza de piezas en el interior de la cabina de Limpieza se realiza mediante el *PF* denominado Limpieza que se muestra en la Figura 32 Figura 32:

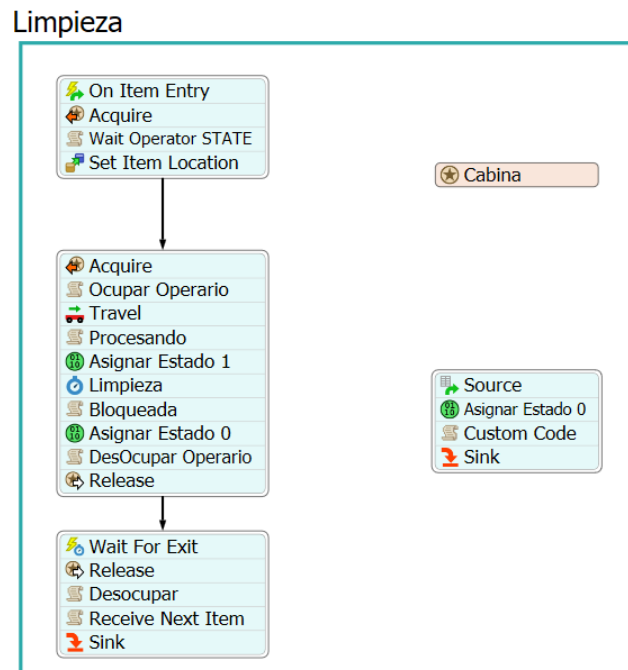


Figura 32 PF de Limpieza

Para realizar el tratamiento de Limpieza es necesario un operario y la propia cabina de Limpieza. Estos dos elementos se modelan como *Recursos* que se deberán solicitar y que serán asignados en función de su disponibilidad.

En el momento en el que el AGV entra en la cabina de Limpieza para depositar el carretón se procede a adquirir el recurso de cabina y cambiar su estado a *Waiting for operator*.

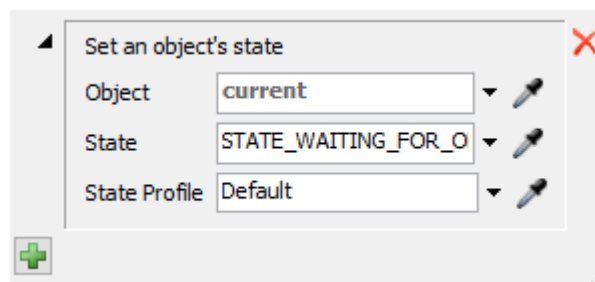


Figura 33 Cambio de estado de la cabina a *Waiting for operator*

A continuación, el operario deberá finalizar los trabajos que esté realizando para realizar el tratamiento de Limpieza. Tras finalizar, el estado del operario pasará a ser *Processing*, indicando que el operario está en proceso de realizar el tratamiento de Limpieza.

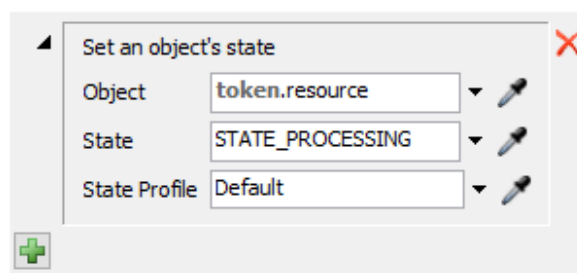


Figura 34 Cambio de estado del operario en tratamiento de Limpieza

Para ello, el operario deberá trasladarse desde su ubicación actual hasta la cabina de Limpieza. Inmediatamente después, la cabina cambiará de estado a *Processing* y se creará un *label* denominado *Estado* al que se le asignará el valor de 1 comenzando así el tratamiento de Limpieza. Tras concluir el tratamiento, el estado de la cabina cambiará a *Blocked* y se modificará el *label Estado* asignándole el valor 0.

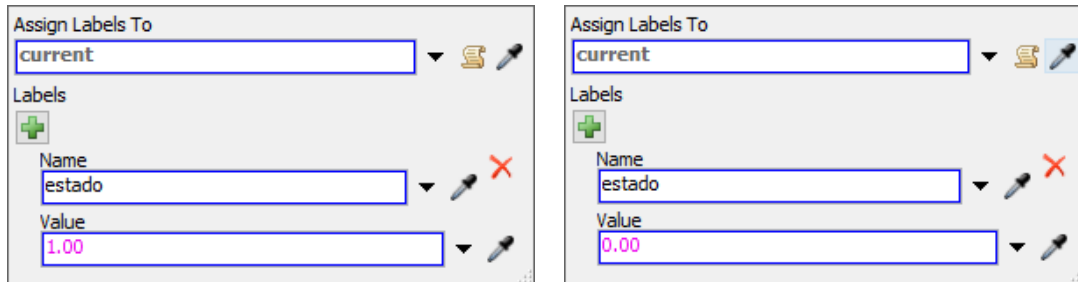


Figura 35 Asignación de estados a la cabina

Seguidamente, se cambiará el estado del operario a *Idle* liberándolo del trabajo de Limpieza pudiendo continuar con otras tareas. Una vez se solicita el transporte de AGV y este se encuentra disponible, el carretón abandona la cabina de Limpieza, esta se libera como recurso y cambia su estado a *Idle*, pudiendo recibir el siguiente carretón.

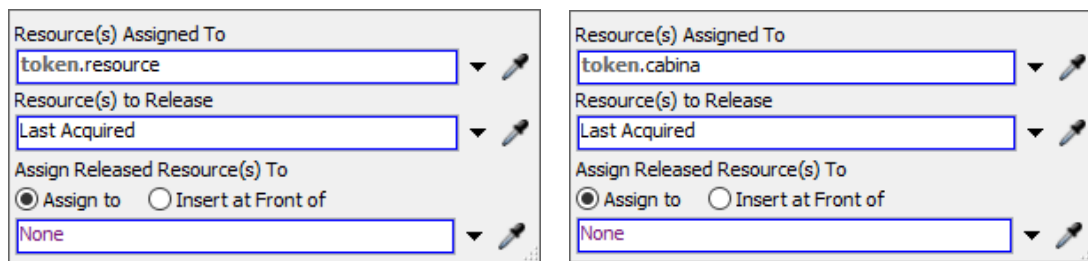


Figura 36 Liberación del operario (izquierda) y liberación de la cabina de limpieza (derecha)

De igual forma, como se establece en la Figura 7, el carretón se dirigirá a la Salida de taller o a Granallado. Los posibles puertos de salida de la cabina de Limpieza son los siguientes:

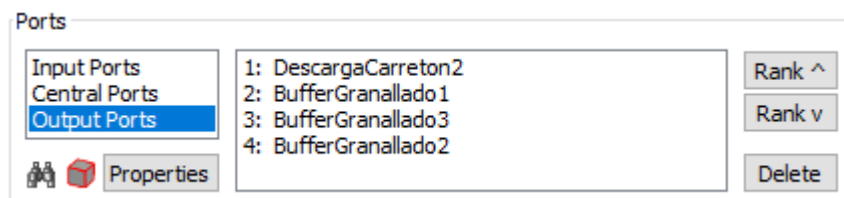


Figura 37 Puertos de salida de la cabina de limpieza

En consecuencia, cada vez que un carretón salga de los Puestos de carga deberá tomar el puerto número 1 para dirigirse a la Salida de taller y los puertos 2,3 y 4 para dirigirse a Granallado.

El puerto de salida del carretón se establecerá mediante la función de la Figura 37. En este caso existe un 30% de probabilidad de que el carretón se dirija a la salida de taller mientras que existe un 70% de probabilidad de que dirija al Granallado. Como en este caso, existen

tres *buffers* de Granallado, se emplea un *bucle for* para comprobar la ocupación de todos los *buffers* de Granallado. Cuando uno de ellos esté libre, la función devolverá el número de puerto correspondiente para transportarlo.

```
1 /**Custom Code*/
2 Object item = param(1);
3 Object current = ownerobject(c);
4
5
6 int stream = 0;
7 double randomnum = uniform(0.0, 100.0, stream);
8 double total = 0.0;
9
10 total += 30;
11 if (randomnum <= total)
12     return 1;
13 total += 70;
14 if (randomnum <= total)
15 {
16     for (int i=2; i<=current.outObjects.length; i++)
17     {
18         if (opavailable(current,i))
19             return i;
20     }
21 }
22 return 0;
23
```

Figura 38 Función de asignación de puertos de salida de la cabina de limpieza

– Cabina de Granallado

La cabina de Granallado recibirá carretones que provienen de la cabina de Limpieza o bien de los Puestos de carga.

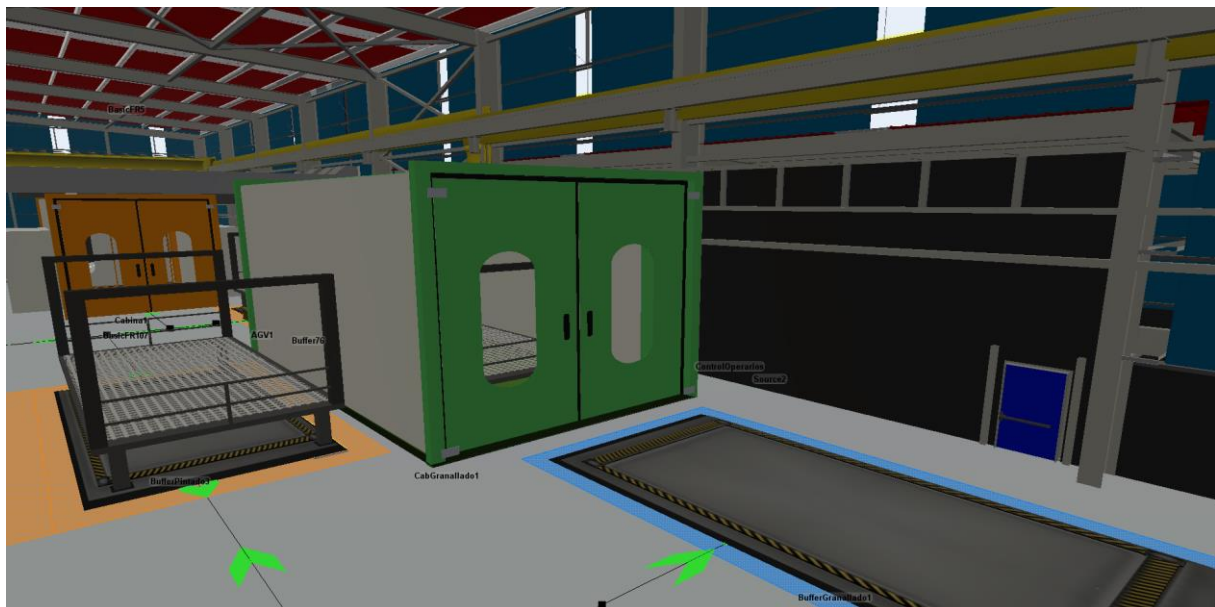


Figura 39 Cabina de granallado para tratamiento de piezas en carretones

El modelado del proceso de Granallado de piezas en el interior de la cabina de Granallado se realiza mediante el *PF* denominado Granallado que se muestra en la Figura 40:

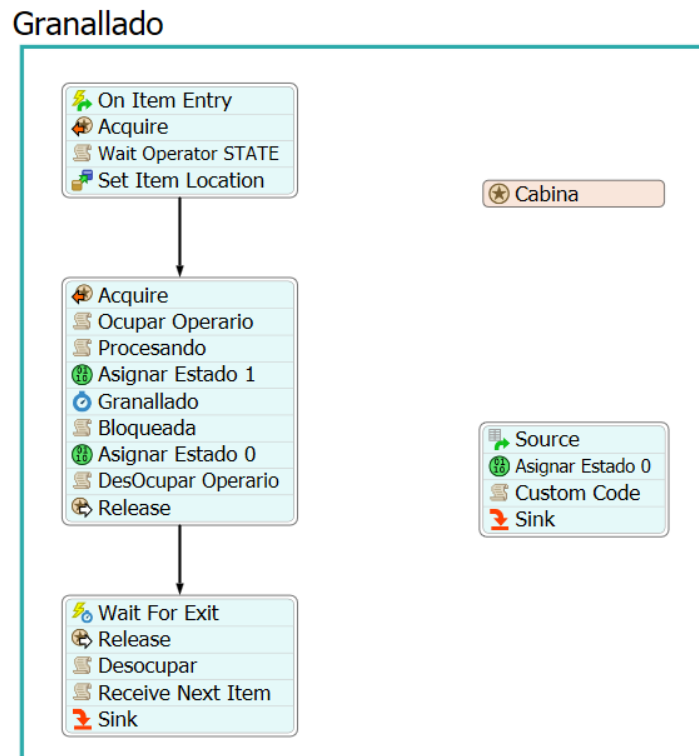


Figura 40 PF de Granallado

El *Process Flow* de Granallado sigue la misma estructura que el *Process Flow* de Limpieza:

Para realizar el tratamiento de Granallado es necesario un operario y la propia cabina de Granallado. En el momento en el que el AGV entra en la cabina de Granallado para depositar el carretón, se procede a adquirir el recurso de cabina de Granallado y cambiar su estado a *Waiting for operator* tal y como indica la Figura 33.

A continuación, el operario deberá finalizar los trabajos que esté realizando para realizar el tratamiento de Granallado. Tras finalizar, el estado del operario pasará a ser *Processing*, de igual manera que en la Figura 34, indicando que el operario está en proceso de realizar el tratamiento de Granallado. Para ello, el operario deberá trasladarse desde su ubicación actual hasta la cabina de Granallado. Inmediatamente después, la cabina cambiará de estado a *Processing* y se creará un *label* denominado *Estado* al que se le asignará el valor de 1 comenzando así el tratamiento de Granallado. Tras concluir el tratamiento, el estado de la cabina cambiará a *Blocked* y se modificará el *label Estado* asignándole el valor 0.

Seguidamente, se cambiará el estado del operario a *Idle* liberándolo del trabajo de Granallado pudiendo continuar con otras tareas. Una vez se solicita el transporte de AGV y este se encuentra disponible, el carretón abandona la cabina de Granallado, esta se libera como recurso y cambia su estado a *Idle*, pudiendo recibir el siguiente carretón.

Tal y como establece la Figura 7, el carretón se dirigirá a la Salida de taller o Pintado. En función de ello los posibles puertos de salida de la cabina de Granallado son los siguientes:

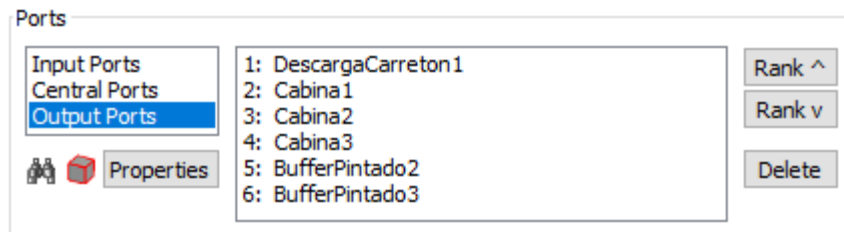


Figura 41 Puertos de salida de la cabina de limpieza

En consecuencia, cada vez que un carretón salga del *Puesto de carga* deberá tomar el puerto número 1 para dirigirse a la Salida de taller y los puertos 2,3,4,5 y 6 para dirigirse a Pintado.

El puerto de salida del carretón se establecerá mediante la función de la Figura 43. En este caso existe un 40% de probabilidad de que el carretón se dirija a la salida de taller mientras que existe un 60% de probabilidad de que dirija a Pintado. Como en este caso, existen tres buffers de Pintado y tres cabinas de Pintado, se emplea, de igual forma que en el caso de los puestos de carga, un bucle for para comprobar la ocupación de las cabinas y los buffers de espera. Cuando una de las cabinas este libre o en su defecto, uno de los buffers de Pintado, la función devolverá el número de puerto correspondiente para enviarlo a dicha cabina o buffer.

```
1 /**Custom Code*/
2 Object item = param(1);
3 Object current = ownerobject(c);
4
5
6 int stream = 0;
7 double randomnum = uniform(0.0, 100.0, stream);
8 double total = 0.0;
9
10 total += 40;
11 if (randomnum <= total)
12     return 1;
13
14 total += 60;
15 if (randomnum <= total)
16 {
17     for (int i=2; i<=current.outObjects.length; i++)
18     {
19         if (opavailable(current,i))
20             return i;
21     }
22 }
23 return 0;
24
25
```

Figura 42 Función de asignación de puertos de salida de la cabina de granallado

– **Cabina de Pintado**

Por ser el tratamiento de mayor duración, se ha dispuesto de 3 cabinas de Pintado en la zona central de la nave como se muestra en la siguiente figura:

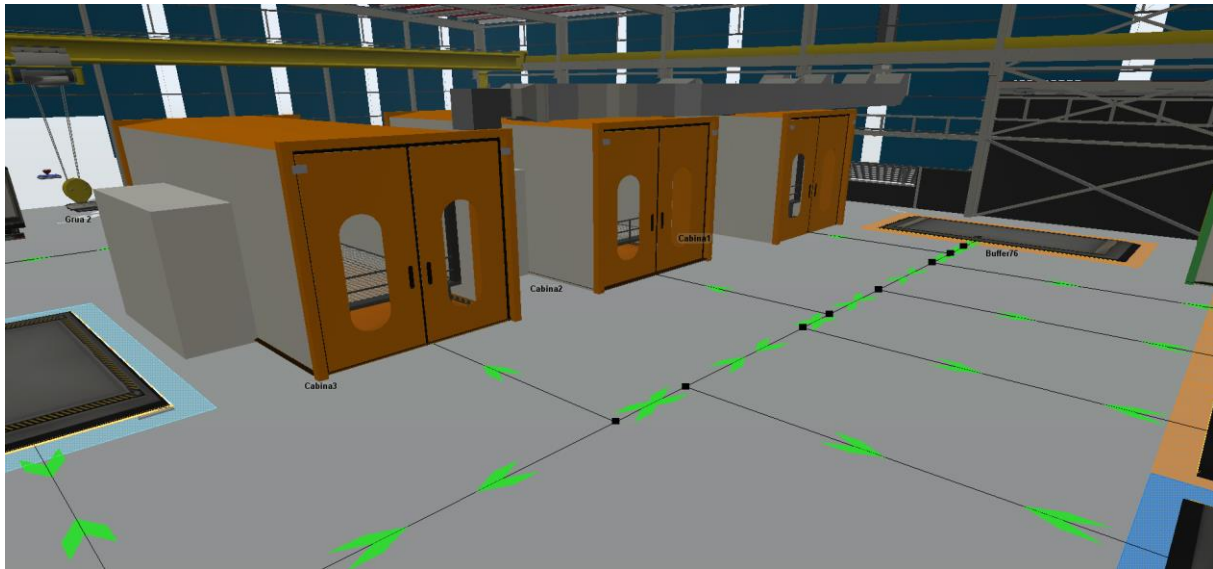


Figura 43 Cabinas de pintado para el tratamiento de piezas en carretones

El modelado del proceso de carga de piezas en los carretones se realiza mediante el *PF* de Pintado que se muestra en la Figura 44:

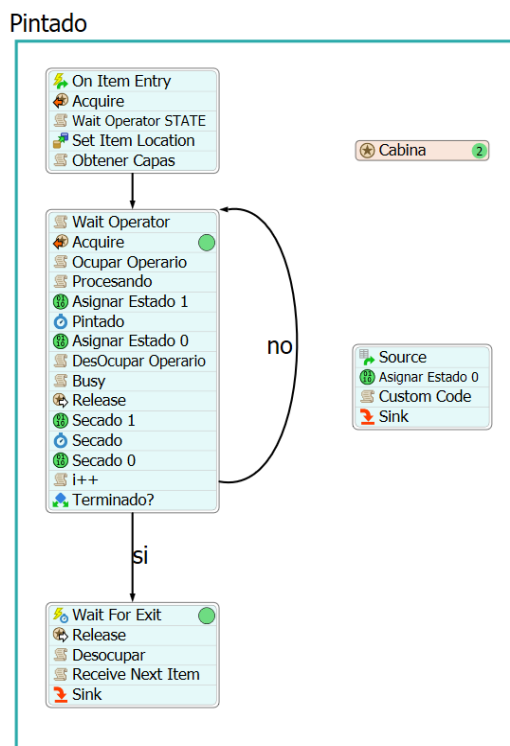


Figura 44 PF de Pintado

El *Process Flow* de Pintado tiene una estructura similar a las anteriores estaciones de trabajo:

En el momento en el que el AGV entra en la cabina de Pintado para depositar el carretón, se procede a adquirir el recurso de cabina de Pintado y cambiar su estado a *Waiting for operator*. Además, se realizará la lectura del número de capas del primer ítem del carretón y se creará un *label* denominado *índice* que servirá de contador de capas pintadas.

```
1 /**Custom Code*/
2 Object current = param(1);
3 treenode activity = param(2);
4 Token token = param(3);
5 treenode processFlow = ownerobject(activity);
6
7 Object contenido = token.item.first;
8
9
10 string labelName = "capas";
11 Variant value = contenido.capas;
12
13 token.labels.assert(labelName).value = value;
14
15
16
17 labelName = "indice";
18 value = 1;
19
20 token.labels.assert(labelName).value = value;
21
```

Figura 45 Lectura del número de capas necesarias

A continuación, el operario deberá finalizar los trabajos que esté realizando para realizar el tratamiento de Pintado. Tras finalizar, el estado del operario pasará a ser *Setup*, indicando que el operario está en proceso de realizar el tratamiento de Pintado. Para ello, el operario deberá trasladarse desde su ubicación actual hasta la cabina de Pintado. Inmediatamente después, la cabina cambiará de estado a *Processing* y se creará un *label* denominado *Estado* al que se le asignará el valor de 1 comenzando así el tratamiento de Pintado. Tras concluir el tratamiento, se modificará el *label Estado* asignándole el valor 0.

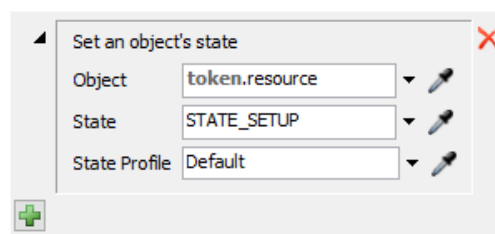


Figura 46 Cambio de estado del operario en tratamiento de Pintado

Seguidamente, se cambiará el estado del operario a *Idle* liberándolo del trabajo de Pintado pudiendo continuar con otras tareas. Una vez ha finalizado el Pintado, el estado de la cabina cambia a *Busy* ya que el carretón debe permanecer en la cabina hasta que termine el tiempo de secado. De igual forma que para el proceso de Pintado, se crea un *label Secado* al que se le asignará el valor de 1 cuando comienza el secado. Tras finalizar, el *label Estado* cambiará a 0.

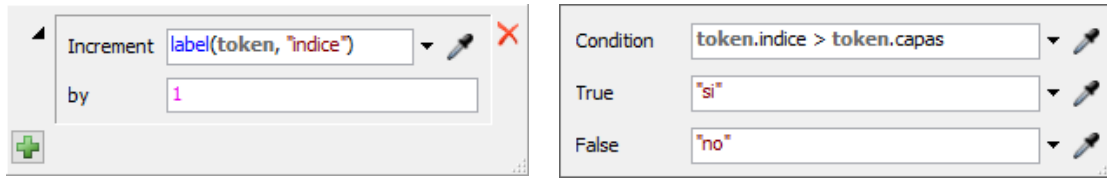


Figura 47 Incremento del índice de capas (izquierda) y comparación con las capas necesarias (derecha)

En este punto, se incrementará el índice que acumula el número de capas pintadas y se comparará su valor con el número de capas necesarias. Si el número de capas pintadas es menor que el de capas necesarias, se repetirá el proceso. En caso contrario, el carretón estará preparado para salir de cabina y dirigirse a la salida de la planta de tratamiento.

4.5.4 Operarios

En la simulación se consideran 3 operarios polivalentes que realizan todas las posibles tareas de la planta:

- Transportes internos con grúa y manejo de los AGV.
- Operaciones de Limpieza, Granallado y Pintado. Evidentemente, durante los tiempos de secado en las cabinas de Pintado se asume que el operario está libre para realizar otras tareas.
- Recorridos entre estaciones de trabajo para atender nuevas órdenes.

4.5.5 Movimientos internos de material

Los movimientos internos de material pueden realizarse mediante AGVs o Puentes Grúa. Estos movimientos se realizarán para transportar piezas o carretones entre los diferentes recursos fijos del modelo. Para asignar el método de transporte en dos recursos fijos, *FlexSim* permite establecer el método de transporte mediante el cual los *flowitems* salen de un recurso fijo. En la Figura 48 se ejemplifica la elección del transporte de salida de la cabina de Limpieza:

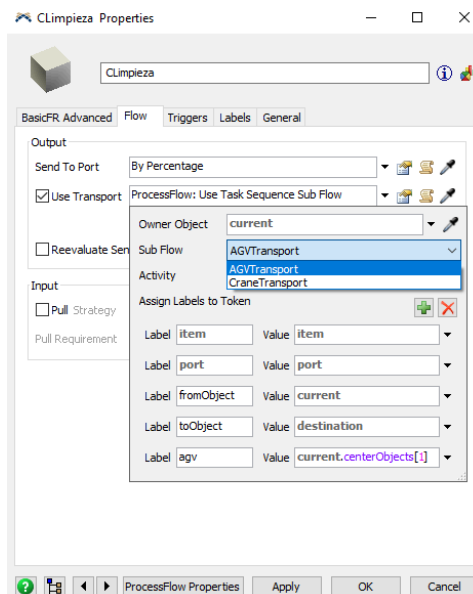


Figura 48 Elección del método de transporte en el recurso fijo

Es necesario destacar la necesidad de modelar un *Process Flow* para los medios de transporte de manera previa a la elección del transporte en el recurso fijo. Este tipo de *Process Flow* únicamente se ejecutará cuando un ítem abandona un recurso fijo. Debido a esta limitación, en *FlexSim*, reciben el nombre de *Sub Process Flow*²⁰.

A continuación, se muestra el modelado de los *Sub Process Flow* de los transportes empleados:

– **Puente grúa**

En la simulación del *Layout 1* se dispone de dos puentes grúa. Uno para realizar operaciones de carga de carretones (llegada de piezas) y otro para las operaciones de descarga de carretones (salida de piezas). Mientras, en la simulación del *Layout 2*, se dispone únicamente de un puente grúa para ambas operaciones.

Aunque el número de puentes grúa varía de un *Layout* a otro, el *Sub Process Flow* de transporte es idéntico. La única diferencia es el número de recursos (puentes grúa) de los que dispone cada uno de ellos.

En la Figura 49 se muestra el *Sub Process Flow* de *transporte de grúa* mediante el puente grúa:



Figura 49 Sub Process Flow de transporte de grúa

Cuando hay una solicitud de transporte, se selecciona la grúa, si está libre. Para manejar la grúa será necesario solicitar un operario. Una vez uno de los operarios esté disponible, viajará hasta la posición actual (de la grúa), cambiando su estado a *Busy* y comenzando la operación de carga/descarga. La grúa se desplazará a la ubicación de la pieza cargándola en la grúa y realizará el movimiento hasta el punto de descarga de la pieza. Una vez la pieza se descarga en el destino, la grúa y el operario quedan libres para otras tareas.

– **AGV**

En la simulación de ambos *Layouts* se consideran 2 AGVs que pueden realizar todas las tareas de transporte de carretones indistintamente.

²⁰ Un *Sub Process Flow* es un *Process Flow* separado, que comienza a ejecutarse cuando se desencadena por otra actividad o evento en un flujo de proceso diferente.

En la Figura 50 se muestra el *Sub Process Flow* de la carga y descarga de carretones mediante AGV:



Figura 50 Sub Process Flow de transporte de AGV

Cuando hay una solicitud de transporte, se selecciona la grúa, si está libre. Para manejar el AGV será necesario solicitar un operario. Una vez uno de los operarios esté disponible, viajará hasta la posición actual (del AGV), cambiando su estado a *Busy* y comenzando la operación de carga/descarga. El AGV se desplazará a la ubicación del carretón cargándolo y realizando el movimiento hasta el punto de descarga. Una vez el carretón se descarga en el destino, la grúa y el operario quedan libres para otras tareas.

En la siguiente figura se muestran los principales recorridos de los AGVs en el *Layout 1*. Se debe destacar que los AGVs cargados con carretones recorrerán la nave únicamente en el sentido de izquierda a derecha (entrada-salida).

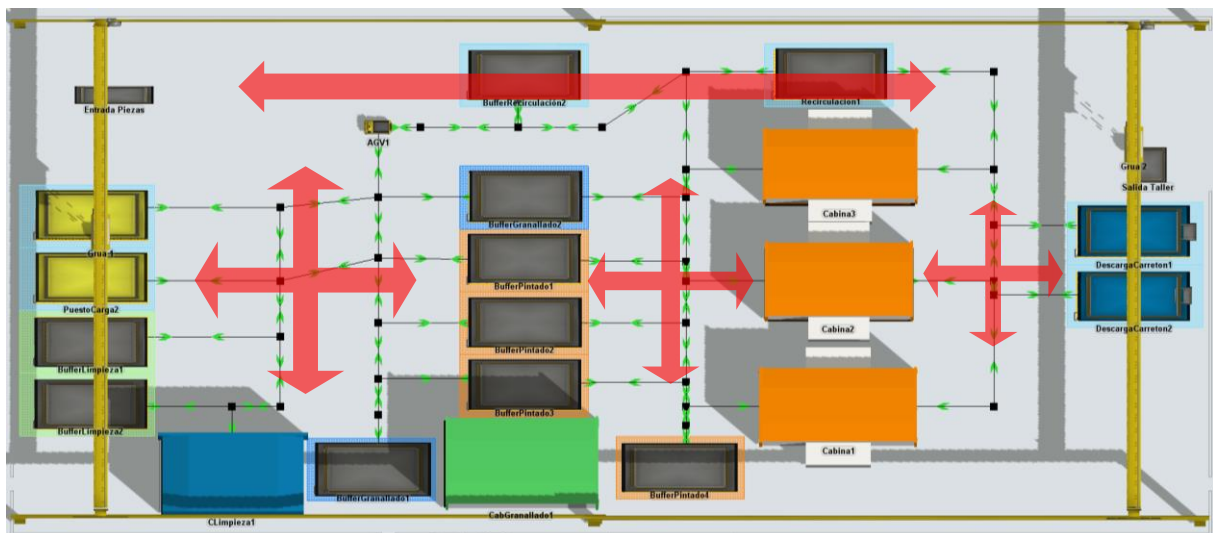


Figura 51 Principales recorridos de AGV en el Layout 1

Por otro lado, se muestra en la siguiente figura los principales recorridos de los AGVs en el *Layout 2*. En este caso, los AGVs cargados con carretones recorrerán la nave en ambos sentidos de circulación (único acceso de entrada/salida).

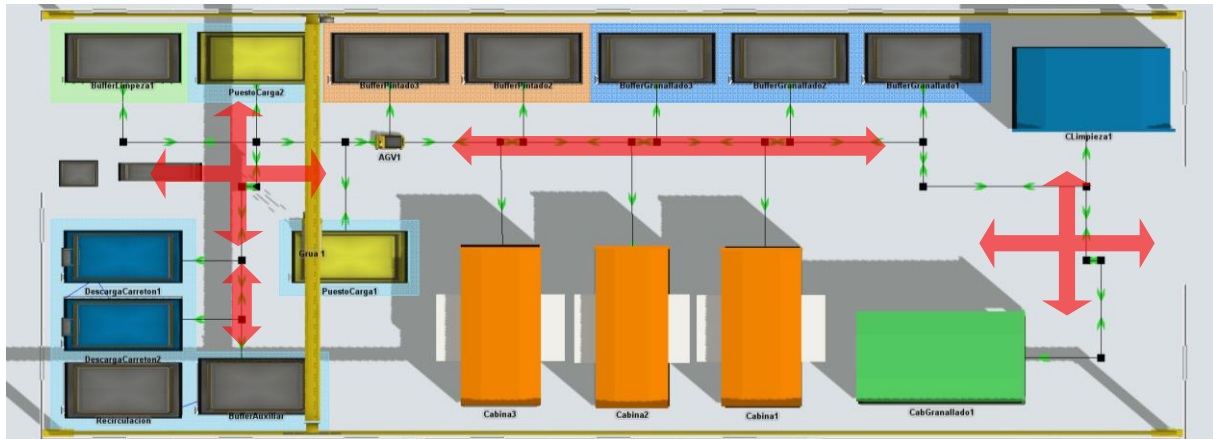


Figura 52 Principales recorridos de AGV en el Layout 2

4.5.6 Modelado y simulación mediante una programación de entrada

Tal y como se ha descrito en los apartados anteriores, la demanda del proceso tiene una gran variabilidad debido a que las piezas siguen circuitos diferentes; no todas las piezas requieren el mismo tipo de tratamientos, el número de capas de pintado es variable, etc. Por este motivo, en los apartados anteriores se ha justificado el modelado del proceso considerando diferentes distribuciones estadísticas que representen de la forma más veraz la demanda.

Aunque el modelo asigna los parámetros característicos del proceso (número de capas, tamaño de lote y circuito a seguir) estadísticamente, no permite crear una programación de entrada de piezas. Esto supone desconocer si un orden concreto de entrada en el taller permitirá obtener mayores tasas de producción.

Por este motivo, en el presente punto se llevarán a cabo las modificaciones necesarias para permitir la programación de entrada de piezas mediante datos externos en el modelo. Para ello se ha creado un fichero Excel que contenga una muestra generada de forma aleatoria de acuerdo a las distribuciones prefijadas. De este modo el trabajo a procesar en la planta se podrá ordenar previamente en Excel según: tamaño de lote (Tabla 7), número de capas (Tabla 8) y circuito a seguir (Figura 7).

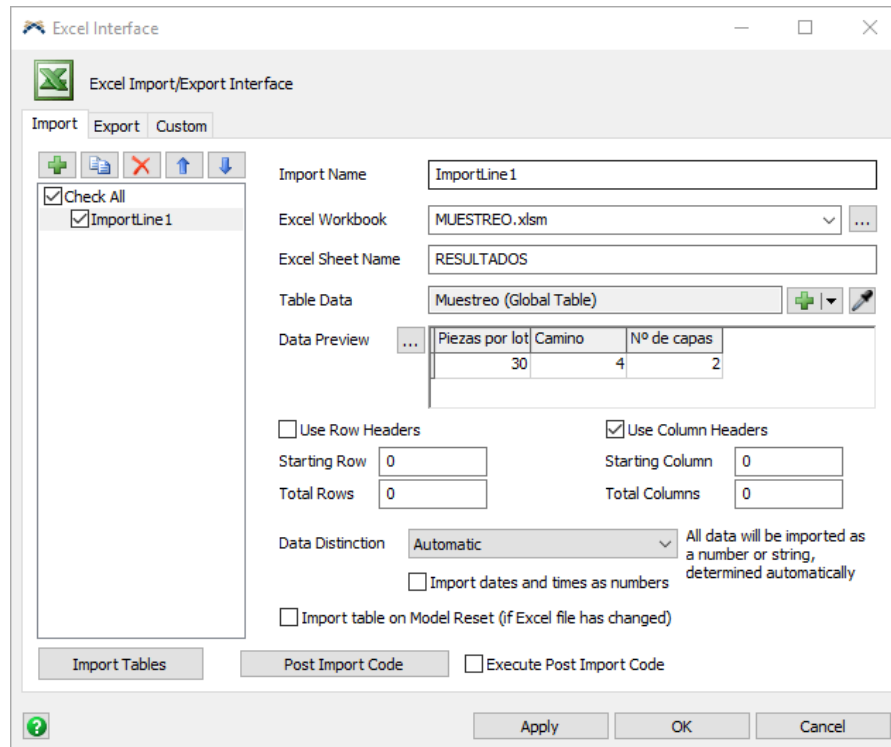


Figura 53 Interface de Excel en *FlexSim*

En la hoja *Resultados* del libro Excel *Muestreo*, se recoge el trabajo a procesar en la planta (*Workload*) ordenado según alguno de los criterios de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** El software *FlexSim*, permite leer y traspasar los datos del fichero Excel a una tabla propia de *FlexSim*. De esta forma, antes de comenzar la simulación, se dispondrá de forma pre ordenada del *Workload*.

1	2	3
Piezas por lote	Camino	Nº de capas

Tabla 9 Parámetros de ordenación de la muestra en Excel

Para crear los lotes de piezas de acuerdo a este muestreo se modifica el *PF de Generación de piezas* incluyendo tres nuevas actividades de creación de *labels*: *bsize*, *route* y *capas*. A estos *labels* se les asignará los datos de la tabla importada de Excel.

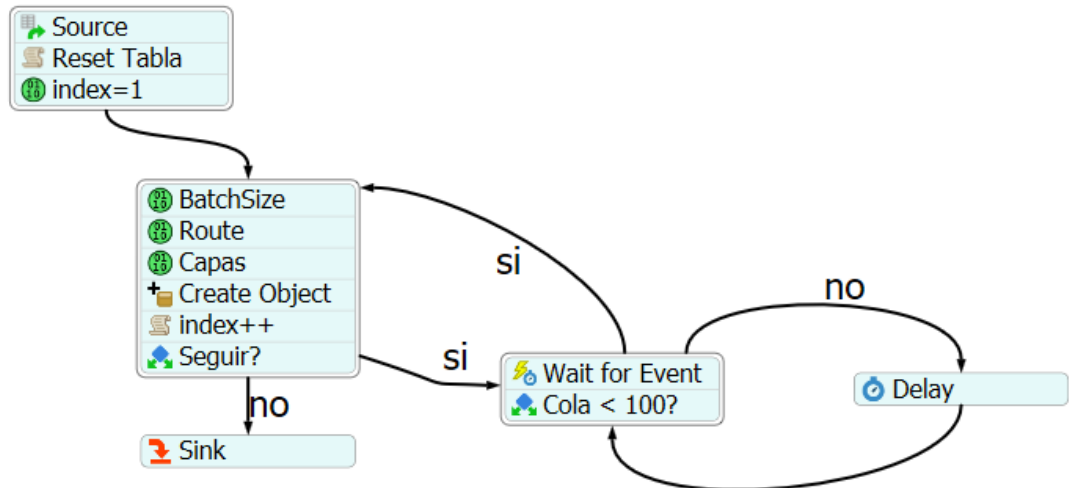


Figura 54 PF de generación de piezas con toma de datos externa

Al comienzo de la simulación, en el proceso de creación del primer lote, los tres *labels* tomarán los valores de la primera fila y la correspondiente columna de acuerdo al orden indicado en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** Una vez se generó el primer lote, el *label index* incrementará en una unidad su valor, indicando el número de lotes generados. Esta etiqueta permite también indicar el número de fila del que se deben leer los valores de la tabla de Excel.

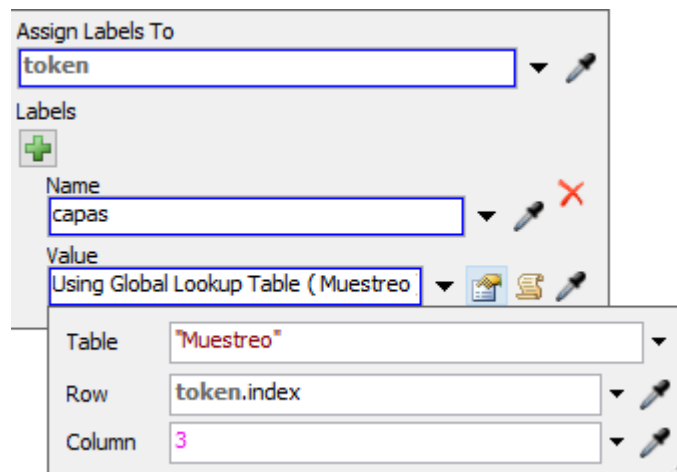


Figura 55 Asignación del número de capas mediante tabla externa Excel

Antes de continuar con las modificaciones realizadas sobre el modelo, es necesario introducir el atributo *Item Type*. Este atributo almacena un valor en cada elemento de flujo que viaja a través de un modelo *FlexSim*. Cada elemento de flujo tiene su propio valor de tipo de elemento único y en general es un valor que describe un tipo o categoría de producto. En el presente caso se empleará para describir la ruta que seguirá cada carretón a través de las estaciones de trabajo.

De este modo, cada carretón tendrá un valor asignado al atributo *Type* que indicará la ruta a seguir:

- **Type 1:** Puestos de carga → Limpieza → Salida del proceso
- **Type 2:** Puestos de carga → Limpieza → Granallado → Salida del proceso

- **Type 3:** Puestos de carga → Limpieza → Granallado → Pintado → Salida del proceso
- **Type 4:** Puestos de carga → Granallado → Pintado → Salida del proceso
- **Type 5:** Puestos de carga → Granallado → Salida del proceso

Posteriormente, en el momento en el que el carretón este totalmente cargado, será necesario asignar un atributo *Type* al carretón para redireccionarlo. Para ello, se añade un *Custom Code* al *PF Puesto de carga* que asignará el valor del *label route* del primer ítem del carretón al atributo *Type* del carretón.

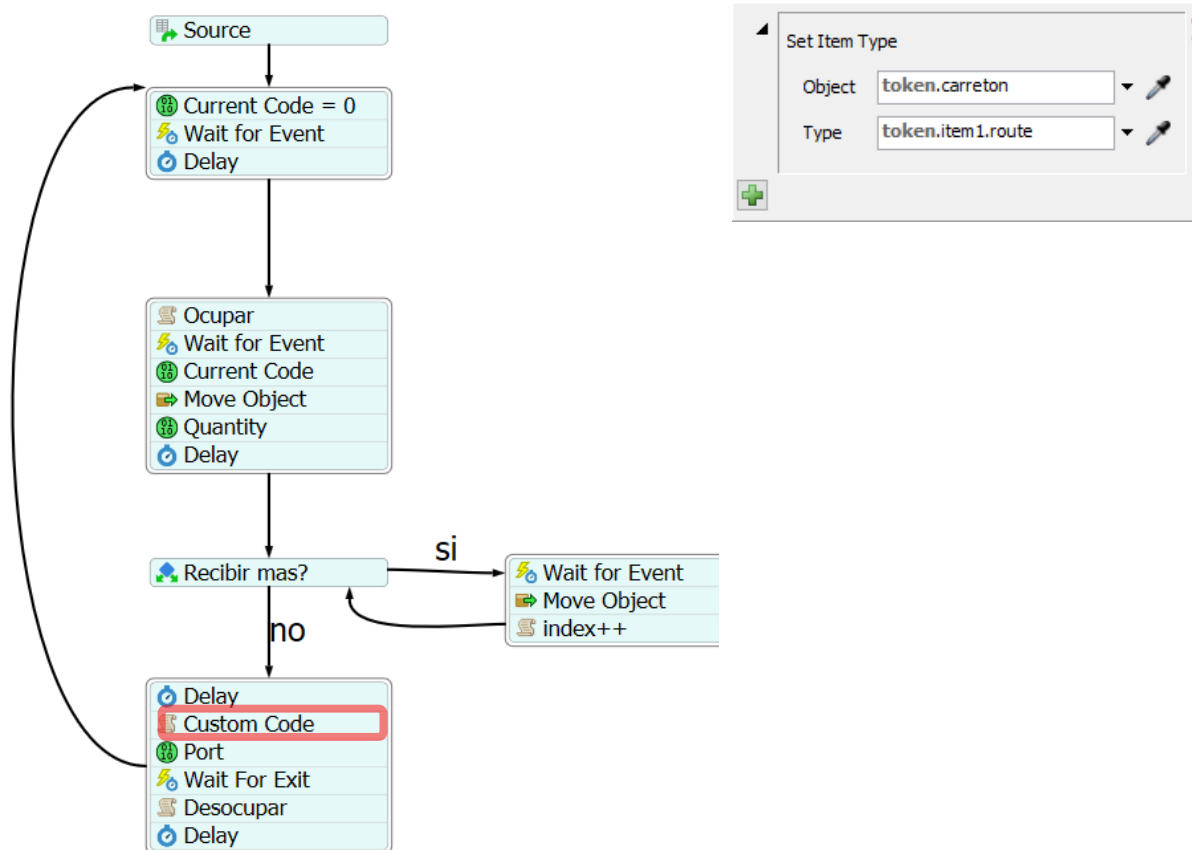


Figura 56 Process Flow del Puesto de carga modificado(izquierda) y asignación del atributo Type al carretón

Así, tanto en los puestos de carga como en las estaciones de trabajo, se establecerá un puerto de salida concreto en base al valor del atributo *Type*.

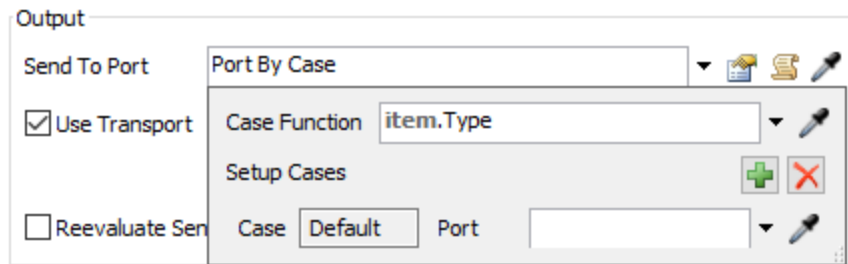


Figura 57 Selección de puerto de salida en función del item Type

Conocidos los valores de los puertos de salida que corresponden a cada ruta. La función de la Figura 57 evalúa el valor de Type y mediante un estructura de control del tipo *Switch case* devuelve el valor del puerto de salida que corresponde a la ruta a seguir.

A continuación, se muestran las funciones que rigen la salida de carretones:

- **Puestos de carga**

La función programada devolverá los puertos de salida de la Figura 28 en función del *Type* del carretón. En el caso 1, 2 y 3 se enviará el carretón al buffer de Limpieza, mientras que en caso 4 y 5 se enviará a los buffers de Granallado. Puesto que existen tres buffers de Granallado, se comprobará la ocupación de cada uno de ellos para poder enviarlo a uno libre. En caso de estar todos ocupados, se enviará al primer buffer (*BufferGranallado2*).

```
1 Object item = param(1);
2 Object current = ownerobject(c);
3 /**popup:ValuesByCase:hasitem=1:valuestr=Port:doreturn=1*/
4 /**Port By Case*/
5 int case_val = /** \nCase Function: *//**tag=ValueFunc/**/item.Type/**/;
6 /** \nCases:\n*/
7 switch (case_val) {
8 /**tagex:data*/
9     case 1:
10    case 2:
11    case 3:
12    return 1;
13    case 4:
14    case 5:
15        for (int i=2; i<=current.outObjects.length; i++)
16        {
17            if (opavailable(current,i))
18                {return i;}
19            if (i==4)
20                {return 2;}
21        }
22    }
23 }
24 }
25 }
26 }
```

Figura 58 Selección del puerto salida en los puestos de carga en función del atributo Type

– Cabina de Limpieza

La función programada devolverá los puertos de salida de la Figura 37 en función del *Type* del carretón. En el caso 1 se enviará el carretón a la Salida de taller, mientras que en el caso 2,3, y 4 se enviará a los buffers de Granallado. Puesto que existen tres buffers de Granallado, se comprobará la ocupación de cada uno de ellos para poder enviarlo a uno libre. En caso de estar todos ocupados, se enviará al buffer (*BufferGranallado2*).

```
1 Object item = param(1);
2 Object current = ownerobject(c);
3 /***popup:ValuesByCase:hasitem=1:valustr=Port:doreturn=1*/
4 /**Port By Case*/
5 int case_val = /** \nCase Function: *//**tag:ValueFunc***/item.Type/**/;
6 /** \nCases:\n*/
7 switch (case_val) {
8 /***tagex:data*/
9     case 1:
10    return 1;
11    case 2:
12    case 3:
13    case 4:
14        for (int i=2; i<=current.outObjects.length; i++)
15        {
16            if (opavailable(current,i))
17                {return i;}
18            if (i==4)
19                {return 4;}
20        }
21    }
22 }
23 }
```

Figura 59 Selección del puerto salida en la cabina de limpieza en función del atributo Type

– Cabina de Granallado

La función programada devolverá los puertos de salida de la Figura 41 en función del *Type* del carretón. En el caso 2 y 5 se enviará el carretón a la Salida de taller, Puesto que la cabina de Granallado se conecta con los dos puertos de salida del taller, se comprobará la ocupación de cada uno de ellos para poder enviarlo a uno libre. En caso los dos ocupados se enviará al primero de ellos (*DescargaCarretón2*). Mientras en el caso 3 y 4 se enviará a las cabinas de pintado o en su defecto a los buffers de Pintado. Puesto que existen tres cabinas de Pintado y dos buffers de Pintado, se comprobará la ocupación de cada uno de ellos para poder enviarlo a uno libre. En caso los dos ocupados se enviará al primero de ellos (*BufferPintado2*).

```
1 Object item = param(1);
2 Object current = ownerobject(c);
3 /**popup:ValuesByCase:hasitem=1:valustr=Port:doreturn=1*/
4 /**Port By Case*/
5
6 int case_val = /** \nCase Function: *//**tag:ValueFunc/**/item.Type/**/;
7 /** \nCases:\n*/
8 switch (case_val) {
9 /**tagex:data*/
10     case 2:
11     case 5:
12         for (int i=1; i<=current.outObjects.length; i++)
13         {
14             if (opavailable(current,i))
15
16                 {return i;}
17             if (i==2)
18                 {return 2;}
19         }
20
21     case 3:
22     case 4:
23         for (int i=3; i<=current.outObjects.length; i++)
24         {
25             if (opavailable(current,i))
26
27                 {return i;}
28             if (i==7)
29                 {return 6;}
30         }
31 }
```

Figura 60 Selección del puerto salida en la cabina de granallado en función del atributo Type

5 RESULTADOS DE SIMULACIÓN

En esta sección se presentan los resultados extraídos del estudio de simulación desarrollado para el presente trabajo, comparando los dos *layouts* definidos. Los apartados de este capítulo se corresponden, de esta manera, con cada uno de los cuatro análisis realizados:

- Capacidad de producción máxima
- Ocupación de los recursos en condiciones de producción máxima
- Cumplimiento de plazos con carga de trabajo conocida
- Análisis de una muestra aleatoria programada

En los dos primeros análisis de simulación, las condiciones consideradas en la fase de experimentación (esto es, simulación del modelo para la toma de resultados) son las siguientes:

- Se simula una semana de trabajo antes de registrar ningún resultado para poder alcanzar el régimen estacionario.
- Se simulan 3 semanas de trabajo en régimen estacionario.
- Se consideran días de 11 horas de trabajo en la planta, 5 días a la semana. La jornada se extiende con horas extras en las cabinas en que sea necesario para completar los trabajos.
- Los fines de semana (sábado y domingo) se consideran, por tanto, como días no hábiles.

En el tercer y cuarto análisis el enfoque adoptado es diferente. En lugar de simularse una cantidad de tiempo específica, se fija la cantidad de trabajo a completar y se mide el tiempo transcurrido hasta que sale la última pieza. Estas configuraciones se describen con mayor detalle en el apartado correspondiente.

5.1 Capacidad de producción máxima

Además de las consideraciones anteriores, relacionadas con la configuración temporal de simulación, es fundamental resaltar que los resultados del análisis de capacidad de producción se han obtenido suponiendo **condiciones de máxima ocupación**. Esto significa que el simulador introduce nuevos trabajos a la entrada de la planta siempre que es posible (“alimentación continua”) y registra, bajo estas condiciones, la cantidad de producto completado.

En el caso de la nave objeto de estudio, se entiende por “producto completado” toda pieza que abandona la nave después de completar los procesos de tratamiento correspondientes (nótese que no es el mismo ciclo de proceso para todas las piezas). Para este estudio de capacidad se asume, por supuesto, que los camiones de recogida de piezas no son un factor limitante.

Por otra parte, la naturaleza singular del proceso diseñado para la planta hace que el foco de análisis se coloque en los carretones. Tanto es así, que los tiempos de proceso (datos de entrada al modelo de simulación proporcionados por NAVANTIA) están expresados en horas/carretón y no en horas o minutos/pieza. Este enfoque resulta ser una solución lógica al

problema debido a la gran variabilidad e incertidumbre que existe en relación al número de piezas por carretón que serán tratadas en la futura planta.

Por todo ello, se entiende que la capacidad de producción por carretón puede ser una medida más fiable que la producción por piezas, aunque es necesario proporcionar también la medida del número de piezas tratadas, pues así se habían expresado algunos de los datos de salida esperados.

En definitiva, la tasa de producción se ha medido utilizando las siguientes dos unidades:

1. Cantidad de **carretones** que completan un ciclo de proceso por unidad de tiempo.
2. Cantidad de **piezas** que completan un ciclo de proceso por unidad de tiempo.

Dadas estas condiciones se obtienen las siguientes tasas de producción con 30 réplicas de la simulación:

Tasa de producción máxima	LAYOUT 1		LAYOUT 2	
	Carretones	Piezas	Carretones	Piezas
Unidades / hora	0,4	7,5	0,6	8,4
Unidades / día	4,7	82,0	6,4	92,4
Unidades / semana	23,3	409,9	31,9	462,0

Tabla 10 Tasa de producción máxima

Naturalmente, las tasas de producción máxima por día o por semana pueden incrementarse ampliando los turnos de trabajo.

5.2 Nivel de ocupación de los recursos

Se presentan en este apartado los resultados del análisis de la ocupación o utilización de recursos de producción de la planta. El objetivo fundamental de este análisis es verificar el correcto dimensionamiento de los recursos productivos, determinando, en su caso, la necesidad de recursos adicionales.

Los resultados de simulación se han obtenido durante la misma fase de experimentación que los datos de producción máxima y, en consecuencia, las hipótesis y condiciones consideradas en este análisis son las mismas que las descritas en el apartado anterior.

Cabe aclarar que *FlexSim* calcula los niveles de ocupación de cualquier recurso teniendo en cuenta el tiempo total de simulación, aunque es posible descontar el efecto de los fines de semana (sábados y domingos). Como se considera que la planta está operativa solamente un 45,8% del tiempo de la semana laboral (el resto del tiempo corresponde a descansos por las noches), se entiende que en las gráficas generadas por *FlexSim*, un recurso que aparezca ocupado al 45,8% estará, en realidad, al 100% de su capacidad máxima.

5.2.1 Ocupación de operarios

Los operarios presentan un nivel de ocupación media, en el modelo del *Layout 1*, de aproximadamente el 55% de su tiempo disponible. Por otro lado, en el *Layout 2*, los operarios presentan una ocupación media de aproximadamente del 75%.

Esta ocupación tiene en cuenta los cuatro principales tipos de tareas que realizan los operarios: Limpieza, Granallado, Pintado y movimiento de materiales (transporte interno con AGV y carga y descarga de carretones con grúa).

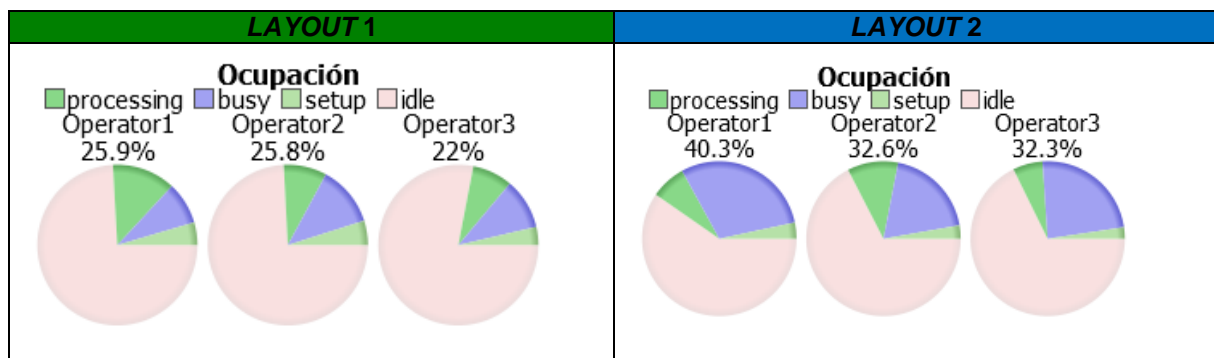


Figura 61 Ocupación de los operarios sobre el total del tiempo de simulación

La siguiente tabla muestra los resultados detallados en la simulación de ocupación de los operarios. Las diferencias entre los tres operarios no son significativas y responden al reparto de tareas que se produce durante la simulación.

Operación	LAYOUT 1			LAYOUT 2		
	Operario 1	Operario 2	Operario 3	Operario 1	Operario 2	Operario 3
% Granallado y limpieza	27,9%	19,0%	17,7%	16,2%	23,1%	13,5%
% Movimientos de material	18,6%	26,6%	22,3%	64,6%	41,9%	51,7%
% Pintado	10,0%	10,7%	17,7%	7,4%	6,1%	5,2%
% Desocupado y en esperas	43,4%	43,7%	52,0%	12,0%	28,8%	29,5%
Total	100%	100%	100%	100%	100%	100%

Tabla 11 Niveles y reparto de ocupación de los operarios durante los periodos del trabajo

5.2.2 Ocupación de cabinas

La ocupación de las cabinas de Limpieza y Granallado está condicionada por los tiempos de procesamiento en cada una de ellas, así como por el flujo de carretones en la planta y en las zonas de almacenamiento intermedias. En las cabinas de Pintado se han diferenciado los tiempos de ocupación por Pintado y por secado. Bajo las condiciones de simulación

consideradas, se han obtenido los siguientes resultados similares tanto en el *Layout 1* como en el *Layout 2*:

- La cabina de Limpieza presenta un nivel de ocupación moderado (50% de la jornada de trabajo).
- Las cabinas de Granallado presentan un nivel de ocupación alto (75% de la jornada de trabajo).
- Las cabinas de Pintado presentan un nivel de ocupación moderado, estando asociada la mayor parte de su tiempo de ocupación a las operaciones de secado. Las cabinas 1 y 2 son las más ocupadas en las condiciones de simulación actuales.

La siguiente figura muestra la ocupación de las cabinas. Las franjas verdes representan los porcentajes de actividad de las cabinas. En las cabinas de Pintado, el color azul representa el tiempo de secado. En rojo claro se observan los tiempos de desocupación de las cabinas y en amarillo el porcentaje de tiempo que están cargadas a la espera de que se retire el carretón (este tiempo es irrelevante ya que en la simulación sucede a veces al final de jornada).

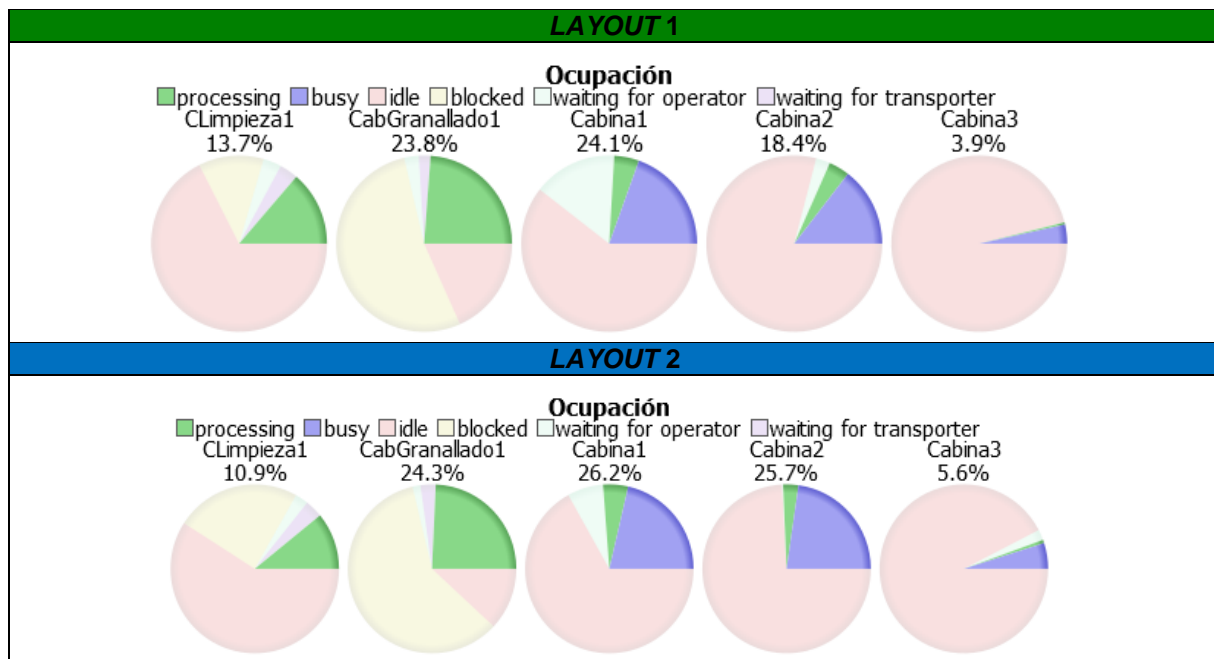


Figura 62 Porcentaje de ocupación de las cabinas estimados por FlexSim sobre el total del tiempo de simulación

5.2.3 Ocupación de la grúa y AGV

Los medios de transporte interno de material presentan en la simulación un bajo nivel de ocupación en ambos casos. Esto prueba que el dimensionamiento realizado de los mismos (1 grúa y 2 AGVs) es suficiente. Pruebas adicionales realizadas con el modelo de simulación muestran que con un solo AGV es posible mantener los niveles de capacidad y productividad de la planta. No obstante, contar con un vehículo adicional de apoyo garantiza que la planta no se bloquee en caso de fallo o avería.

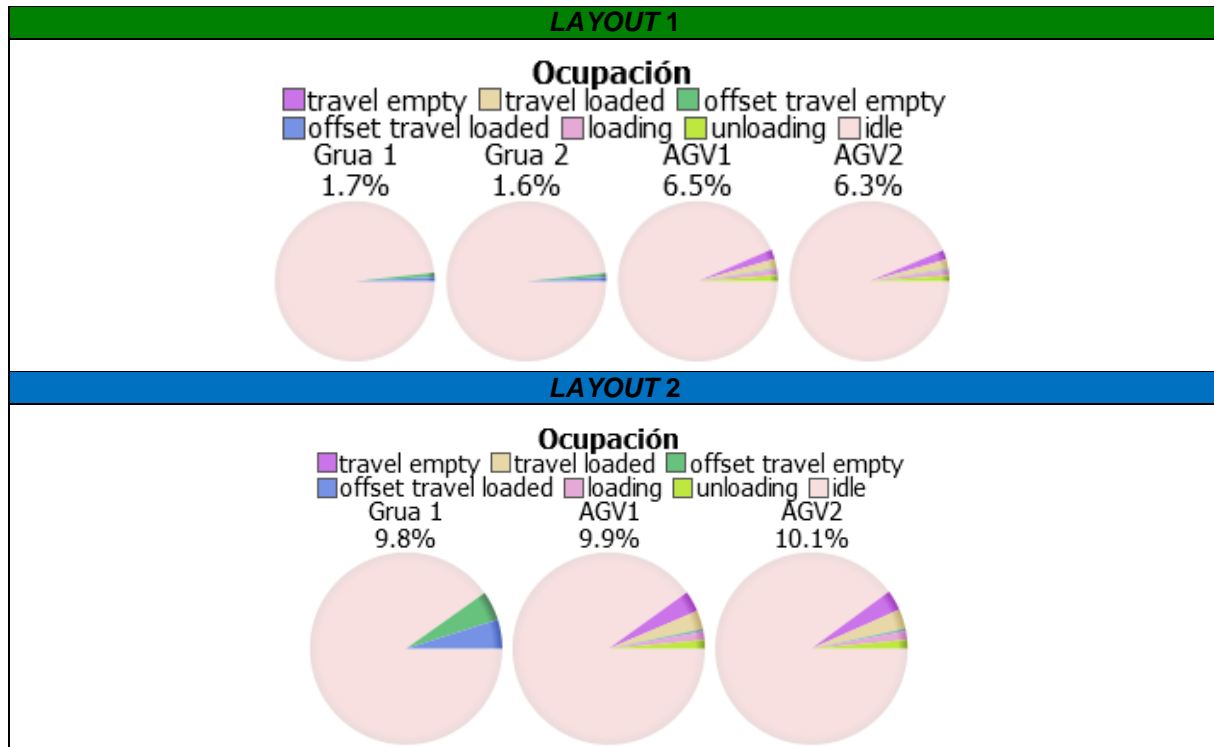


Figura 63 Nivel de ocupación de la grúa y del AGV

Por otro lado, las distancias medias recorridas diariamente por los medios de transporte internos se detallan en la siguiente tabla:

Medio de transporte	Distancia media recorrida (km/día)	
	LAYOUT 1	LAYOUT 2
Grúas	3,49	3,99
AGVs	1,19	1,94

Tabla 12 Distancia recorrida por cada medio de transporte interno

El *Layout 1* presenta unos niveles de ocupación de los medios de transporte inferiores que el *Layout 2*. Estas diferencias se derivan de las distintas tasas de producción que conlleva cada una de las configuraciones, así como los recorridos fijados, tanto para grúas como para AGV's, en el transporte interno de carretones en cada *Layout*.

5.2.4 Puestos de carga de carretones

Los puestos o posiciones de carga de carretones se definen, en la simulación, como los lugares en los que se cargan los carretones con las piezas recibidas en camión. Dichos puestos presentan un nivel de ocupación adecuado, por debajo del 100%. En la simulación se han considerado 2 puestos de carga que han resultado suficientes bajo condiciones máximas de carga, por lo que se considera un dimensionamiento adecuado.

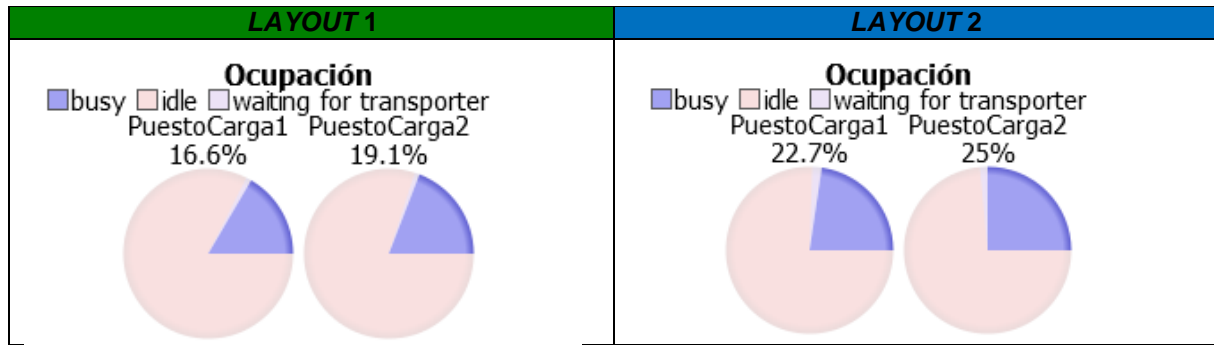


Figura 64 Nivel de ocupación de los puestos de carga

5.2.5 Ocupación de los buffers

Se ha analizado también el nivel de ocupación de las distintas zonas de buffer entre cabinas. Así, durante la simulación llevada a cabo, se monitorizó el número de carretones en espera en cada buffer de conexión entre procesos. Para cada una de las variables se obtuvieron los valores mínimos, máximos y promedios.

Los resultados muestran que el buffer con mayor nivel medio de ocupación es el de Granallado, tanto en el *Layout 1* como en el *Layout 2*. En el primer caso presenta una ocupación media de 2,67 celdas de 3 disponibles y, en el segundo, una ocupación media de 1,56 celdas de 2 disponibles. Por ello, en la práctica diaria del taller, podría ser conveniente asignar dinámicamente buffers adicionales para dicha operación. En todo caso, el dimensionamiento propuesto resulta suficiente para alcanzar los objetivos de producción definidos.

Buffer	LAYOUT 1			LAYOUT 2		
	Mínimo	Máximo	Promedio	Mínimo	Máximo	Promedio
Limpieza	0	1	0,82	0	1	0,22
Granallado	0	2	1,56	0	3	2,67
Pintado	0	3	1,11	0	1	0,01
Recirculación	0	2	0,44	0	2	0,91

Tabla 13 Niveles de ocupación de los buffers durante la simulación en número de carretones

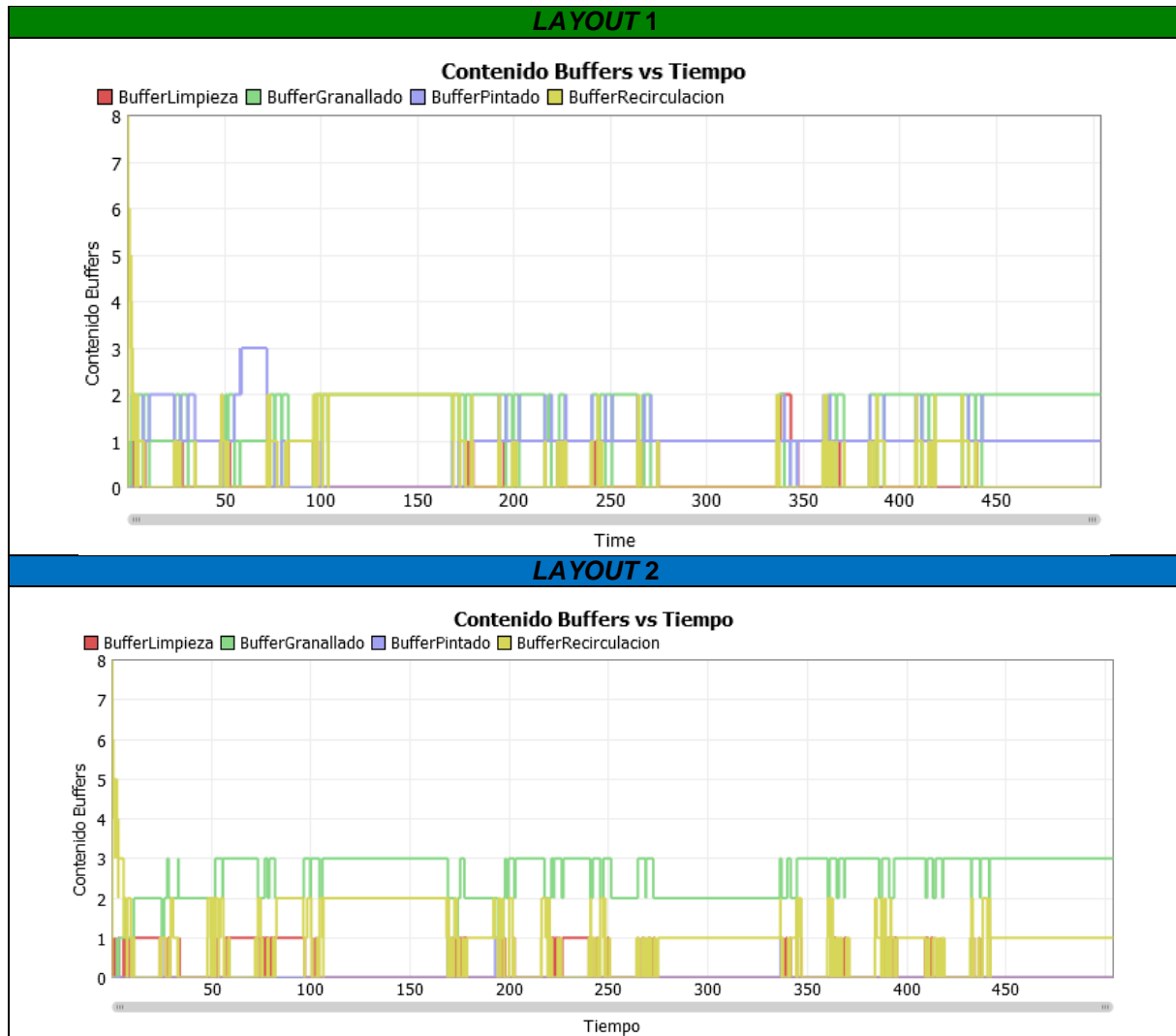


Figura 65 Nivel de ocupación de los buffers en número de carretones a lo largo de 3 semanas de simulación, en condiciones de producción máxima. La variable X es el tiempo en horas y la variable Y es el número de carretones en el buffer.

5.2.6 Efecto del número de carretones

El último análisis realizado con relación al dimensionamiento y ocupación de los recursos ha estado encaminado a determinar el efecto que el número de carretones tiene sobre la capacidad de producción del taller. Si el número de carretones es demasiado bajo, se generarán esperas por falta de éstos elementos. Si es demasiado elevado, estarán desocupados innecesariamente, incluso entorpeciendo otros movimientos dentro de la nave.

Por ello, se ha planteado un experimento de simulación variando el número de carretones y calculando la tasa de producción del taller en *piezas procesadas / hora* en cada escenario. Los resultados se muestran en la gráfica y en la tabla siguientes. Se puede comprobar que el actual dimensionamiento de 8 carretones es adecuado en ambos *LAYOUTs*.

El comportamiento del modelo ante la experimentación con carretones es similar en ambos casos, si el número se reduce por debajo de 8, se producirían pérdidas en la capacidad de producción. Por encima de 8 carretones es posible lograr pequeñas mejoras en la tasa de

producción, pero dado que con 8 es suficiente la inversión sería innecesaria sin producir grandes mejoras.

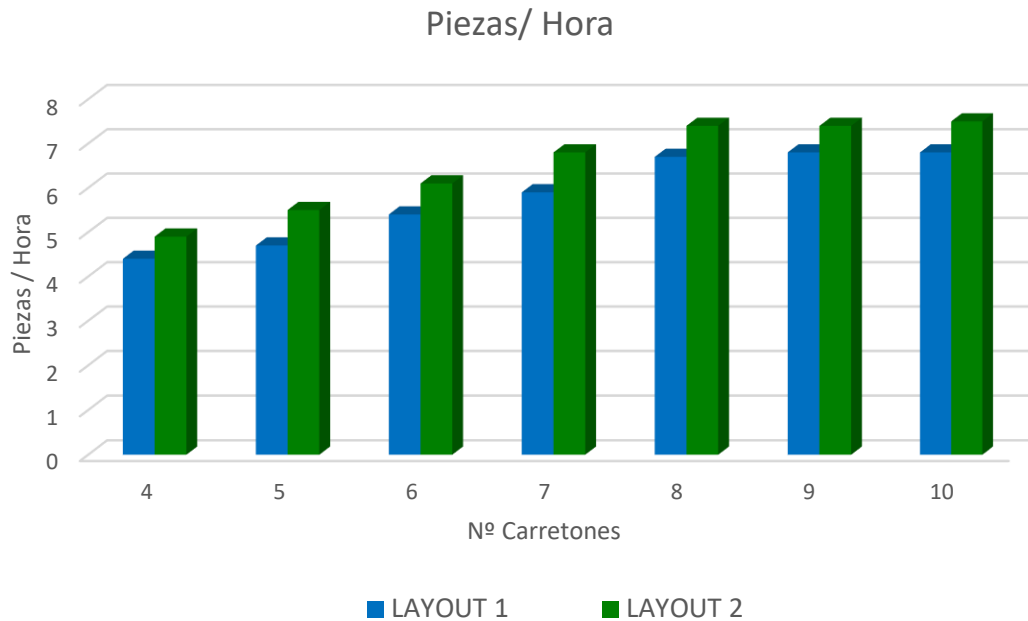


Figura 66 Efecto del número de carretones en la tasa de producción

A continuación, se muestra de forma detallada la tasa de producción de piezas:

Carretones	Piezas / hora	
	LAYOUT 1	LAYOUT 2
4	4,4	4,9
5	4,7	5,5
6	5,4	6,1
7	5,9	6,8
8	6,7	7,4
9	6,8	7,4
10	6,8	7,5

Tabla 14 Tasa de producción en piezas procesadas / hora en función del número de carretones

De manera general, la anterior tabla muestra que en *Layout 2* se obtienen tasas de producción, *pieza/hora*, de 1 *pieza/hora* más que en el caso del *Layout 1*.

5.3 Cumplimiento de plazos

De acuerdo a las estimaciones e hipótesis asumidas de demanda se han considerado los siguientes escenarios para verificar si la futura planta sería capaz de cumplir los plazos para completar las siguientes cargas de trabajo:

- **Escenario I:** 240 piezas en 8 días.
- **Escenario II:** 480 piezas en 10 días.
- **Escenario III:** 720 piezas en 12 días.

La simulación realizada en cada escenario consiste en asumir que todo el material está disponible al inicio y que se trabaja al máximo ritmo disponible hasta terminar. Luego se mide el tiempo total necesario en horas desde el inicio de la simulación y en días hasta que se termina el último trabajo. El inicio de la simulación se sitúa en un lunes a las 0:00 horas.

Los resultados se muestran en la siguiente tabla, concluyendo que en todos los casos hay holgura suficiente para completar los trabajos dentro del plazo exigido.

Escenario	LAYOUT 1				LAYOUT 2			
	Horas	Horas	Días	Plazo (días)	Holgura (días)	Horas	Días	Plazo (días)
I	106,8	4,5	8	3,6	104,0	4,3	8	3,7
II	175,5	7,3	10	2,7	151,6	6,3	10	3,7
III	243,7	10,2	12	1,8	222,3	9,3	12	2,7

Tabla 15 Resultados del estudio de cumplimiento de plazos

Cabe aclarar que la programación de trabajos que se haga realmente en el día a día de la planta podrá requerir la realización de horas extras para completar cargas puntuales de trabajo. Lo que muestran los resultados de la simulación es que la planta, con los recursos definidos anteriormente, tiene suficiente capacidad para hacer frente a las condiciones de trabajo previstas e, incluso, tiene holguras suficientes para hacer frente a picos de trabajo aún mayores.

5.3.1 Tiempos de flujo en la planta

Otro análisis que se ha realizado a partir de los resultados de la simulación es el **tiempo de “flujo” o “residencia”** de las piezas en la planta de tratamiento. Este tiempo incluye los conceptos siguientes:

1. Tiempos de espera en la entrada desde la llegada de camiones hasta la carga en carretón.
2. Tiempos de espera entre etapas del proceso.
3. Tiempos de procesamiento en cabinas y de secado.
4. Tiempos de transportes internos.
5. Tiempos de carga en camión de salida.

Para obtener estas estadísticas en la simulación se asume que el material será procesado tan pronto como sea posible por estar disponible y que haya capacidad en la siguiente etapa. En la práctica, pueden producirse esperas adicionales elevadas debido a la programación de trabajos que se haga. Pero este factor no depende tanto del diseño de la planta como de una cuestión organizativa. Por ello, los resultados de la simulación lo que pretenden es

proporcionar una referencia de las restricciones que imponen para la planificación los medios dimensionados en la planta.

La siguiente figura muestra el tiempo de flujo en horas a través de la planta a lo largo de la simulación de 3 semanas bajo las condiciones de trabajo más exigentes. Se aprecia una **gran variabilidad** debida a que las piezas siguen circuitos diferentes; algunas sólo requieren operaciones de Limpieza, otras sólo de Granallado, etc. La figura muestra el promedio de los tiempos de flujo de todas ellas.

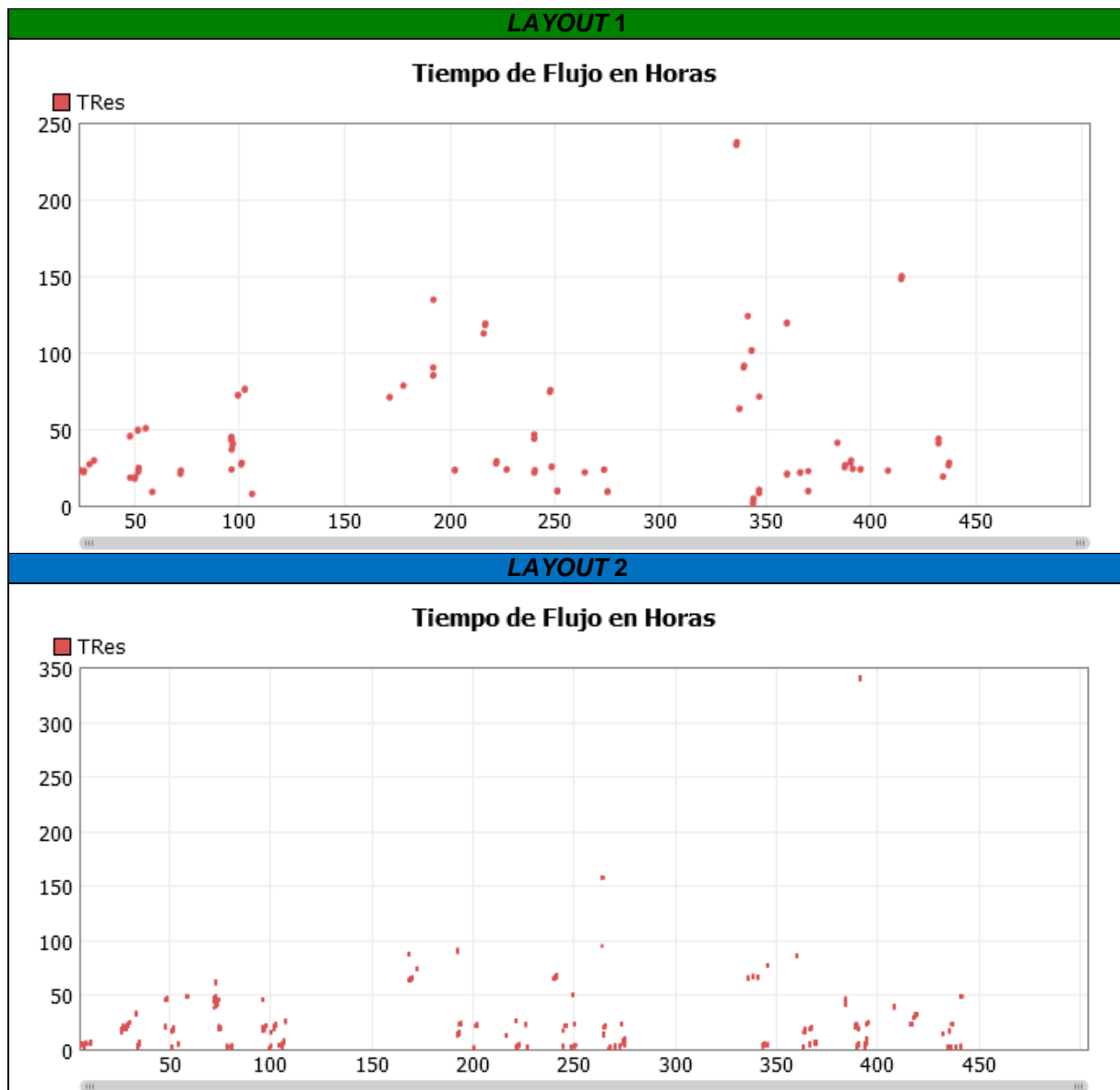


Figura 67 Tiempo de flujo total en la planta para las piezas completadas a lo largo de 3 semanas. El eje X representa el tiempo de simulación y el eje Y las horas de estancia en la planta de cada pieza.

Finalmente, la siguiente figura muestra un histograma de los tiempos totales de flujo en la planta para distintas piezas. En él se aprecia la variabilidad en los tiempos de residencia de las piezas. La mayoría de las piezas presentan tiempos de residencia inferiores a 50 horas, en caso del *layout 2*, e inferiores a 100 horas, en el caso del *layout 1*. Aunque algunas piezas llegan a superar las 150 horas, esto se debe a la inclusión de fines de semana. Se concluye que, salvo en casos puntuales, el tiempo que pasarán las piezas en la planta será inferior a 2

días (48 horas), llegando hasta 4 días (96 horas) en los casos más desfavorables. A este tiempo habrá que sumar las esperas que se produzcan en el día a día de la planta por otras cuestiones de planificación operativa.

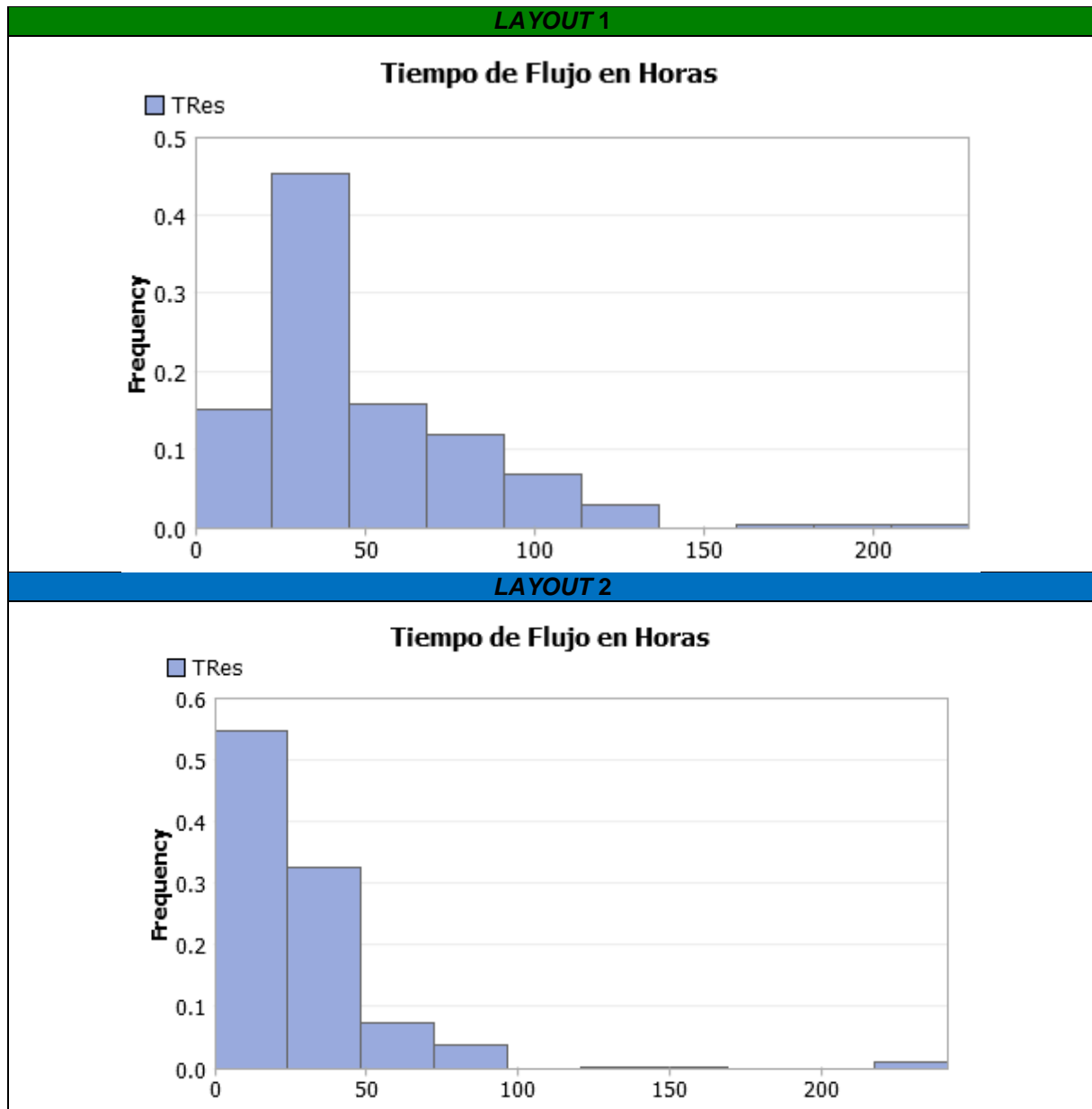


Figura 68 Histograma de tiempos de flujo en la planta para las piezas procesadas. El eje X presenta distintos tiempos de flujo en la planta y el eje Y la probabilidad (frecuencia relativa) de cada tiempo de flujo.

5.4 Análisis de una muestra aleatoria programada

En este estudio se presentan los resultados obtenidos del modelo descrito en el punto 4.5.6. En vista de los resultados anteriores, únicamente se realiza el análisis en el *Layout 2*.

Previamente a ejecutar el modelo se ha generado una carga de trabajo de 750 piezas agrupadas en 49 lotes. Dicha muestra sigue las distribuciones estadísticas detalladas en los puntos anteriores:

Tamaño de lote					
30	10	5			
34,0 %	33,0 %	33,0 %			
Número de capas					
1	2	3	4	5	6
40,0 %	50,0 %	4,0 %	1,0 %	1,0 %	4,0 %
Ruta ²¹					
1	2	3	4	5	
11,4 %	10,6 %	16,0 %	24,8 %	37,2 %	

Tabla 16 Distribuciones estadísticas de la muestra

El análisis realizado consiste en medir el tiempo total necesario en horas desde el inicio de la simulación y en días hasta que se termina el último trabajo, variando el orden de entrada de las piezas en cada uno de los escenarios. Los escenarios contemplados en la simulación son los siguientes:

- I. Se procesarán las piezas de **menor a mayor** número de **capas de pintado**.
- II. Se procesarán las piezas de **mayor a menor** número de **capas de pintado**.
- III. **Menor a mayor** número de **tratamientos necesarios**.
- IV. **Mayor a menor** número de **tratamientos necesarios**.
- V. **Secuencia determinada** según rutas (1,1,2,3,4,4,4,5,5,5).
- VI. **Secuencia determinada** según rutas (1,5,2,5,3,4,5,4,5,4).

²¹ Nótese que los carretones que tengan asignada la ruta 1, 2 o 5 no recibirán el tratamiento de pintado. Por lo tanto, en la práctica se considerará como si el número de capas de pintado necesarias fuera igual a 0. De esta forma, la distribución de capas de pintado únicamente se aplicará a los carretones que siguen las rutas 3 y 4.

Los resultados obtenidos para cada uno de los anteriores escenarios son los que se muestran en la siguiente tabla:

Nº Escenario	Escenarios	Horas	Días
I	Menor a mayor número capas de pintado	342,1	14,3
II	Mayor a menor número capas de pintado	325,7	13,6
III	Menor a mayor número de tratamiento	366,3	15,3
IV	Mayor a menor número de tratamiento	361,7	15,1
V	Secuencia determinada (1,1,2,3,4,4,4,5,5,5)	354,2	14,8
VI	Secuencia determinada (1,5,2,5,3,4,5,4,5,4)	339,3	14,1

Tabla 17 Resultados del estudio orden de entrada

Cabe mencionar que esta simulación no se realiza en flujo estacionario como los anteriores análisis por lo que los resultados obtenidos son ligeramente más desfavorables que en los casos anteriores.

Comparando los resultados de la Tabla 17 se pueden obtener las siguientes conclusiones:

- Los escenarios I y II, en los que se ordenan las piezas según el número de capas, obtienen los mejores resultados. En este caso destaca como el procesar al comienzo de la simulación las piezas con mayor número de capas de pintado supone una reducción poco más de medio día frente a procesarlas al final. Comparativamente con el resto de escenarios se concluye que procesar las piezas con mayor número de capas en las fases de menor saturación de la planta aumentará la productividad.
- Los escenarios III y IV, en los que se ordenan los lotes según el número de tratamientos necesarios, obtienen los peores resultados (en torno a los 15 días). Por ello se confirma que el componente con mayor importancia para conseguir mayores índices de productividad es la secuenciación del número de capas de pintado.
- Los escenarios V y VI obtienen buenos resultados. en estos casos, la secuenciación de las tareas evita la saturación de las estaciones de trabajo. Cabe destacar como en la primera secuencia llegan a entrar hasta 4 lotes consecutivos con necesidades de tratamientos de pintado (1,1,2,3,4,4,4,5,5,5), mientras que en la segunda únicamente entran 2 lotes consecutivos (1,5,2,5,3,4,5,4,5,4). Como indica la anterior tabla, la segunda secuencia finaliza los trabajos prácticamente un día antes, de ahí se concluye la importancia de evitar la agrupación de lotes con necesidades de pintado. De esta forma se pueden conseguir resultados similares al escenario I.

6 CONCLUSIONES

El modelo de simulación desarrollado ha permitido, a través de los diferentes análisis realizados, concluir la validez de los dos *layouts* junto con el dimensionamiento general de la planta de tratamiento de piezas.

En primer lugar, el análisis de niveles de ocupación permite afirmar, que, desde el punto de vista de los recursos humanos, 3 operarios deben ser suficientes para asumir la carga de trabajo de la planta bajo condiciones de máxima ocupación. Naturalmente, este resultado está condicionado a que la productividad de los operarios sea la correspondiente a los tiempos introducidos en el modelo de simulación.

Desde el punto de vista de las cabinas de Pintado, los diferentes experimentos de simulación muestran que, con la configuración y las hipótesis de trabajo actuales, la tercera cabina de Pintado podría ser prescindible, más allá de su utilidad como cabina de reserva en caso de fallo o bloqueo de alguna de las otras dos. No obstante, se ha comprobado que la ocupación de las tres cabinas es muy sensible al porcentaje de piezas que deben pasar por este proceso y a las necesidades medias de Pintado (número de capas). Dada la incertidumbre relativa a alguno de estos datos de entrada, será la práctica operativa la que revele si es necesario contar con la tercera cabina. En este sentido, si las dos primeras cabinas se acercasen a condiciones diarias de ocupación alta, los tiempos de espera podrían aumentar drásticamente en caso de no contarse con una tercera cabina, por lo que su disponibilidad sería crucial para mantener los niveles de productividad y cumplimiento de plazos deseados. En conclusión, y para que la falta de esta cabina no se convierta en un factor limitante del proceso ante determinados picos de trabajo, lo más prudente es mantener el dimensionamiento actual.

Las tasas de ocupación de los puestos de descarga y los buffers intermedios permiten determinar que el dimensionamiento considerado es suficiente para cumplir con las hipótesis de demanda consideradas. Si bien, durante picos de demanda en los que exista la necesidad de asignar más *buffers*, de los disponibles, a una tarea concreta, se podrán asignar dinámicamente *buffers* desocupados de las demás tareas.

El análisis realizado a los medios de transporte internos (AGV y puente grúa) permite concluir que no suponen un factor determinante en el proceso ya que tienen los niveles más bajos de ocupación del conjunto de los recursos. Con todo ello, en caso de fallo o avería podría ocasionar la paralización del proceso. Para evitar este tipo de situaciones, se considera oportuno contar con dos AGV en la planta de tratamiento.

El estudio de sensibilidad de la planta a la variación del número de carretones disponibles ha permitido concluir que por debajo de los 8 carretones se incrementan los tiempos de espera en la planta, con la consecuente disminución de piezas entregadas. Por otro lado, disponer de más de 8 carretones no supone un incremento justificado del número de piezas. Por ello, dotar de 8 carretones a la planta de tratamiento es un dimensionamiento óptimo.

A su vez, el análisis del cumplimiento de plazos ha permitido concluir la validez de ambos *Layouts*, si bien el *Layout 2* obtiene mejores resultados además de suponer una inversión menor al disponer de una nave de menores dimensiones.

Por último, el análisis de la programación de entrada de piezas, ha permitido concluir la necesidad de procesar las piezas con mayor número de capas preferentemente al comienzo de la simulación o de una forma lo más intercalada posible con el resto de tareas que no suponen tareas de pintado.

7 BIBLIOGRAFÍA

A. M. LAW & M. G. MCCOMAS. (1991). Secrets of successful simulation studies. *Winter Simulation Conference Proceedings*, pp. 21-27. DOI: 10.1109/WSC.1991.185587

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.

CRESPO PEREIRA, D. (2013). Modelos de Series Temporales para la Simulación de Procesos Industriales. S.I.: Universidade Da Coruña.

D. J. MEDEIROS, M. TRABAND, A. TRIBBLE, R. LEPRO, K. FAST AND D. WILLIAMS, (2000). Simulation based design for a shipyard manufacturing process. *Winter Simulation Conference Proceedings*. pp. 1411-1414 vol.2. DOI: 10.1109/WSC.2000.899118.

E. R. ZÚÑIGA, M. U. MORIS AND A. SYBERFELDT, (2017). Integrating simulation-based optimization, lean, and the concepts of industry 4.0. *Winter Simulation Conference Proceedings*, pp. 3828-3839. DOI:10.1109/WSC.2017.8248094.

I. J. TIMM AND F. LORIG. (2015). Logistics 4.0 - A challenge for simulation. *Winter Simulation Conference*, pp. 3118-3119. DOI:10.1109/WSC.2015.7408428

M. LAW AND D. KELTON. (2000). Simulation Modeling and Analysis. 3th Edition. New York: McGraw-Hill.

N. P. BASÁN, V. G. ACHKAR, C. A. MÉNDEZ AND A. GARCIA-DEL-VALLE. (2017). A heuristic simulation-based framework to improve the scheduling of blocks assembly and the production process in shipbuilding. *Winter Simulation Conference Proceedings*. pp. 3218-3229. DOI: 10.1109/WSC.2017.8248040

R. E. SHANNON. (1998). Introduction to the art and science of simulation. *Winter Simulation Conference. Proceedings*, pp. 7-14 vol.1. DOI:10.1109/WSC.1998.744892

R. G. SARGENT. (2017). A perspective on fifty-five years of the evolution of scientific respect for simulation. *Winter Simulation Conference Proceedings*, pp. 3-15.

DOI: 10.1109/WSC.2017.8247317

S. D. ROBERTS & D. PEGDEN. (2017). The history of simulation modeling. *Winter Simulation Conference Proceedings*, pp. 308-323. DOI:10.1109/WSC.2017.8247795:

T. J. SCHRIBER, D. T. BRUNNER AND J. S. SMITH. (2017). Inside discrete-event simulation software: How it works and why it matters. *Winter Simulation Conference Proceedings*, pp. 735-749. DOI: 10.1109/WSC.2017.8247828

UMI ASTILLERO 4.0. Historia de Unidad Mixta de Investigación UDC – NAVANTIA Astillero 4.0. El Astillero del Futuro. [en línea]. [Consulta: 17 abril 2018]. Disponible en:

<https://umi.udc.es/es/historia/>

Y. K. JEONG, BYEONG-SEOP KIM, J. G. SHIN, P. LEE, J. H. WOO AND JONG MOO LEE. (2016). A ship block logistics support system based on the shipyard simulation framework. *Winter Simulation Conference Proceedings*. pp. 3672-3673

DOI: 10.1109/WSC.2016.7822393

Y. LIU, M. MENG, Q. WANG, X. LING AND H. JIANG. (2012). Resource Optimization and Simulation Study of Modern Shipbuilding Material Flow. *2nd International Conference on Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering*, pp. 1-4.

DOI:10.1109/RSETE.2012.6260712