

UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ELCHE

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA



MODELADO DIGITAL Y SIMULACIÓN DE PLANTAS
INDUSTRIALES PARA DAR SOPORTE A LA
TRANSFORMACIÓN DIGITAL DE LA INDUSTRIA

TRABAJO FIN DE GRADO

Diciembre - 2021

AUTOR: Pablo Giner Antón

DIRECTOR/ES: María del Carmen Lucas Estañ

Baldomero Coll Perales

RESUMEN

Los nuevos desarrollos tecnológicos, la hiperconectividad y la globalización de la economía empujan la transformación digital de la industria hacia modelos más productivos, competitivos y sostenibles basados en el concepto de Industria 4.0. La digitalización de la industria será clave para lograr fábricas y procesos industriales flexibles y ágiles que permitan una rápida respuesta a necesidades cambiantes, fluctuaciones en las cadenas de suministro de componentes, y una cada vez más creciente demanda de productos con mayores niveles de personalización. Para ello se necesita una mayor automatización de los procesos industriales, pero también nuevos procesos de gestión y operación digitales, no sólo de las fábricas sino de las tecnologías que las soportan. Para lograr este objetivo, son clave un conjunto de tecnologías habilitadoras entre las que se encuentra las comunicaciones inalámbricas y las redes 5G, la inteligencia artificial y el *machine learning*, procesos de simulación y emulación que permitan desarrollar *digital twins*, el IIoT (internet de las cosas industrial), la realidad aumentada, y las tecnologías *cloud* centralizadas y localizadas (*edge computing*) entre otras.

Este trabajo final de grado se centra en la simulación industrial y creación de modelos industriales de plantas y procesos de producción para dar soporte al desarrollo y aplicación al entorno industrial de otras tecnologías clave, como son los sistemas de comunicaciones industriales, la aplicación de técnicas de inteligencia artificial, y servicios de *commissioning* y *digital twin* o gemelo digital.

En concreto, en este trabajo se desarrolla el modelo digital de una planta de modelado de puertas para automóvil. Este modelo se explota en el marco de un proyecto de investigación para la obtención de *data sets*.

Además, también se muestra como este tipo de modelos digitales ofrecen una herramienta con gran potencial para realizar el diseño y optimización de plantas de industriales haciendo uso de la puesta en marcha virtual, los gemelos digitales y el mantenimiento predictivo, para el cual, son imprescindibles esos *data sets*. Sin ellos la Inteligencia Artificial no puede ser entrenada para llevar a cabo la labor de predicción.

AGRADECIMIENTOS

A mi tutora, M^a Carmen Lucas, por haberme introducido en este mundo de la simulación industrial, que bien vale una oportunidad laboral.

A Francisco Soler y Álvaro Aguilar, a quienes he tenido el gusto de conocer y también de colaborar.

A mis padres, Ángela y José Andrés, a los que todo debo. Esa es una cuenta que nunca se puede saldar.

A Sara, por ser la única que ha elegido aguantarme, a mí y a mis nervios.



ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN.....	9
1.1.	Motivación y objetivos del proyecto	10
1.2.	Estructura del trabajo.....	13
2.	CASOS DE USO Y REQUISITOS DE LA INDUSTRIA 4.0.....	14
2.1.	Requisitos generales	14
2.2.	Casos de uso de la Industria 4.0	15
2.2.1.	Robots móviles y AGVs	16
2.2.2.	Control de movimiento	16
2.2.3.	Control de bucle cerrado para la automatización de procesos.....	17
2.2.4.	Monitorización remota para la automatización de procesos	17
2.3.	Servicios emergentes	18
2.3.1.	Gemelo digital.....	18
2.3.2.	Realidad Extendida.....	20
3.	VISUAL COMPONENTS.....	21
3.1.	Modelado de procesos	25
3.2.	Modelado de componentes.....	26
3.2.1.	Componentes.....	28
3.2.2.	Propiedades	30
3.2.3.	Comportamientos	31
3.2.4.	Articulaciones.....	33
3.3.	Implementación del escenario.....	33
3.3.1.	Componentes del escenario.....	33
3.3.2.	Productos del escenario.....	36
3.3.3.	Flujos del escenario	39
3.4.	Implementación de un módulo de comunicaciones inalámbricas	45
3.5.	Implementación de Data Collector	47
4.	MODELADO DIGITAL DE UNA PLANTA DE MOLDEADO DE LÁMINAS DE ACERO PARA PUERTAS DE AUTOMÓVILES.....	50
4.1.	Almacén de entrada con gestión autónoma de stock	52
4.2.	Celda de prensado.....	55
4.3.	Almacén de salida con gestión autónoma	62
4.4.	Sistema de monitorización central.....	64
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	65
5.1.	Creación de <i>data sets</i>	65

5.1.1.	Posición de los componentes.....	65
5.1.2.	Generación de datos en el escenario.....	67
5.2.	Análisis de rendimiento de la planta implementada.....	68
5.2.1.	Análisis de AGVs necesarios en la planta.....	70
5.2.2.	Análisis de operarios humanos necesario en la planta.....	77
6.	CONCLUSIONES.....	80
	Bibliografía.....	82



LISTA DE ACRÓNIMOS

3GPP	3rd Generation Partnership Project
5G-ACIA	5G Alliance for Connected Industries and Automation
AGV	Automated Guided Vehicle
AR	Augmented Reality
BoM	Bill of Material
CAD	Computer-aided design
CCSA	Asociación de Estándares de Comunicaciones de China
CNC	Central Network Controller
CPS	Cyber-Physical Systems
CSP	Cloud Service Provider
DL	Deep Learning
EC	Edge Computing
FAT	Factory Acceptance Test
IA	Inteligencia Artificial
ICPS	Industrial Cyber-Physical Systems
IEA	International Energy Agency
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IIoT	Industrial Internet of Things
IoE	Internet of Everything
IoP	Internet of People
IPCC	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático
LCA	Life Cycle Assessment
ML	Machine Learning
MR	Mixed Reality
OCDE	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos
OLP	Off-line programming (robotics)
OOP	Object Oriented Programming
OPC-UA	OLE for Process Control-Unified Architecture
OT	Operational Technology
PCF	Policy Control Function
PCP	Priority Code Point
PDB	Packet Delay Budget
PDCP	Packet Data Convergence Protocol
PDU	Protocol Data Unit
PE	ProcessExecutor
PLC	Programmable Logic Controller
PM	Process Modeling
PnP	Plug-and-play
SPIRE	Sustainable Process Industry through Resource and Energy Efficiency
TI	Tecnología de la información
TRE	Tasa de Retorno Energético
VR	Virtual Reality
WSN	Wireless Sensor Networks
XR	Extended Reality

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de un sistema de control de movimiento.	17
Figura 2. Flujos de trabajo correspondientes a las planchas de acero transformadas en la celda de prensado.	25
Figura 3. Acceso a la documentación de la API en Python para <i>Visual Components</i>	28
Figura 4. Acceso al apartado documentos de la pestaña de ayuda.....	29
Figura 5. Ejemplo del recuadro de Gráfico de Componentes.....	29
Figura 6. Tipos de propiedades disponibles.	31
Figura 7. Tipos de comportamientos disponibles.	33
Figura 8. Gráfico de componentes de la prensa.	36
Figura 9. Ventana de editor de producto.	37
Figura 10. Ventana de Editor de producto.....	37
Figura 11. Editor de flujo.	39
Figura 12. Forma general de los PE <i>FromConveyor</i> y <i>ToConveyor</i>	39
Figura 13. Visualización de parte de los flujos de todo el escenario.	40
Figura 14. Flujo simplificado del almacén de entrada.	41
Figura 15. <i>ProcessExecutors</i> del flujo del almacén de entrada.	41
Figura 16. Flujo simplificado de las láminas de acero a través de la celda de prensado.....	42
Figura 17. PE de <i>Inspection1</i>	43
Figura 18. <i>ProcessExecutors</i> finales de la zona de prensado.....	43
Figura 19. Flujo simplificado de las láminas de acero fallidas.....	44
Figura 20. <i>ProcessExecutors</i> del proceso de calidad.....	44
Figura 21. Flujo simplificado del almacén de salida.....	45
Figura 22. Ejemplo de comportamientos que forman el Módulo de Comunicaciones Inalámbricas.	47
Figura 23. Vista del escenario 2 en la que se puede observar el nuevo componente ‘ <i>Data Collector</i> ’.	48
Figura 24. Representación del escenario - Planta de prensado de láminas de acero para puertas de automóviles.....	51
Figura 25. Celdas que forman la planta de prensado de láminas de acero para puertas de automóviles.	52
Figura 26. Almacén de entrada.	54
Figura 27. Sensores de las celdas del almacén automático.	54
Figura 28. Área de operación de los AGVs.....	54
Figura 29. Celda de prensado.	56
Figura 30. Vista de planta de la celda de prensado. Enmarcados en rojo, los robots que depositan planchas en la cinta en la línea central. En azul, los robots que mueven las planchas entre prensas en la línea central.....	56
Figura 31. Sensor al final de la cinta transportadora de entrada.	57
Figura 32. Robot introduciendo una plancha en la primera prensa.....	57
Figura 33. Robot sacando una plancha tras el primer prensado para introducirla en la segunda prensa.	58
Figura 34. Salida de las prensas e inicio del control de calidad.....	58
Figura 35. Vista general del proceso de control de calidad.	59
Figura 36. Nodo de control de calidad.....	60
Figura 37. Cámara detectora de fisuras y pequeños defectos.	60

Figura 38. Una de las líneas desecha un producto por presentar defectos. El producto defectuoso es marcado es rojo.....	61
Figura 39. Operario retira el producto de la cinta transportadora para paletizarlo.	61
Figura 40. Operario depositando el producto en el pallet final.....	62
Figura 41. Pallet llevado al almacén de salida.....	62
Figura 42. Vista general del almacén de salida con gestión autónoma.	63
Figura 43. Sensor de la cinta transportadora.	63
Figura 44. Sistema de monitorización central.	64
Figura 45. Ejemplo del registro de información en el fichero <i>data_position.csv</i>	67
Figura 46. Ejemplo del registro de información en el fichero <i>data_communications.csv</i>	68
Figura 47. Ajustes de la simulación.....	69
Figura 52. Caso 2: Distancia recorrido por los AGVs	70
Figura 53. Caso 2: Capacidad batería AGVs.....	71
Figura 54. Caso 2: Actividad de las prensas.....	71
Figura 55. Caso 2: Producción final.....	72
Figura 48. Caso 1: Distancia recorrida por los AGVs.....	73
Figura 49. Caso 1: Capacidad batería AGVs.....	73
Figura 50. Caso 1: Actividad de las prensas.....	74
Figura 51. Caso 1: Producción final.....	74
Figura 56. Caso 3: Distancia recorrido por los AGVs	75
Figura 57. Caso 3: Capacidad batería AGVs.....	75
Figura 58. Caso 3: Actividad de las prensas.....	76
Figura 59. Caso 3: Producción final.....	76
Figura 60. Caso 1a: Distancia recorrida operarios humanos.	77
Figura 61. Producto depositado en almacén final.....	78
Figura 62. Caso 1b: Distancia recorrida operarios humanos.....	78
Figura 63. Producto depositado en almacén final.....	79

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Lista de componentes.	34
Tabla 2. Lista de productos definidos.	38



1. INTRODUCCIÓN

Los nuevos desarrollos tecnológicos, la hiperconectividad y la globalización de la economía empujan el desarrollo de la Industria 4.0. Este concepto hace referencia a la Cuarta Revolución Industrial que consiste en la introducción de las tecnologías digitales en la industria y procesos productivos. Estas permiten que dispositivos y sistemas colaboren entre ellos y con otros, permitiendo modificar los productos, los procesos y los modelos de negocio [1]. La transformación digital de la industria estará sustentada principalmente por los sistemas ciber-físicos respaldados por la tecnología IoT (*Internet of Things and Services*)¹, la hiperconectividad y el *Big Data*².

El gran desarrollo de las tecnologías de la información y las comunicaciones, así como la convergencia de los sistemas físicos y cibernéticos han contribuido a la transformación de los sistemas embebidos tradicionales en sistemas ciber-físicos, con casos especiales de aplicaciones en la industria. Los sistemas ciber-físicos se caracterizan por la integración y coordinación existente entre los procesos físicos y los sistemas computacionales a través de la comunicación por medio de una red de todos sus componentes [2]. Es decir, un sistema ciber-físico es un sistema informático en el que un mecanismo es controlado o monitorizado por algoritmos basados en computación. En estos sistemas, los componentes físicos y de software están muy integrados, por lo que pueden operar en diferentes escalas espaciales y temporales [3]. Como por ejemplo una fábrica con un grado de digitalización y automatización que le permita producir casi sin interacción humana, como el ejemplo que más adelante se propone en el apartado 4.

Un uso más extendido de la digitalización y la automatización trae consigo una producción más eficiente, rápida, segura, estable, flexible, económica y mejor administrada. De hecho, el papel de la automatización de fábricas y centrado en el ser humano ha demostrado ser crucial para abordar de manera efectiva las pandemias como la COVID-19. Además, esta digitalización constituye una oportunidad clave para la mejora de la competitividad de la industria española en un mercado cada vez más global. Otras economías de nuestro entorno también han emprendido iniciativas para aprovecharla. En consecuencia,

¹ *Internet of things*, abreviado IoT, es el término inglés de la internet de las cosas. Describe objetos físicos (o grupos de tales objetos) que están integrados con sensores, capacidad de procesamiento, software y otras tecnologías que conectan e intercambian datos con otros dispositivos y sistemas a través de Internet u otras redes de comunicaciones.

² *Big data* es un campo que trata las formas de analizar y extraer sistemáticamente información de conjuntos de datos que son demasiado grandes o complejos como para ser tratados por software tradicional.

es necesario abordar una profunda transformación de nuestra industria, y el motor digital debe ser clave en este sentido. En este contexto, cabe mencionar la iniciativa española Industria Conectada 4.0 [4] que impulsa la transformación digital de la industria española mediante la actuación conjunta y coordinada del sector público y privado de todas las empresas.

La digitalización de la industria será clave para lograr fábricas y procesos industriales flexibles y ágiles que permitan una rápida respuesta a necesidades cambiantes, fluctuaciones en las cadenas de suministro de componentes, y una cada vez más creciente demanda de productos con mayores niveles de personalización. Para ello se necesita una mayor automatización de los procesos industriales, pero también nuevos procesos de gestión y operación digitales de la cadena de valor completa y no sólo de las fábricas. Para lograr este objetivo, será clave integrar y explotar un conjunto de tecnologías habilitadoras entre las que se encuentra las comunicaciones inalámbricas y las redes 5G, la inteligencia artificial (IA) y el *machine learning*, procesos de simulación y emulación que permitan desarrollar *digital twins*, el IIoT (internet de las cosas industrial), la realidad aumentada, y las tecnologías *cloud* centralizadas y localizadas (*edge computing*) entre otras.

Pero no solo se trata de una mejora de la competitividad, sino que es una oportunidad para mejorar la gestión de los recursos de los que se nutre la propia industria en línea con los objetivos del Pacto Verde Europeo de la Comisión Europea [5], el cual presenta iniciativas políticas destinadas a encaminar a Europa para alcanzar emisiones netas de calentamiento global cero para 2050.

1.1. Motivación y objetivos del proyecto

Con el grado de digitalización y automatización del entorno industrial también aumenta el grado de complejidad de la gestión del propio entorno y de los procesos productivos, así como de las tecnologías que le dan soporte. Esta alta complejidad requiere sistemas de gestión y mantenimiento capaces de tomar decisiones de gestión de forma autónoma explotando la gran cantidad de datos que se genera en este entorno por sensores, actuadores, robots, maquinaria, procesos, etc. En este contexto, varias son las tecnologías habilitadoras cuya aplicación e integración en el entorno industrial será clave, como los procesos de simulación y emulación que soporten procesos de *virtual commissioning* (puesta en servicio virtual) y el desarrollo de aplicaciones de *digital twins* (gemelo digital), la inteligencia artificial o IA y el *machine learning* para facilitar los procesos de toma

de decisión en contextos y entornos industriales complejos y altamente dinámicos, y las comunicaciones inalámbricas y las redes 5G que soporten todo este entorno, entre otras.

La simulación industrial ayuda a crear modelos digitales de forma que las empresas puedan explorar las características de los sistemas y optimizar el desempeño de las fábricas. Un modelo digital no solamente permite a los usuarios llevar a cabo experimentos y escenarios alternativos sin perturbar un sistema de producción existente, sino que también se pueden usar en el proceso de planificación y diseño de la planta mucho antes de que el sistema real se instale. La disponibilidad de estos modelos digitales ofrece ventajas comprobadas para la toma de decisiones [6].

Al reemplazar una máquina en funcionamiento o instalar un nuevo software, una línea de producción, un dispositivo de proceso, o la propia planta debe estar fuera de operación el menor tiempo posible. Del mismo modo, cuando se construye una nueva fábrica, se debe obtener la capacidad operativa completa cuanto antes. Esto se puede lograr mediante un diseño cuidadoso y completo, pruebas exhaustivas y una buena planificación. Este concepto es conocido como puesta en servicio virtual o *virtual commissioning*. El *virtual commissioning* utiliza tecnología de simulación para diseñar, instalar o probar un modelo virtual antes de hacerlo en el sistema real. Para lograr el *virtual commissioning*, los modelos necesarios deben evolucionar en paralelo con el diseño, en todas las etapas para todos los componentes, sistemas, procesos, etc. El modelado y la simulación debe ser parte integral de cualquier actividad de diseño e ingeniería de la misma fábrica. Los fallos de diseño, las alternativas y las optimizaciones se pueden tratar con suficiente antelación y los procesos de ingeniería se vuelven más manejables.

Además, la simulación industrial es clave para aplicaciones emergentes como el gemelo digital o *digital twin*. El *digital twin* se basa en la generación de una réplica virtual de un producto, servicio o proceso que simula el comportamiento de su homólogo físico, con el objetivo de monitorizarlo, analizar su reacción ante determinadas situaciones y mejorar su rendimiento y eficacia [7]. El *digital twin* requiere una gran potencia de computación para disponer de la capacidad de simulación necesaria para que el modelo virtual pueda interactuar en tiempo real con el modelo físico, y la conectividad que se dispone actualmente con sistemas de computación en el *cloud* o en el *edge* es por tanto un recurso sin precedentes.

Otra de las tecnologías habilitadoras de la digitalización de la industria es la IA por su gran potencial para lograr la autonomía y flexibilidad de los sistemas de producción facilitando y agilizando los procesos de toma de decisión en contextos y entornos industriales complejos y altamente dinámicos. La IA también será clave para lograr la integración de las redes 5G para dar soporte a la industria considerando el dinamismo de los entornos industriales y los altamente exigentes requisitos de comunicaciones en términos de latencia, fiabilidad, robustez, flexibilidad y capacidad de adaptación a entornos dinámicos. Sin embargo, conviene destacar que la integración efectiva de la IA en los procesos industriales es compleja, y en cierta medida lenta por diversas razones, entre las que cabe destacar la extracción y disponibilidad de datos necesarios para el desarrollo e implementación de este tipo de técnicas. El diseño de técnicas de gestión basada en IA requiere de grandes bancos de datos o *data sets* que reflejen el comportamiento del sistema industrial para el entrenamiento y validación de las técnicas diseñadas. Sin embargo, la disponibilidad de estos *data sets* en la comunidad actualmente es nula dado el carácter confidencial del diseño y configuración de sistemas de producción en plantas industriales reales, lo cual es un factor limitante para el desarrollo de soluciones basadas en inteligencia artificial.

En este contexto, este trabajo final de grado tiene como objetivo la creación e implementación de un modelo digital de planta industrial capaz de emular de forma realista (y configurable) el comportamiento de una planta industrial real. En concreto, se ha implementado el modelo digital de una planta de producción de puertas de automóviles que integra:

1. Almacén de entrada con gestión autónoma de stock asistido por 5 AGVs.
2. Celda de prensado conformada por 3 líneas de prensado y un control de calidad.
3. Almacén de salida con gestión autónoma de stock asistido por operarios humanos.

Para la implementación de este modelo digital de planta industrial se ha utilizado el software de simulación 3D de entornos industriales *Visual Components* [8]. Este modelo digital desarrollado será utilizado con dos objetivos principalmente:

- El primero de ellos se enmarca en un proyecto de investigación financiado por la Diputación de Alicante cuyo objetivo es avanzar en la integración de la tecnología 5G y la IA para dar soporte a la transformación digital de la industria. En este contexto, el modelo digital de la planta industrial desarrollado será utilizado para conocer y caracterizar las necesidades de conectividad y transferencia de datos

dentro de la planta. La disponibilidad del modelo digital de planta industrial permitirá generar valiosos *data sets* sobre la generación y transferencia de datos industriales en diferentes contextos y configuraciones de las plantas industriales. El desarrollo y la disponibilidad de los modelos digitales de fábrica y la generación de los *data sets* supone un gran hito y es clave para el entrenamiento y validación de soluciones basadas en inteligencia artificial.

- En segundo lugar, el modelo digital de fábrica será utilizado para analizar el rendimiento y eficiencia del diseño de planta realizado. Con este análisis, se quiere mostrar el potencial de este tipo de modelos digitales para planificar el despliegue de una planta industrial y la necesidades y planteamiento de los procesos productivos para alcanzar determinados objetivos de producción. Este objetivo será en el que se haga hincapié a lo largo del análisis, puesto que se trata de un trabajo de fin de grado de la rama académica de la ingeniería mecánica.

1.2. Estructura del trabajo

En este trabajo se ha llevado a cabo un estudio de las tecnologías emergentes que conforman el concepto de Industria 4.0, centrándose en las posibilidades que brinda la simulación 3D industrial, de la que se ha hecho uso. Las principales características tecnológicas de la Cuarta Revolución Industrial, y de interés para el estudio realizado, se presentan en el apartado 2. Por otro lado, dado el carácter experimental del presente proyecto, ha sido necesario un proceso de aprendizaje en el manejo de una herramienta profesional de modelado y simulación industrial. En concreto, se ha utilizado *Visual Components*, la cual es presentada en el apartado 3. Una vez mostrada la herramienta, en el apartado 4 se describe el escenario implementado y en el 5 un análisis de rendimiento de la planta modelada. Finalmente, en el apartado 6 se presentan las principales conclusiones obtenidas en este proyecto y las principales líneas futuras de trabajo.

2. CASOS DE USO Y REQUISITOS DE LA INDUSTRIA 4.0

La transformación digital está cambiando los entornos de fabricación en lugares cada vez más flexibles, interconectando ecosistemas de fabricación modulares, que aportan a la industria una alta capacidad de adaptación a cambios en la demanda. Este hecho, junto al aumento de la digitalización y la automatización permite realizar una producción más eficiente, rápida, segura, estable, económica, fiable y con una mayor capacidad de gestión eficiente. Sin embargo, la complejidad de los productos y sistemas de producción aumenta exponencialmente al mismo tiempo, al igual que las capacidades de aprendizaje automático en el entorno industrial.

En esta sección, se presentan las necesidades y requisitos generales de la Industria 4.0, presentando los casos de uso más representativos así como nuevos servicios emergentes que permitirán lograr esos niveles de autonomía, flexibilidad y eficiencia requeridos por la industria.

2.1. Requisitos generales

A continuación, se describen los principales requisitos generales de la Industria 4.0 impuestos por las actuales tendencias en la transformación digital que sufre la industria [6]:

- **Resiliencia y seguridad.** Aunque existen diversas definiciones de resiliencia en el entorno industrial, todas ellas comparten un mismo núcleo: “la capacidad de una entidad para anticipar, resistir, absorber, responder, adaptarse y recuperarse de una perturbación”. En el entorno industrial, la resiliencia y la seguridad son dos de las características más demandadas y estas características cobran mayor relevancia en la actualidad considerando los grandes cambios que están experimentando los entornos industriales.
- **Transformación verde y eficiencia.** Existe una clara evidencia de que, al implementar tecnologías y procedimientos operativos más precisos y cuidadosos, todos los indicadores de rendimiento (indicadores técnicos, de rentabilidad y también ecológicos) se optimizan. En este contexto, la Industria 4.0 busca alcanzar una producción sostenible, en la que se debe optimizar la economía de los materiales. Los materiales deben utilizarse eficientemente pues un uso inadecuado de materiales puede resultar no eficiente económicamente y peligroso para el medio ambiente. Una ingeniería y operaciones bien gestionadas basadas en el conocimiento y la precisión son los medios más efectivos para lograr esta eficiencia. Las

mayores ineficiencias son debidas a fallos tecnológicos o paradas imprevistas en la producción, debido al uso de algoritmos y controladores mal ajustados en sistemas de producción de mala calidad y piezas, componentes y sistemas mal fabricados. En este contexto, las industrias trabajan en alcanzar una producción *zero-defect*.

- Inteligencia distribuida y maquinaria inteligente. En la transformación digital de la industria la inteligencia migra cada vez más cerca de la maquinaria y los procesos, y se está volviendo más local en lugar de global o centralizada [1]. Además, la industria es reacia a difundir sus datos e información crítica a localizaciones remotas fuera de sus instalaciones. Soluciones actuales de arquitecturas de objetos inteligentes distribuidos en el *edge* resultan cada vez más atractivas para la Industria 4.0, siendo estas cada vez más viables gracias a las mayores capacidades de computación integradas en las máquinas, robots y procesos.
- Lugares de trabajo digitales táctiles. La industria se está transformando en un entorno en el que se busca una colaboración, coordinación y cooperación hombre-máquina-máquina más segura y resiliente para impulsar la competitividad en la fabricación. Es necesario explotar las redes y servicios inteligentes avanzados para optimizar el funcionamiento en tiempo real de sistemas ciber-físicos (*Cyber-Physical Systems*, CPS). La necesidad de aumentar la agilidad de la producción y la transparencia de la cadena de suministro, y mejorar la fabricación y operación remota exige aumentar la ubicuidad, inteligencia y conectividad de la fabricación. En la Industria 4.0, la inteligencia debe poder gestionarse desde cualquier lugar, en cualquier momento y por cualquier persona.

2.2. Casos de uso de la Industria 4.0

El entorno industrial se caracteriza por una gran cantidad de casos de uso y aplicaciones diferentes con requisitos a veces muy diversos. Por ejemplo, grandes áreas industriales como la fabricación discreta pueden diferir sustancialmente de otras, como puede ser la industria de procesos³. Esto es válido no solo con respecto a los requisitos del servicio, sino también a los escenarios de implementación. A continuación, se presentan algunos

³ La diferencia más discernible entre la manufactura discreta y la manufactura por procesos es la forma en que se crea el producto. En la fabricación discreta, los productos idénticos se multiplican por medio de una línea de ensamblaje (vehículos, muebles o teléfonos). En cambio, la fabricación por procesos se vuelve más compleja debido a su naturaleza en la conversión y transformación de materias primas e ingredientes (gas, productos farmacéuticos, productos químicos y alimentos y bebidas).

de los casos de uso típicos de la industria según distintas fuentes como 5G-ACIA⁴ (*5G Alliance for Connected Industries and Automation*) [9] o el 3GPP⁵ (*3rd Generation Partnership Project*).

2.2.1. Robots móviles y AGVs

Un robot móvil o un AGV (Automated Guided Vehicle) es una máquina o robot programable capaz de realizar una gran variedad de tareas, generalmente siguiendo trayectorias programadas. El uso de estos robots móviles y AGVs aporta gran flexibilidad al entorno industrial. Los robots móviles normalmente se controlan o supervisan desde un sistema de control de guiado. Las comunicaciones inalámbricas son esenciales para dar soporte a estos robots móviles o AGVs ya que el uso de cables no es viable.

Un ejemplo muy común de este caso de uso [9] es en el que robots móviles son utilizados para realizar el transporte de materiales (recoger y almacenar material) en almacenes y plantas de producción. Los robots recogen los artículos o material de distintas posiciones de almacenamiento y los transportan a un destino predeterminado, como por ejemplo una estación de embalaje o un contenedor. En las plantas de producción, los robots móviles se utilizan para transportar productos u objetos de una fase del proceso de producción a la siguiente. Otro ejemplo es el uso de AGVs en plantas químicas, entornos potencialmente peligrosos para operarios humanos. Estos AGVs son generalmente controlados de forma remota por un operador en una sala de control. El operador observa imágenes capturadas por cámaras montadas en el AGV, las cuales se transmiten de forma inalámbrica. El operador detendrá el AGV de forma inmediata si reconoce un obstáculo en el camino del AGV o cualquier otro mal funcionamiento. Cualquier fallo o retraso en la transmisión de las señales de la cámara puede provocar accidentes graves o, como mínimo, interrupciones innecesarias del funcionamiento del AGV.

2.2.2. Control de movimiento

Un sistema de control de movimiento es responsable de controlar las partes móviles y/o giratorias de las máquinas (por ejemplo, máquinas de impresión, máquinas herramientas o máquinas de embalaje). En la Figura 1 se muestra un esquema de un sistema de control

⁴ Es un conjunto de organizaciones de las industrias con el objetivo de desarrollar la tecnología 5G en ese ámbito. El conjunto de 5G-ACIA también incluye instituciones académicas como universidades e institutos de investigación, así como otras entidades relevantes como organismos gubernamentales y asociaciones.

⁵ El Proyecto de Asociación de Tercera Generación (3GPP) es un conjunto de organizaciones que desarrollan protocolos para telecomunicaciones móviles. Su trabajo más conocido es el desarrollo y mantenimiento de los estándares 2G, 3G, 4G y 5G.

de movimiento. Un controlador de movimiento envía periódicamente los puntos de ajuste deseados a uno o varios actuadores (por ejemplo, un actuador lineal o un accionamiento) que, a continuación, realizan una acción correspondiente en uno o varios procesos (en este caso normalmente un movimiento o rotación de un determinado componente). Al mismo tiempo, los sensores determinan el estado actual de los procesos, por ejemplo, la posición actual y/o la rotación de uno o varios componentes, y envían los valores reales al controlador de movimiento. Esto se hace de una manera estrictamente cíclica y determinista, de modo que durante un ciclo de aplicación el controlador de movimiento envía puntos de ajuste o *set points* actualizados a todos los actuadores, y todos los sensores envían sus valores reales de vuelta al controlador de movimiento.

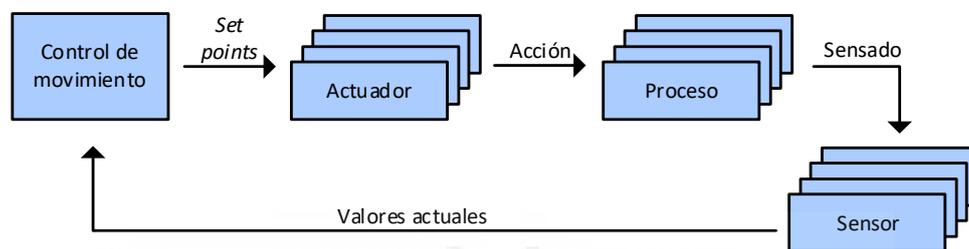


Figura 1. Esquema de un sistema de control de movimiento.

2.2.3. Control de bucle cerrado para la automatización de procesos

En este caso de uso, varios sensores instalados en una planta realizan mediciones continuas que son transmitidas a un controlador que actúa sobre ciertos actuadores formando un bucle de control cerrado. La creciente necesidad de eficiencia en la producción y calidad del producto exige un control preciso de los procesos de fabricación. Un ejemplo puede ser el siguiente [9]. Las bombas, válvulas, calentadores, enfriadores, agitadores y otros componentes de un reactor químico son monitorizados continuamente por sensores que miden caudales, temperatura y presión para mantener las condiciones en el reactor dentro de umbrales ajustados. Disponibilidad, fiabilidad, seguridad y confidencialidad de las comunicaciones son cruciales para este caso de uso.

2.2.4. Monitorización remota para la automatización de procesos

Para la monitorización de procesos y activos en el área de automatización de procesos, se instala una gran cantidad de sensores inalámbricos industriales en la planta para brindar información sobre las condiciones ambientales y de proceso, el estado de los activos y el inventario de material. Los datos se transportan a pantallas para observación y/o bases de datos para el registro y análisis de los datos.

Un ejemplo de este caso de uso lo encontramos en la industria del petróleo y el gas [9]. En estas industrias, los equipos se distribuyen en un área geográfica significativa, como por ejemplo en un campo petrolero. Los datos sobre la eficiencia y el estado operativo de los pozos, activos y dispositivos son capturados por los sensores correspondientes para monitoreo remoto. La disponibilidad, la fiabilidad y la seguridad de las comunicaciones son aspectos importantes para toda la cadena de comunicaciones.

2.3. Servicios emergentes

Los avances en comunicaciones, sensado y detección, imagen, visualización e Inteligencia Artificial o IA empujan el desarrollo de servicios emergentes en el entorno industrial, presentando estos requisitos de servicio altamente exigentes. Ejemplos de este tipo de servicios que se presentan a continuación son la Realidad Extendida (*Extended Reality* o XR) y el gemelo digital (*digital twin*), los cuales se presentan a continuación.

2.3.1. Gemelo digital

Uno de los servicios emergentes en la industria que más potencial tiene es el gemelo digital, cuya integración en la industria resulta de gran interés para la optimización y mantenimiento de los activos físicos, sistemas y procesos de fabricación.

El gemelo digital es una representación digital y dinámica de un bien industrial que permite a las empresas entender y predecir mejor el comportamiento y rendimiento de los procesos [6]. En 2018 ya se predijo que en 10 años se generalizarían las réplicas digitales de equipos industriales [10]. El gemelo digital representa la interconexión y convergencia entre un sistema físico y su representación digital creada como una entidad propia [11]. Ambas entidades, el objeto físico y el objeto digital se encuentran completamente integrados y pueden intercambiar información en ambas direcciones. Por lo tanto, el objeto digital podría actuar como una instancia de control del objeto físico y viceversa. El Internet de las cosas (IoT, *Internet of things*) se utiliza para recopilar automáticamente los datos de fabricación en tiempo real, mientras que el gemelo digital junto con el análisis de *big data* y el uso de la Inteligencia Artificial podría utilizar la gran cantidad de datos generados en el entorno industrial para predecir, estimar y analizar los cambios dinámicos dentro del objeto físico. La información o solución optimizada obtenida en el gemelo digital, se retroalimenta al objeto físico que se adaptaría en consecuencia. Esto convierte a la tecnología del gemelo digital en el centro de la transformación y actualización de la fabricación global, ya que tiene el potencial de optimizar todo el proceso de fabricación.

La integración del gemelo digital en la industria resulta por tanto de gran interés para la optimización y mantenimiento de los bienes físicos, sistemas y procesos de fabricación.

Aunque las simulaciones y los gemelos digitales utilizan modelos digitales para replicar los diversos procesos de un sistema, un gemelo digital es también un entorno virtual. La diferencia entre el gemelo digital y la simulación es, en gran medida, que esta última generalmente no se beneficia de tener datos en tiempo real. Los gemelos digitales están diseñados en torno a un flujo de información bidireccional que se produce primero cuando los sensores de objetos proporcionan datos relevantes al procesador del sistema y luego vuelve a suceder cuando los conocimientos creados por el procesador se comparten con el objeto físico de origen. La disponibilidad de datos constantemente actualizados del entorno físico real combinada con la potencia informática adicional que acompaña a un entorno virtual, hacen que los gemelos digitales tengan un mayor potencial que las simulaciones para abordar problemas desde distintas perspectivas para alcanzar la mejor solución y mejorar productos y procesos.

La simulación en tiempo real del mundo físico en el gemelo digital requiere de una transferencia continua de información entre ambos. Esto aumenta la posibilidad de aplicación y precisión de modelos analíticos predictivos y políticas de gestión y seguimiento de las empresas. Un ejemplo de aplicación de los gemelos digitales es la integración del gemelo digital llevada a cabo por Boeing [12] en el diseño y la producción de aviones. En este caso, se utilizó un gemelo digital para simular partes de una aeronave y analizar cómo se comportarán los diversos materiales a lo largo del ciclo de vida de la aeronave. Con estos cálculos, Boeing pudo lograr una mejora del 40% en la calidad de ciertas piezas que diseñó [13].

Para la implementación del gemelo digital, es necesario contar con soluciones capaces de recabar la información generada por los distintos componentes del mundo físico. Para ello se deben instalar sensores y otras herramientas que recopilen datos sobre el estado del proceso, producto o servicio en tiempo real. A su vez, esos componentes físicos deben estar conectados a un sistema basado en la nube, o en el *edge*, que recibe y procesa toda la información obtenida, además de compararla con otros parámetros contextuales. A partir de ahí, ya es posible generar virtualmente el proceso, producto o servicio y ensayar en él cualquier cambio que sólo se aplicará físicamente cuando se haya comprobado su éxito en el entorno digital [14].

Los gemelos digitales ya se utilizan ampliamente en los siguientes ámbitos [15]:

- Generación de energía: los motores grandes, incluidos los motores a reacción, los motores de locomotoras y las turbinas de generación de energía, se benefician enormemente del uso de gemelos digitales, especialmente para ayudar a establecer plazos para el mantenimiento necesario con regularidad (mantenimiento predictivo).
- Operaciones de manufactura: dado que los gemelos digitales están destinados a reflejar el ciclo de vida completo de un producto, se han vuelto omnipresentes en todas las etapas de la fabricación, guiando los productos desde el diseño hasta el producto terminado y todos los pasos intermedios.
- Industria automotriz: los automóviles representan muchos tipos de sistemas complejos que funcionan en conjunto, y los gemelos digitales se utilizan ampliamente en el diseño de automóviles, tanto para mejorar el rendimiento del vehículo como para aumentar la eficiencia en torno a su producción.

El futuro de los gemelos digitales es muy prometedor, debido al crecimiento en nuestra capacidad de computación. Esto provoca que estén constantemente aprendiendo nuevas habilidades y capacidades, generando la información necesaria para mejorar los productos y los procesos de manera aún más eficaz.

2.3.2. Realidad Extendida

La realidad extendida o XR es un nuevo término que combina VR (*Virtual Reality*), AR (*Augmented Reality*) y MR (*Mixed Reality*) [16]. La XR ha atraído una gran atención y ha abierto nuevos horizontes en el campo de la fabricación y se prevé tendrá un papel muy relevante en las futuras fábricas e instalaciones de producción inteligentes. El desarrollo técnico para realizar XR aún está en progreso, y constantemente aparecen nuevas tecnologías innovadoras [17]. En las fábricas del futuro, el factor humano todavía jugará un papel importante en la fabricación. Mantener la mano de obra humana en la producción ofrece adaptabilidad en la producción y aumenta el conocimiento técnico compartido, ofreciendo así una mayor calidad de producción. Debido al alto grado de flexibilidad, versatilidad y adaptabilidad previstas de las fábricas del futuro, los trabajadores de las plantas industriales deberán recibir apoyo para adaptarse rápidamente a nuevas tareas y actividades y garantizar el correcto funcionamiento de nuevas operaciones de manera

eficiente y ergonómica. En este contexto, la XR desempeñará un papel fundamental, por ejemplo, para las siguientes aplicaciones:

- Seguimiento de procesos y flujos de producción.
- Instrucciones paso a paso para tareas específicas, por ejemplo, en lugares de trabajo de montaje manual.
- Soporte de un experto remoto, por ejemplo, para tareas de mantenimiento o servicio.

El uso de AR (incluida dentro de la XR) en aplicaciones industriales como la producción, la planificación espacial o los sistemas de navegación están comenzando a ser más comunes [18]. La RA ha demostrado ser una manera excelente de proporcionar instrucciones técnicas paso a paso para ayudar a los técnicos en un entorno real, generalmente procesos de ensamblaje, o para apoyar de forma remota en las tareas de mantenimiento. Siguiendo las directivas de la Industria 4.0, esta tecnología pone a disposición el conocimiento técnico sin limitar el campo de visión del operador ganando terreno en entornos con peligros inminentes, como las líneas de producción donde el operador no puede aislarse de su entorno real. La RA permite la transferencia de información desde los sistemas de diseño digitalizados y las bases de datos hacia los operadores humanos, incluyendo especialmente la información de producción y mantenimiento. El desarrollo de este servicio estará reforzado por el desarrollo de tecnologías de comunicación avanzadas que admiten la transferencia de datos de manera inalámbrica con alta velocidad, a la vez que se garantiza una baja latencia con alta disponibilidad, como el 5G.

3. VISUAL COMPONENTS

Visual Components [8] es un software de simulación 3D para fabricación, que incluye herramientas para el diseño, construcción, simulación de la producción, obtención de estadísticas, programación fuera de línea y verificación de PLC⁶ de fábricas. En la actualidad, existen otros softwares alternativos como: *Tecnomatix Process Simulate* de Siemens [19] o *FlexSim* [20] entre otros.

⁶ PLC son las singlas en inglés de *Programmable Logic Controller*, es decir, un controlador lógico programable. Se trata de una computadora utilizada en la automatización industrial, para automatizar procesos electromecánicos, electroneumáticos, electrohidráulicos, tales como el control de la maquinaria de la fábrica en líneas de montaje u otros procesos de producción.

Visual Components incluye un amplio conjunto de herramientas dirigidas a la simulación de fábrica, esenciales para diseñar y configurar rápidamente las plantas industriales en un entorno interactivo y fácil de usar, y exportar y compartir fácilmente los resultados. Algunas de estas herramientas son:

- Configuración de diseño 3D. Crear diseños rápidamente arrastrando componentes desde el catálogo electrónico directamente al mundo 3D y conectando componentes compatibles a través de la función *plug-and-play* (PnP).
- Modelado de procesos. Es una forma simple y visual de configurar la simulación de los diseños que ofrece el software. Definir productos, procesos y flujos de producción con flujos de trabajo visuales.
- Catálogo electrónico. Contiene más de 2500 componentes predefinidos y listos para usar, una biblioteca sólida de modelos virtuales de robots, máquinas y equipos de docenas de marcas líderes en automatización industrial.
- Importación de archivos CAD. Importar archivos CAD directamente al mundo 3D. *Visual Components* admite tipos de archivos CAD de muchos de los principales proveedores de CAD (Autodesk, CATIA, SolidWorks, etc.).
- Dibujos 2D y BoM. Importar dibujos 2D de los diseños de fábrica actuales al mundo 3D y configurar las simulaciones. La función también admite la exportación de dibujos 2D de diseños 3D, incluida la lista de materiales.
- Estadísticas. Visualizar estadísticas de simulación utilizando gráficos de líneas, áreas, barras o circulares. Creer, modificar y visualizar datos de simulación personalizados en el panel de estadísticas. Cuando se requiera un análisis más profundo, los datos de simulación se pueden exportar fácilmente en formatos de datos PDF o Microsoft Excel.

Otra de las grandes funciones del software es la puesta en servicio virtual básica y avanzada. Como puesta en servicio básica se entiende probar y validar la funcionalidad de los modelos digitales conectando las simulaciones con sistemas de control reales. De esta forma nos podremos asegurar de que nuestros sistemas de producción están bien integrados y funcionan de manera eficiente antes de la ejecución física (PLC Connectivity). Y como puesta en servicio avanzada, se entiende la posibilidad de conectar las simulaciones con una gama de controladores físicos y virtuales específicos del proveedor para planificar, depurar y verificar los programas con imágenes y mejorar las posibilidades de la puesta en marcha virtual. Algunos ejemplos son:

- Siemens S7 PLC Connectivity admite la conectividad nativa con la mayoría de los PLC Siemens simulados y físicos, incluidos los modelos más antiguos. Esta conexión nativa proporciona velocidades de comunicación más rápidas con controladores físicos S7-1200 y admite la conexión a S7-PLCSIM.
- Los complementos de conectividad WinMOD y SIMIT permiten las comunicaciones con varios sistemas de automatización físicos y virtuales. Verificar los programas de PLC y la cinemática del robot conectándose con muchos controladores específicos de proveedores. La conectividad SIMIT abre la puerta a la gama completa de sistemas de automatización de Siemens, incluidos PLCSIM Advanced, PLCSIM, controladores virtuales, SIMIT UNIT y PLC.

Como cabe esperar, permite programar robots y cobots⁷ para su uso en un entorno virtual utilizando herramientas de programación de robots sin conexión (OLP). OLP ahorra tiempo y costes de integración de robot y cobot para sus aplicaciones (*Simple robotics*). También permite programación más avanzada con cinemática detallada y visualización de la simulación para diversas aplicaciones prácticas como soldadura, sellado, corte, pintura, manipulación de materiales, etc. Algunas de estas herramientas son:

- Datos CAD geométricos para trayectorias de robots. Se puede distinguir fácilmente las características de los archivos CAD importados. El motor de geometría 3D analiza cualquier modelo CAD importado y proporciona datos bien estructurados de superficies geométricas, curvas y bucles de curvas. Utilizando la API de topología para desarrollar sus propias herramientas de enseñanza y planificación de rutas de robot que aprovechen esta función.
- Declaraciones de ruta. Enseñar y simular rápidamente trayectorias de posiciones con robots. Las herramientas de selección de bordes y curvas ayudan a seleccionar y editar las trayectorias de los robots con aplicaciones prácticas para soldadura de robots, cuidado de máquinas, pintura y operaciones de chorro de agua, sellado y corte.
- Visualización del proceso de pintura. Visualizar la aplicación de pintura en las superficies y mida el espesor de la capa, lo que reduce el tiempo de aprendizaje del robot y mejora la planificación del movimiento.

⁷ Un cobot o co-robot es un robot creado para interactuar físicamente con humanos en un entorno colaborativo de trabajo.

Por último, hay que destacar la posibilidad de convertir datos CAD en modelos de simulación. Diseñar y simular aplicaciones de fabricación realistas con funciones de modelado fáciles de usar. Crear geometrías 3D desde cero, importar datos CAD existentes o modificar cualquier componente disponible de la biblioteca y convertirlo en modelos listos para la simulación. Algunas de estas funciones son:

- Modelado de componentes. Dar vida a los archivos CAD con la herramienta de modelado de componentes. Agregar estructuras cinemáticas y comportamientos funcionales a modelos CAD importados, modificar detalles de características de modelos existentes y crear su propia biblioteca personalizada de componentes.
- Asistentes prediseñados para un flujo de trabajo más rápido. Los complementos de funcionalidad prediseñados para el modelado de componentes agilizan el proceso de desarrollo de componentes al solicitar entradas simples y configurar automáticamente los comportamientos de los componentes.
- Geometría sólida básica. Crear nuevas geometrías 3D o realizar actualizaciones rápidas de los modelos 3D importados, directamente dentro del producto utilizando el kit de herramientas de modelado.
- Simplificación de geometría. Mejorar el rendimiento de la simulación simplificando y eliminando detalles innecesarios de sus modelos y reduzca el tamaño de los archivos.

En el sitio web *Visual Components* hay disponible multitud de tutoriales, cursos y lecciones que ofrecen una formación a varios niveles, empezando por cursos básicos hasta los más avanzados [21]. Para el desarrollo de este trabajo fin de grado, las herramientas de modelado de procesos y componentes han sido las más utilizadas. Por este motivo, se describen estas herramientas con más detalle a continuación.

Antes de describir el funcionamiento y modelado del escenario industrial seleccionado en *Visual Components*, en el apartado 4, se detallará las dos herramientas fundamentales que brinda el software con las que se ha trabajado: Modelado de Procesos y Modelado de Componentes. Además, se mostrará cómo se ha implementado el escenario explicando los componentes, productos y flujos que conforman el modelado de la planta. Y, por último, se presentarán dos nuevas funcionalidades, el módulo de comunicaciones inalámbricas y el colector de datos, desarrolladas para el registro de datos sobre el

funcionamiento y operación del escenario modelado. Estos módulos se han creado desde cero pues el software no lo disponía previamente.

3.1. Modelado de procesos

Para facilitar el modelado de plantas industriales *Visual Components* dispone de un conjunto de bibliotecas de componentes que están disponibles en el *eCatalog*. Existen principalmente dos bibliotecas para crear una planta industrial en *Visual Components*. La primera de ellas es la biblioteca *Process Modeling (PM)*. Y la segunda, es la biblioteca *Works*.

La diferencia entre ellas es el modo en el que está creado cada uno de sus componentes y como se trabaja con ellos. En este proyecto se ha empleado únicamente la biblioteca de Modelado de Procesos (*Process Modeling*) dada su mayor sencillez y número de componentes disponibles. Esta función agiliza el proceso de planificación y optimización del diseño con una configuración de la simulación rápida en el software *Visual Components*. Algunas definiciones de palabras clave son las siguientes:

- Producto: cualquier entidad que pasa por un proceso particular en un diseño.
- Proceso: conjunto de declaraciones que asignan cierto comportamiento a un proceso.
- Flujo: La secuencia de procesos que sigue el producto en un diseño durante la simulación (ver).

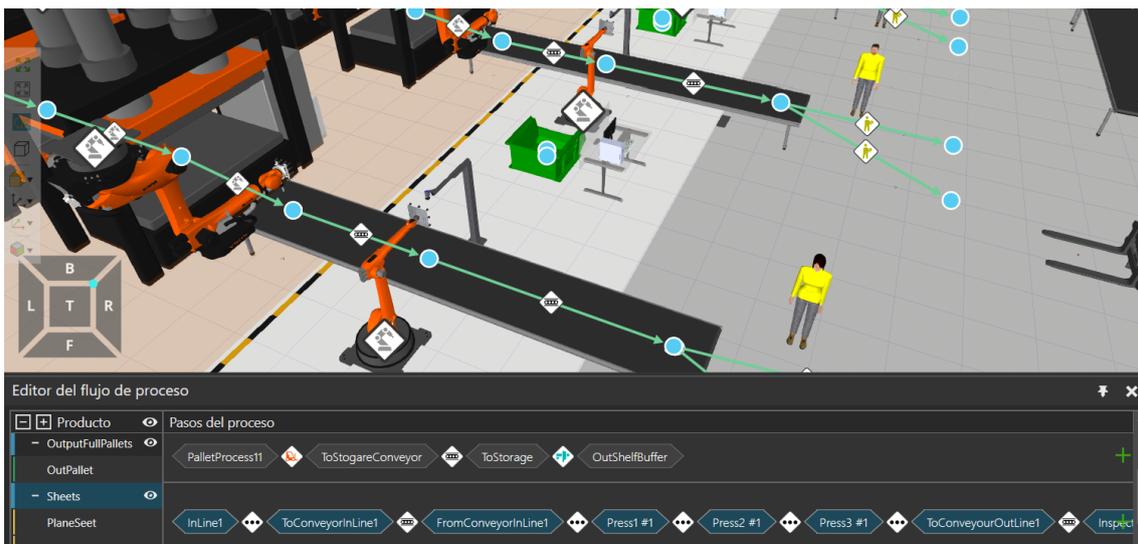


Figura 2. Flujos de trabajo correspondientes a las planchas de acero transformadas en la celda de prensado.

Mediante el Modelado de Procesos podemos encontrar formas de optimizar los procesos de fabricación y liberar recursos, tarea que no es fácil. La automatización puede ayudar en forma de robots móviles. Un robot móvil está diseñado para moverse en un entorno y realizar tareas. Por ejemplo, podemos asignar tareas de entrega a robots móviles, lo que permitiría a los trabajadores concentrarse en tareas específicas y evitar interrupciones, como dejar su estación de trabajo para llevar cosas de un lugar a otro. Es posible asignar prioridad a recursos y tareas, el transporte múltiple y la navegación a todo tipo de recursos: operarios humanos, robots móviles, brazos robot, etc.

3.2. Modelado de componentes

El Modelado de Componentes es la otra herramienta fundamental que se ha utilizado en este proyecto, ya que con ella se ha podido modelar nuevos componentes y crear bibliotecas propias de estos. En él se aprenden los conceptos básicos para modelar un componente y desarrollar una comprensión de los datos de los componentes, su estructura y capacidad de reutilización. Por ejemplo, se puede importar archivos CAD para máquinas, modelarlas para simular cómo funcionan y luego usarlas en diferentes diseños para visualizar, integrar y optimizar soluciones de fábrica.

El modelado de componentes es flexible. Es decir, existen muchos enfoques para modelar un componente de principio a fin. Puede simplificar las cosas utilizando un componente del catálogo electrónico (*eCatalog*) como plantilla para modelar un nuevo componente, como un robot. También podemos utilizar asistentes integrados para acelerar el proceso de modelado. Por ejemplo, hay herramientas que rápidamente preparan la producción de transportadores, posicionadores, dispositivos IO y robots.

El modelado de componentes es un apartado imprescindible si queremos desarrollar nuevos modelos digitales de plantas industriales. Esta opción del programa permite modificar un componente, crearlo desde cero, añadirle funcionalidades, etc. En este apartado tan sólo se describen unas pocas herramientas que ofrece el programa para crear nuevos componentes y definir su funcionamiento.

Antes de comenzar a explicar conceptos del modelado de componentes, se considera que es importante saber cómo funciona y cómo está desarrollado *Visual Components*. Este software aplica *OOP (Object Oriented Programming)* para identificar cada uno de los elementos del escenario. En este contexto, es importante realizar la definición de “componente” en *Visual Components*. Un componente es cada elemento que podemos incluir

en un escenario de *Visual Components*. Estos componentes son objetos⁸ de una determinada clase⁹ que describe las propiedades, métodos y eventos de dicho objeto. A su vez, cada componente está compuesto por más objetos, en este caso denominados comportamientos, y de igual modo que para los objetos componente, los objetos comportamiento pertenecen a una clase.

Todas las clases posibles de objetos en *Visual Components* están documentadas en la opción “Python API” que podemos encontrar dentro de la pestaña de “AYUDA” del propio programa (ver Figura 3). Esta documentación es imprescindible como veremos más adelante para trabajar con comportamientos de tipo *Script* (programación en Python).

Las principales clases empleadas en el desarrollo de ambos escenarios se nombran a continuación:

- *vcComponent*: define el elemento primario (componente).
- *vcBehaviour*: define objetos denominados comportamientos encontrados en un componente.
- *vcScript*: define el comportamiento que permite ejecutar códigos Python.
- *vcSignal*: define el comportamiento que modela señales.
- *vcProcessExecutor*: define el comportamiento que modela una secuencia de acciones.
- *vcTransportNode*: define el comportamiento que modela una ubicación en el entorno.
- *vcTransportLink*: define el movimiento de productos entre dos *vcTransportNode*.
- *vcPythonTransportController*: define un comportamiento de tipo *vcScript*. Este comportamiento controla el recurso empleado para realizar el transporte de un producto a través de un *vcTransportLink*. Por ejemplo, AGV es un recurso, controlado por un *vcPythonTransportController*, para realizar un transporte a través de un *vcTransportLink*.

Para obtener más información sobre cada una de estas clases se debe entrar a la pestaña AYUDA/Python API como se muestra en la .

⁸ En la programación orientada a objetos, un objeto es un ente orientado a objetos (programa de computadoras) que consta de un estado y de un comportamiento, que a su vez constan respectivamente de datos almacenados y de tareas realizables durante el tiempo de ejecución.

⁹ En informática, una clase es una plantilla para la creación de objetos de datos según un modelo predefinido. Cada clase es un modelo que define un conjunto de variables, métodos y eventos apropiados para operar con dichos datos.

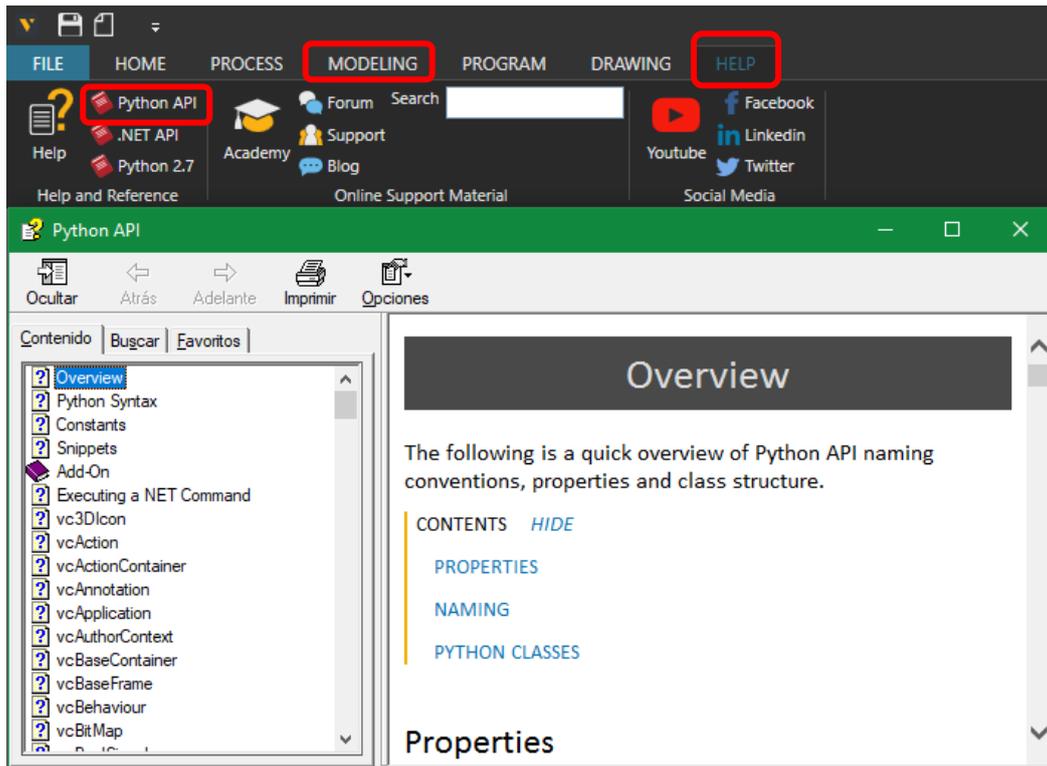


Figura 3. Acceso a la documentación de la API en Python para *Visual Components*.

El modelado de componentes se realiza desde la pestaña denominada “MODELING” (ver Figura 3). La mejor opción para identificar los objetos que forman un componente es acceder a la pestaña modelado, seleccionar el componente deseado y observar el panel situado a la izquierda.

3.2.1. Componentes

Los componentes, objetos de tipo *vcComponent*, son la unidad principal que se emplea para desarrollar un escenario. Cada componente queda definido por un conjunto de propiedades, comportamientos y articulaciones.

- Propiedades: objetos tipo *vcProperty* que definen las características del componente.
- Comportamientos: objetos tipo *vcBehaviour* que modelan el funcionamiento del componente.
- Articulaciones: objetos tipo *vcNode* que permiten a un componente tener elementos móviles.

De ahora en adelante cuando se hable de propiedades, comportamientos o articulaciones, se estará hablando de objetos que pertenecen a cada una de las clases correspondientes. Adicionalmente, se ha de distinguir entre propiedades de un componente (objetos de tipo

vcProperty) y propiedades de un objeto (propiedades o atributos que tiene la clase a la que pertenece dicho objeto).

Toda la documentación sobre las propiedades, comportamientos, etc., se puede encontrar en el apartado 'Documents' dentro de la opción 'Help' de la pestaña de "HELP" (ver Figura 4).

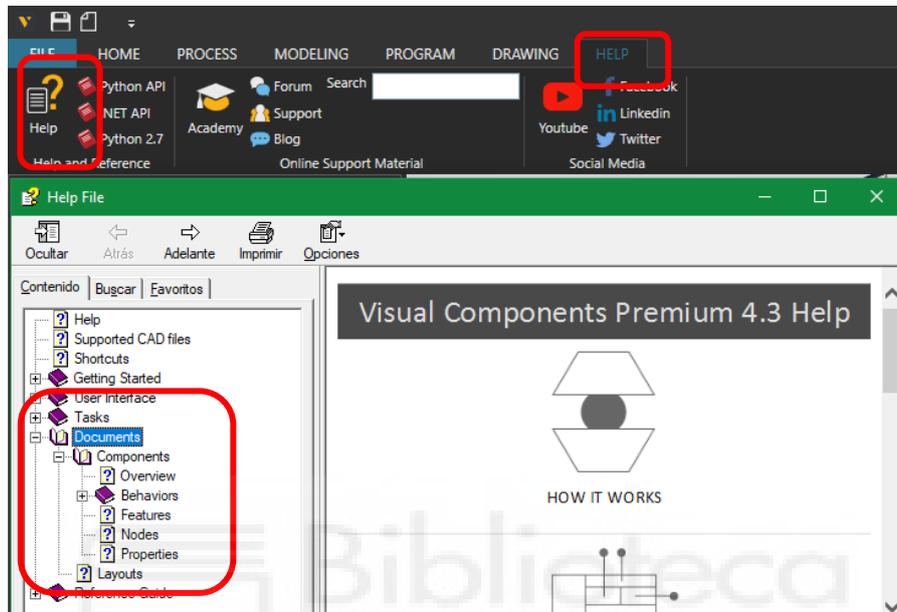


Figura 4. Acceso al apartado documentos de la pestaña de ayuda.

Para visualizar un componente y todas las propiedades, comportamientos y articulaciones de las que está compuesto, se ha de acceder a la pestaña de "MODELADO" (MODELING), seleccionar el componente deseado, y en el panel izquierdo denominado "Gráfico de Componentes" se muestran todos los elementos que conforman el componente (ver Figura 5).

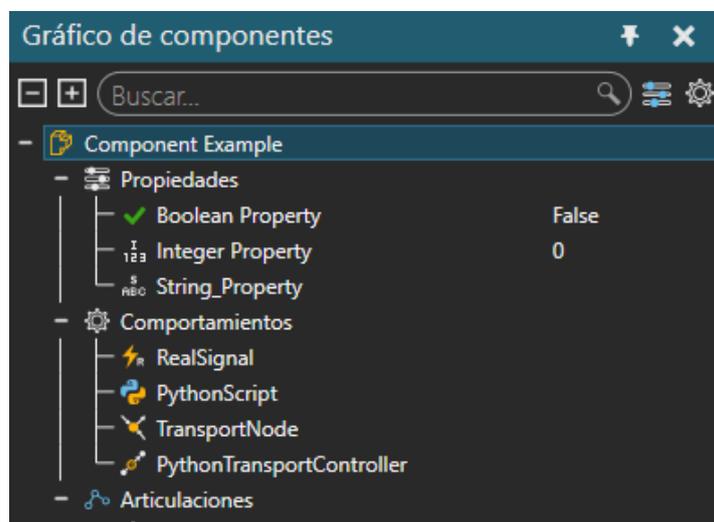


Figura 5. Ejemplo del recuadro de Gráfico de Componentes.

Tal y como se observa en la Figura 5, el componente denominado “Component Example” está formado por una serie de objetos de tipo propiedad, comportamiento y articulación. Seleccionando cada propiedad, comportamiento o articulación desde el gráfico de componentes, se pueden acceder a algunas de las propiedades que tienen asociadas ese tipo de objetos (objeto propiedad, objeto comportamiento, objeto articulación).

La única manera de acceder a todas las propiedades, métodos o eventos que ofrece cada uno de los objetos descritos como propiedades, comportamientos o articulaciones, es a través de un objeto de tipo *vcScript*, de ahí la importancia de conocer la documentación recogida en la opción “Python API” de la pestaña de ayuda.

3.2.2. Propiedades

Las propiedades como ya se ha descrito, son objetos de tipo *vcProperty*, que permiten establecer valores o parámetros de un componente. La clase *vcProperty* tiene a su vez muchas clases heredadas que concretan más el tipo de propiedad que es. En este apartado no se tratan en profundidad en todos los tipos de propiedades existentes, pero sí se comentan los más importantes. Los tipos de propiedad que se consideran más importantes son: booleanas, *string*, enteras, reales, botón y distribución. En la Figura 6 se muestran todos los tipos de propiedades disponibles que son:

- Booleana: propiedad que puede almacenar un valor *True* o *False*.
- *String*: propiedad que almacena una cadena de caracteres.
- Entera (*Integer*): propiedad que almacena un valor entero.
- Real: propiedad que almacena un valor real.
- Botón: propiedad emula un botón o pulsador en la GUI. Se puede emplear para ejecutar un código cuando ese “botón” es pulsado.
- Distribución: propiedad que modifica su valor durante la simulación dentro de una distribución normal especificada.

Como norma general las propiedades de un componente se emplean para parametrizar o configurar dicho componente.

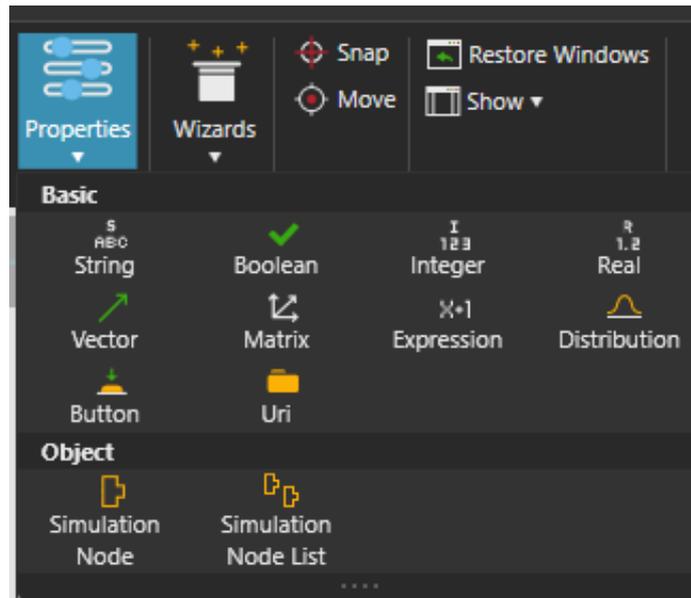


Figura 6. Tipos de propiedades disponibles.

3.2.3. Comportamientos

En este apartado se describen los comportamientos en mayor profundidad. Como se ha indicado anteriormente los comportamientos son objetos de tipo *vcBehaviour*. La clase *vcBehaviour* tiene un conjunto de clases heredadas que permiten concretar el tipo de comportamiento que es. Los principales comportamientos empleados son los siguientes:

- *Signal String*: comportamiento de tipo *vcStringSignal* que permite enviar señales cuyo valor contiene una cadena de caracteres.
- *Script en Python*: comportamiento de tipo *vcScript* con el cuál podemos obtener acceso a todos los elementos del escenario por completo, ya sean componentes, comportamientos, *vcTransportLinks*, etc. Cualquier objeto de *Visual Components* se puede gestionar desde un *vcScript*, obtener sus propiedades, usar sus métodos y eventos.
- *Nodo de Transporte*: objeto de tipo *vcTransportNode* que permite definir la posición de puntos por los que ha de pasar un producto.
- *Ejecutor de Proceso*: objeto de tipo *vcProcessExecutor* que asociado a un *vcTransportNode* define una serie de instrucciones a realizar cuando un producto llega a dicho *vcTransportNode*.

Cada uno de estos comportamientos tiene una serie de propiedades, métodos y eventos asociados al tipo de objeto al que pertenecen. Toda esta información se encuentra detallada tal y como se ha indicado anteriormente en la API de Python.

A continuación, se presentan las principales propiedades, métodos y eventos de los comportamientos *Signal String* y *Script* en Python, puesto que mediante estos dos comportamientos se han implementado los módulos de comunicaciones.

La señal de tipo *string* es un comportamiento de tipo *vcStringSignal*. A través de dicho comportamiento se pueden enviar mensajes en formato de cadena de caracteres. De la clase *vcStringSignal* destaca la importancia de las propiedades, métodos y eventos siguientes:

- Propiedad *Connections*: atributo que contiene una lista de los comportamientos (principalmente *vcScript*) a los que notificar cuando la señal cambia su valor.
- Método *signal("value")*: método que permite enviar un valor a través de dicho comportamiento notificando de este cambio a aquellos comportamientos contenidos en la propiedad anterior (*Connections*).
- Evento *OnValueChange*: evento que devuelve la señal cada vez que dicha señal cambia su valor. Permite ejecutar funciones definidas por el usuario cuando ocurre este evento.

El comportamiento de *Script* en Python pertenece a la clase *vcScript*. Gracias a este comportamiento podemos ejecutar códigos Python y programar funcionamientos y cualquier cosa que se nos ocurra. Al igual que para el comportamiento anterior, se destaca la importancia de las propiedades, métodos y eventos siguientes:

- Propiedad *script*: permite leer o escribir el código Python.
- Método *delay()*: retrasa la ejecución del script un determinado tiempo.
- Método *triggerCondition*: mantiene la ejecución del script en dicha línea hasta que una determinada función devuelva un valor verdadero.
- Evento *OnStart*: primer tramo de código a ejecutar cuando se inicia una simulación. Se ejecuta previo al *OnRun*. Permite configurar variables antes de que comience la simulación.
- Evento *OnRun*: cuerpo principal del script, es el único tramo de código donde se puede emplear método *delay()*.
- Evento *OnSignal*: tramo de código que se ejecuta cuando algún comportamiento de tipo señal, en cuya propiedad *Connections* se encuentre el *vcScript* actual, sufre algún cambio.

La Figura 7 muestra los distintos comportamientos disponibles en *Visual Components*.

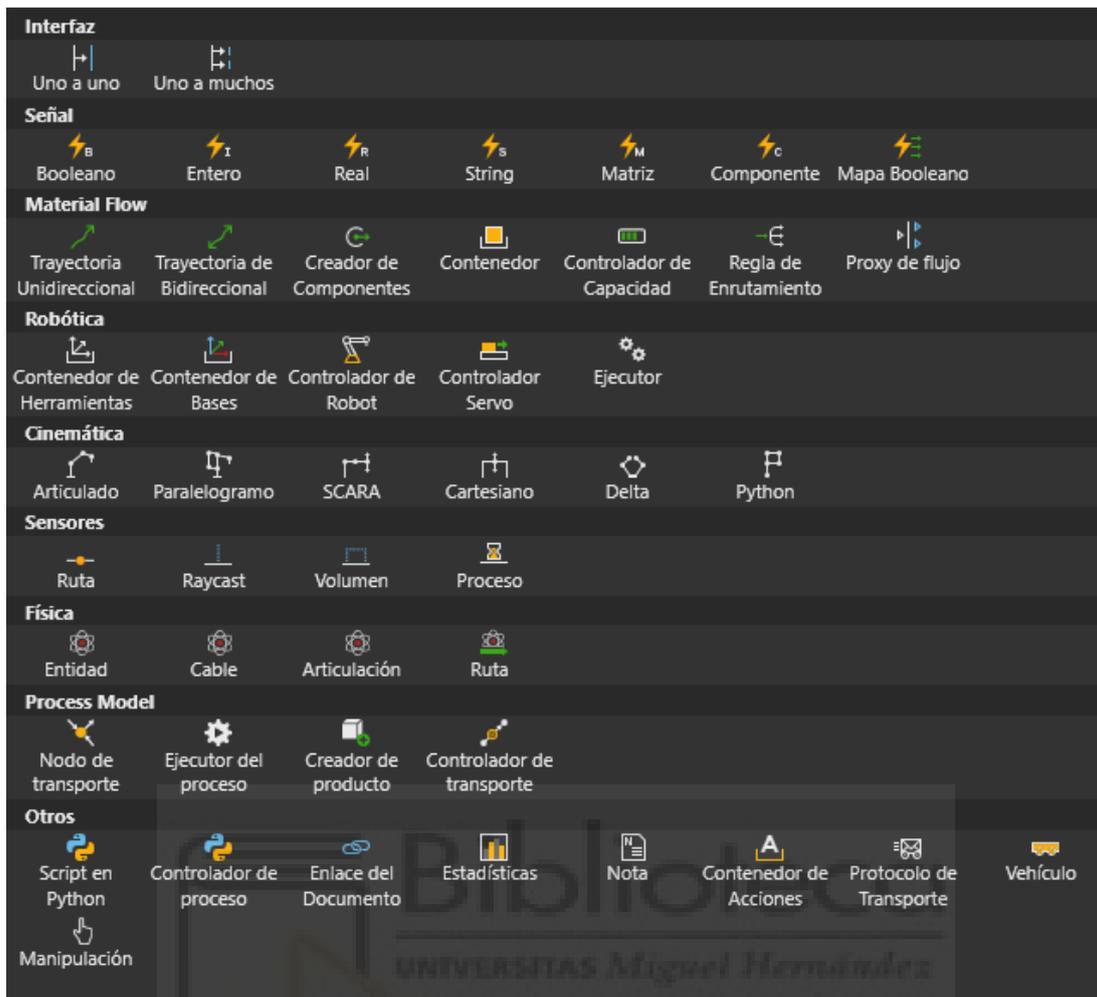


Figura 7. Tipos de comportamientos disponibles.

3.2.4. Articulaciones

Las articulaciones son objetos de tipo *vcNode* que se emplean para definir elementos móviles dentro de un componente. Dada su baja importancia para el presente proyecto no se redactan en mayor profundidad, pero se considera necesario saber al menos de su existencia.

3.3. Implementación del escenario

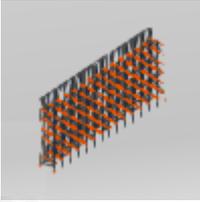
En este apartado se documenta en profundidad la implementación realizada para el escenario. En concreto, se identifican los componentes que intervienen, sus productos y sus flujos.

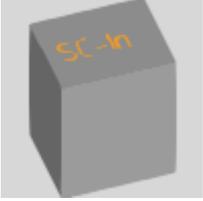
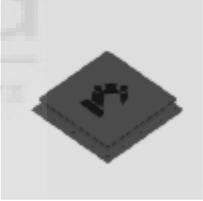
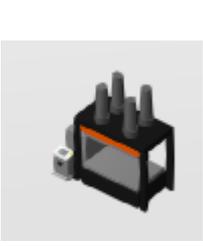
3.3.1. Componentes del escenario

Para identificar los componentes se ha seguido un determinado criterio, de tal manera que se pueda identificar o ubicar el componente a través de su nombre. Este criterio se ha aplicado a componentes repetidos (tres líneas de prensa iguales), en los cuales el número después del “#” indica la línea de prensa a la que pertenecen (1, 2 o 3). Por ejemplo, para

las prensas, dado que hay tres en la primera línea sus nombres serían Press 1 #1, Press 2 #1 y Press 3 #1. Mediante estos identificadores podemos saber de qué línea se está hablando (#1) y de que elemento (1, 2 o 3). Adicionalmente, el componente de la prensa ha tenido que ser modificado específicamente para este escenario. Los componentes más representativos del escenario se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Lista de componentes.

Identificador	Descripción	Imagen
Sistema de monitorización central	Componente que emula un servidor al que se le envían los datos de estadísticas del resto de componentes del escenario.	
InboundShelf # - OutboundShelf #	Estanterías que almacenan ya sean los productos de entrada o los de salida (Inbound, Outbound).	
SC In – Crane Controller - SC Out – Crane Controller	Componente que implementa el control de la grúa que extrae o almacena productos en las estanterías.	
Single Stacker Crane – In - Single Stacker Crane – Out	Grúa empleada para realizar los transportes hacia fuera o hacia dentro de las estanterías.	
AGV #	Robot móvil encargado de transportar las láminas de acero hasta las líneas de prensa.	
SC – AGV Controller	Componente que implementa el control de los AGVs.	

StorageController - In - StorageController - Out	Este componente emula un controlador local de almacén que contiene tanto al controlador de grúa como al controlador de AGVs mencionados más arriba.	
FeedLineRobot 'X' #	Robot situado al inicio de cada línea de prensa y las alimenta. Se encarga de coger láminas planas y cargarlas a la cinta transportadora.	
FeedPressRobot 'X' #	Robot situado al inicio o fin de cada prensa. Se encarga de introducir o extraer dichas láminas de la prensa más cercana. Están boca abajo como se ve en la imagen.	
FailLineRobot #	Robot situado en el nodo de control de calidad. Se encarga de extraer las láminas defectuosas.	
RobotController 'X' #	Componente encargado de controlar los movimientos de un robot. Se sitúa justo bajo cada robot.	
Press 'X' #	Prensa encargada de moldear las láminas de acero. Se ha partido de un componente del <i>eCatalog</i> perteneciente a la biblioteca " <i>Works</i> " y se le han añadido los comportamientos necesarios para trabajar con ella en <i>ProcessModeling</i> . Este componente ha sido modificado.	
QualityCamera #	Componente que emula una cámara en el control de calidad.	
CameraController #	Componente que emula un PC que contiene el controlador de la cámara de calidad. Se sitúa en una mesa contigua a la salida de cada línea de prensa.	

Para el componente que simula la prensa, se ha partido del modelo que proporciona *Visual Components* en su *eCatalog* denominado “*Works Press*”. Este componente está diseñado por defecto para trabajar con componentes de la biblioteca *Works*, pero dado que para este escenario se emplea la biblioteca PM, se ha modificado para trabajar mediante PM. Para ello se le han añadido dos comportamientos, uno de tipo *vcTransportNode* y otro de tipo *vcProcessExecutor* (ver Figura 8). Mediante la adición de estos dos comportamientos ya se puede trabajar con la prensa en PM. Las instrucciones que contiene el *ProcessExecutor* se describen en el apartado 3.3.3 donde se tratan los flujos del escenario.

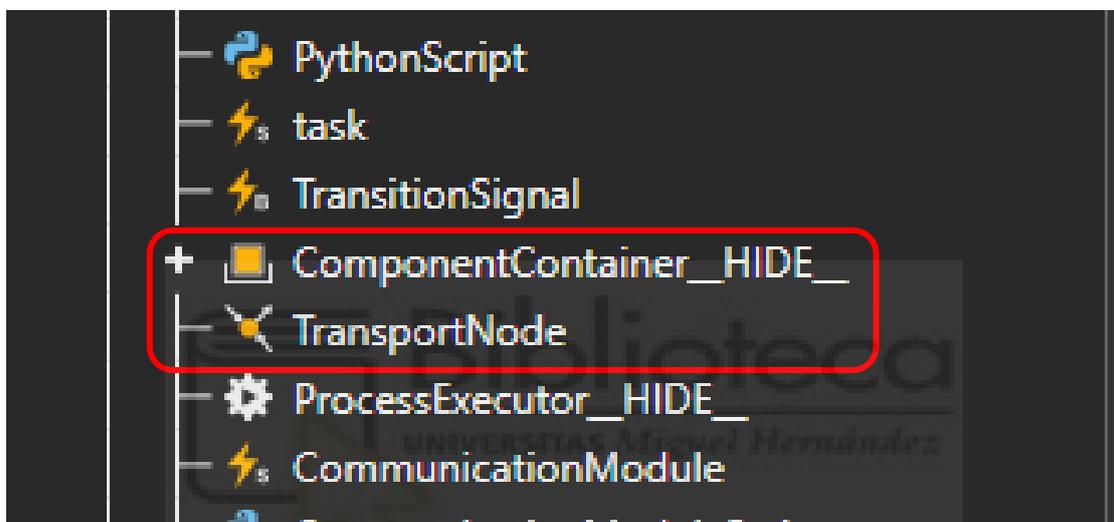


Figura 8. Gráfico de componentes de la prensa.

Otro de los componentes modificados de la misma forma y por la misma razón ha sido el *QualityCamera*, para que, a partir de introducir en el *ProcessExecutor* conveniente una instrucción de probabilidad, las líneas produzcan 1 de cada 2 productos con defectos. Así podemos poner a prueba la celda de control de calidad.

3.3.2. Productos del escenario

Para este escenario se han definido una serie de productos. Es necesario definir dichos productos para indicar el flujo de estos a través de los componentes del escenario. Para acceder a la lista de productos de un escenario hay que acceder a la pestaña “PROCESO” y una vez ahí seleccionar del panel superior la opción “Productos”. Esta opción muestra una ventana a la izquierda de la pantalla denominada Editor de Producto (ver Figura 9 y Figura 10).

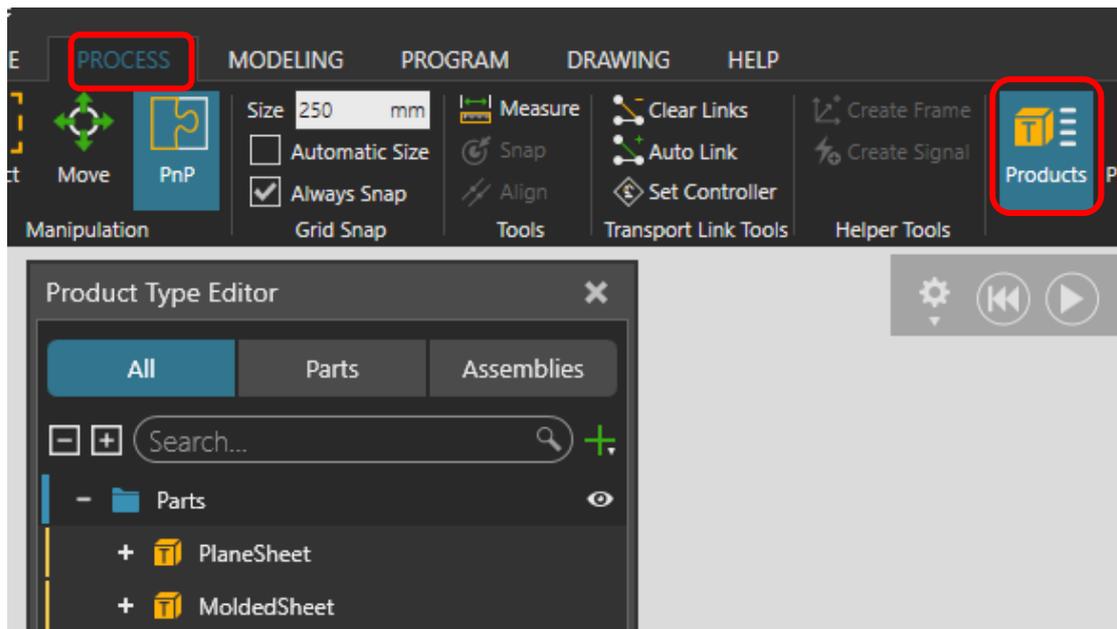


Figura 9. Ventana de editor de producto.

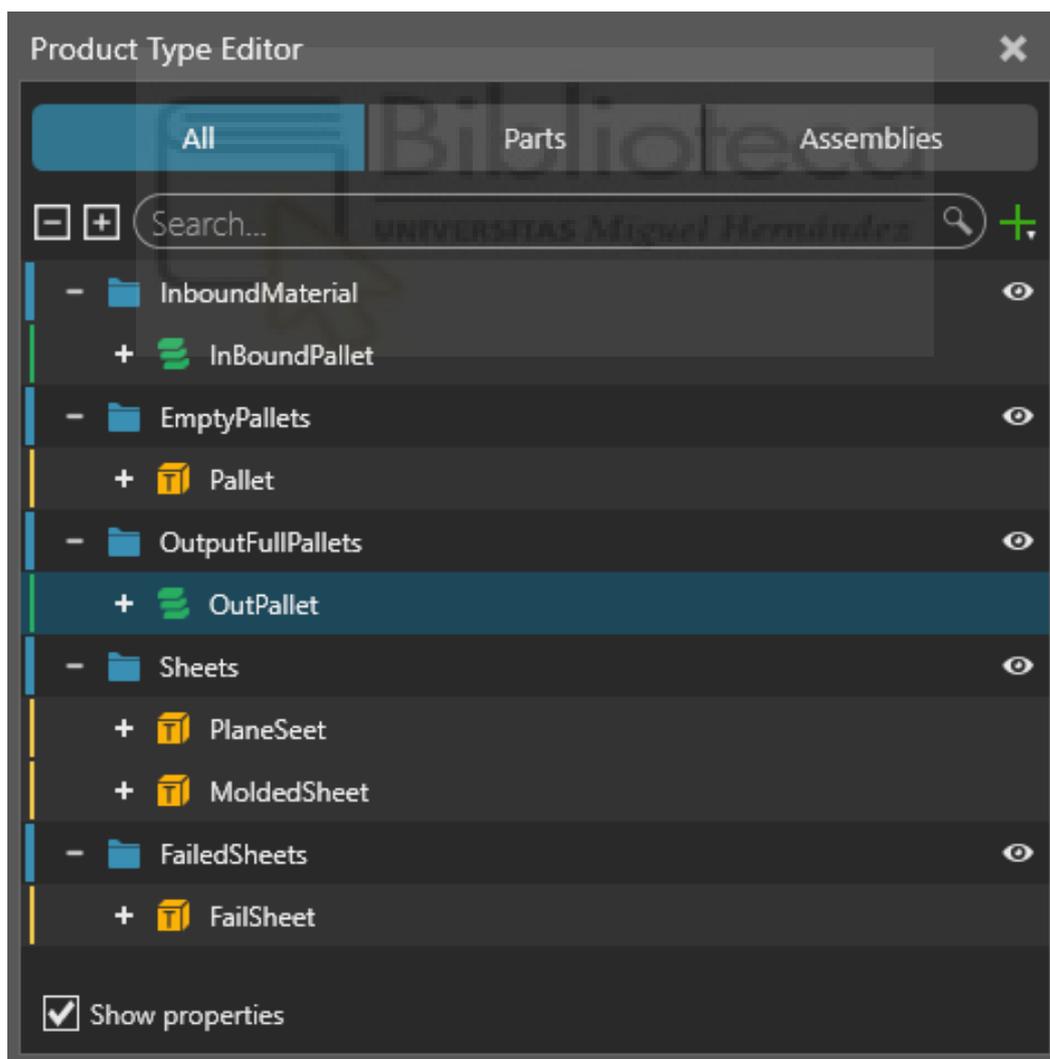
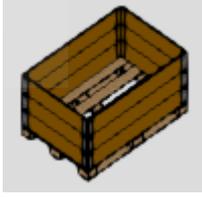
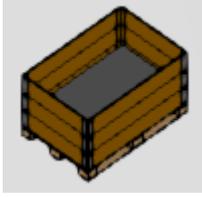
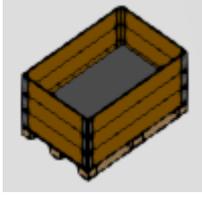


Figura 10. Ventana de Editor de producto.

Para este escenario se han definido una serie de productos que permiten simular el funcionamiento del prensado de láminas, láminas fallidas, etc. La lista de productos definidos está recogida en la Tabla 2.

Tabla 2. Lista de productos definidos.

Producto	Descripción	Imagen
<i>PlaneSheet</i>	Láminas de acero planas. Materia prima inicial.	
<i>MoldedSheet</i>	Láminas de acero moldeadas.	
<i>FailSheet</i>	Láminas de acero que no pasan el control de calidad.	
<i>Pallet</i>	Pallet vacío.	
<i>InBoundPallet</i>	Montaje de un pallet con 10 láminas de acero planas.	
<i>OutPallet</i>	Montaje de un pallet con 10 láminas de acero moldeadas. Permite modificar el número de láminas que caben en el pallet de salida respecto del de entrada.	

3.3.3. Flujos del escenario

A continuación, se presentan los flujos programados para el escenario explicando los *ProcessExecutors* (PE) que los forman. Estos PE se observan como hexágonos achatados en la ventana de Editor de Flujo (ver Figura 11), a la cual se accede desde la pestaña “PROCESO” con la opción “Flujo”, y como se ha dicho en el apartado 3.2.3, son los encargados de ejecutar comportamientos de los componentes.

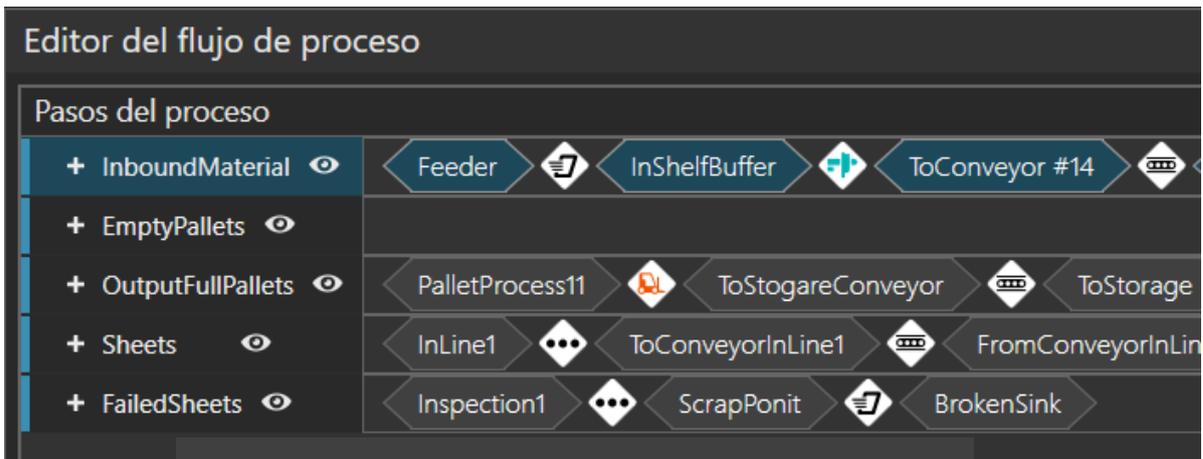


Figura 11. Editor de flujo.

Dos de ellos se repiten en muchas ocasiones y su función es la de simular un sensor y notificar mediante una señal cuando cambia el estado de ese sensor. Dichos PE son los denominados “*FromConveyor*” y “*ToConveyor*”. Estos tienen la forma definida en la Figura 12.

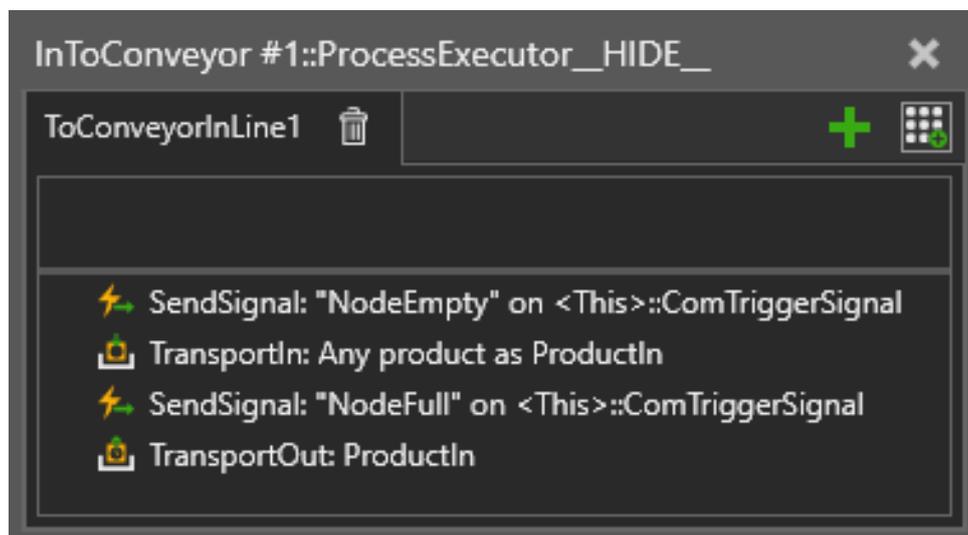


Figura 12. Forma general de los PE *FromConveyor* y *ToConveyor*.

En la Figura 12 se observan las siguientes instrucciones:

- *SendSignal*: envía el mensaje “*NodeEmpty*” a través del comportamiento *ComTriggerSignal*. con el envío de esta señal se pretende notificar el estado del sensor.
- *TransportIn*: instrucción que mantiene la ejecución en espera de recibir producto.
- *SendSignal*: una vez el nodo recibe un producto, envía el mensaje “*NodeFull*” a través del comportamiento *ComTriggerSignal*. Con el envío de esta señal se pretende notificar el estado del sensor.
- *TransportOut*: por último, mantiene la ejecución en espera de que el producto sea extraído.

Para cada una de las zonas que se describirán el apartado 4 se ha implementado un flujo distinto, que describe el movimiento de los productos por dichas zonas. En la Figura 11 se muestra el Editor de Flujo donde se exponen todos ellos y algunos de los *ProcessExecutors* que intervienen. Se va a realizar la descripción del flujo de una sola línea de prensas de forma simplificada, dado el gran número de *TransportLinks* que tiene este escenario y sería confuso mostrarlos todos (Figura 13).

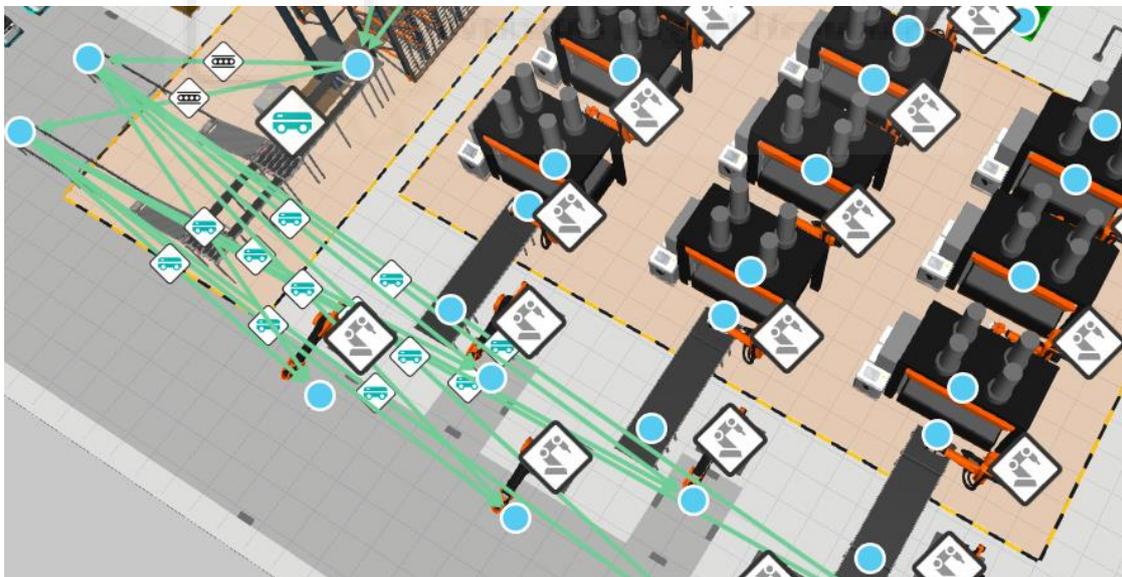


Figura 13. Visualización de parte de los flujos de todo el escenario.

InboundMaterial es el primer flujo del escenario cuya función es llevar pallets llenos de láminas planas a las entradas de las líneas de prensa. Una vez se solicite material en las líneas de prensa, el pallet viajará desde el almacén hasta el inicio de la cinta transportadora mediante la grúa. Una vez depositado el producto en el inicio de la cinta, este viajará hasta

el final de la cinta. Llegado el pallet al final de la cinta se solicita que un AGV transporte el pallet hasta la ubicación de la línea de prensa con necesidades de material (ver Figura 14).

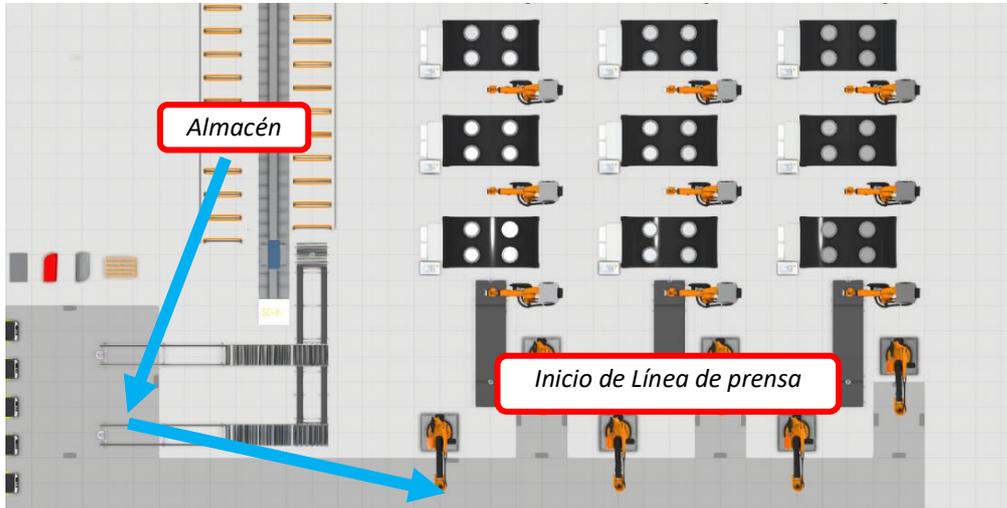


Figura 14. Flujo simplificado del almacén de entrada.

Los PE que conforman este flujo se pueden observar en la .

- *Feeder*: crea pallets llenos de láminas que llevan el almacén de entrada automáticamente.
- *InShelfBuffer*: PE ubicado en las estanterías que realiza la función de almacenar los pallets llenos de láminas y permitir su salida.
- *InLine1*: PE ubicado en los nodos al inicio de las líneas de prensado, el cual, cuando está vacío, solicita un pallet lleno de láminas y cuando se vacía este, lo elimina y solicita un nuevo pallet lleno de láminas.



Figura 15. *ProcessExecutors* del flujo del almacén de entrada.

Sheets es el siguiente flujo, representa el camino que siguen las láminas de acero a través de la celda de prensado. Parte de los nodos que alimentan cada línea de prensa y llega hasta el final de dichas líneas donde las láminas son paletizadas para su almacenamiento (ver Figura 16).

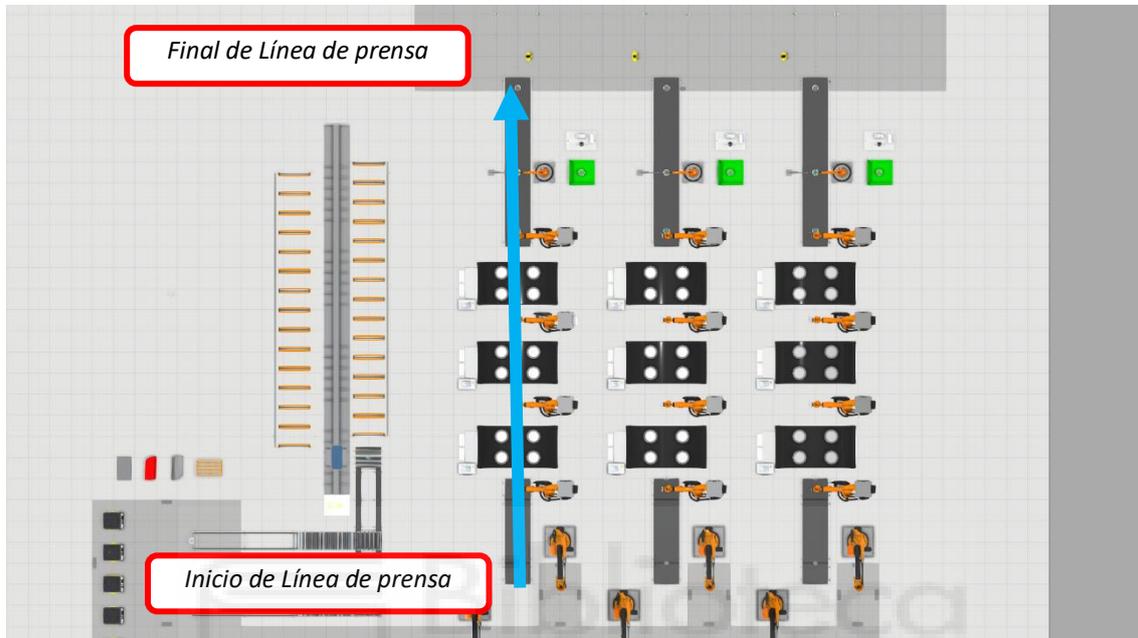


Figura 16. Flujo simplificado de las láminas de acero a través de la celda de prensado.

Durante este flujo se llevan a cabo los siguientes *ProcessExecutors*.

- *Press #*: ejecuta las acciones que permiten a la prensa funcionar y dar forma al material. Al comienzo de este se reinician las variables de la prensa para que se encuentre en su estado inicial. Por ejemplo, independientemente de la posición en la que esté la prensa, al iniciar la simulación la prensa se situará en la posición más alta. Tras colocar la prensa en su estado inicial, entra en un bucle. En dicho bucle, es donde está el funcionamiento de la prensa, donde solicita productos, cuando estos entran la prensa baja y, una vez terminado el prensado, solicita que se extraigan.
- *Inspection1*: PE ubicado en el nodo del control de calidad. Este es el encargado de comunicar al controlador de la cámara detectora de defectos que haga el análisis sobre la plancha. Para probar la celda de calidad, se configuró una probabilidad de que el 50% de las piezas presentaran un defecto y pudieran ser rechazadas del proceso (ver Figura 17).

```

GetProperty LightOn from QualityCamera #2 as LightOn
Assign LightOn = False
SendSignal: "NodeStateChange" on QualityNode #2::ComTriggerSignal
TransportIn: Any product as ProductIn
SendSignal: "NodeStateChange" on QualityNode #2::ComTriggerSignal
SendSignal: "StartMeasure" on QualityNode #2::ComInfoSignal
Assign LightOn = True
- If (uniform(1,0.0,1.0)>0.50)
  - Then
    ChangeType: "ProductIn"'s type to FailSheet
    Delay: 0.1s
    Assign LightOn = False
    TransportOut: ProductIn
  Else
    Delay: 0.1s
    Assign LightOn = False
    TransportOut: ProductIn

```

Figura 17. PE de Inspection1.

- *PalletProcess11*: PE mostrado en la Figura 18 que crea pallets vacíos para ser llenados por los operarios. Una vez que el pallet está lleno avisa al controlador del vehículo para que los retire.

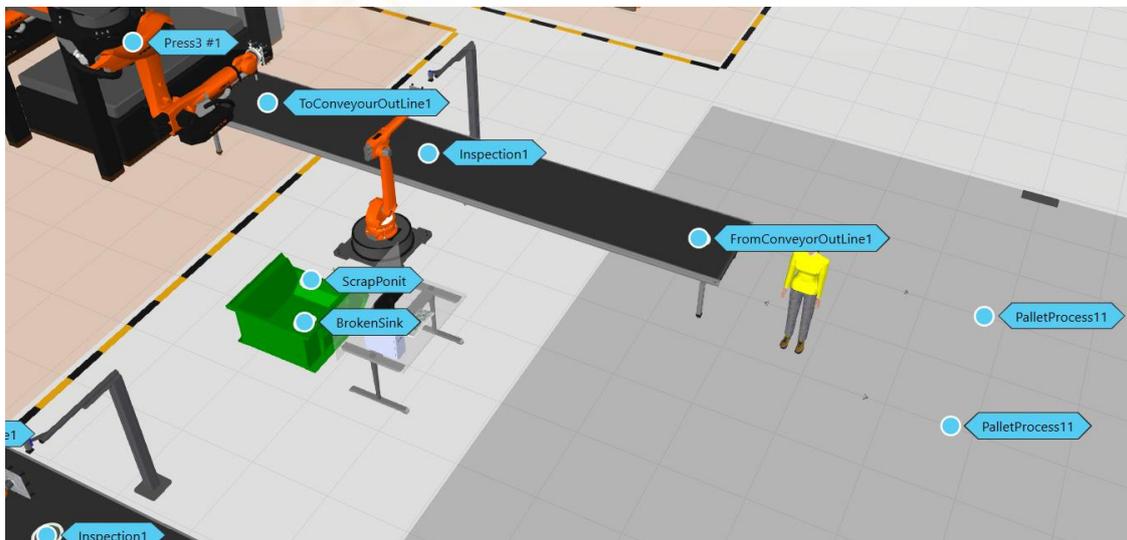


Figura 18. ProcessExecutors finales de la zona de prensado.

El flujo de *FailedSheets* describe el movimiento de las láminas que no pasan el control de calidad. Cada lámina es comprobada individualmente y en caso de no cumplir los

parámetros establecidos es transportada mediante un robot articulado a un contenedor de deshechos (ver Figura 19).

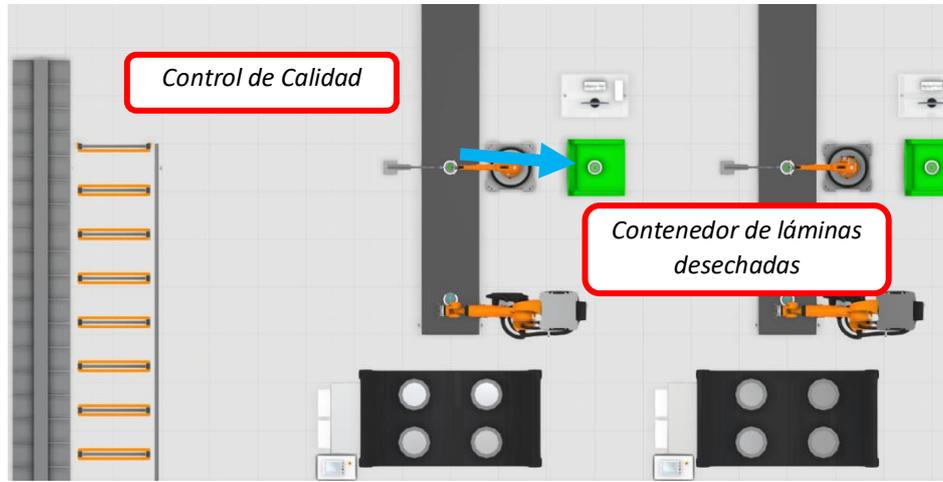


Figura 19. Flujo simplificado de las láminas de acero fallidas.

Los PE que configuran este flujo (ver Figura 20) son:

- *Inspection1*: PE ubicado en el nodo del control de calidad. Encargado de comunicar al controlador de la cámara detectora de defectos que haga el análisis.
- *ScrapPoint*: PE ubicado en el contenedor de material defectuoso que se encarga de recibir el material depositado mediante el brazo robot.
- *BrokenSink*: PE dedicado a hacer desaparecer de la simulación el objeto desechado y evitar acumulación de objetos virtuales que ralenticen la simulación.

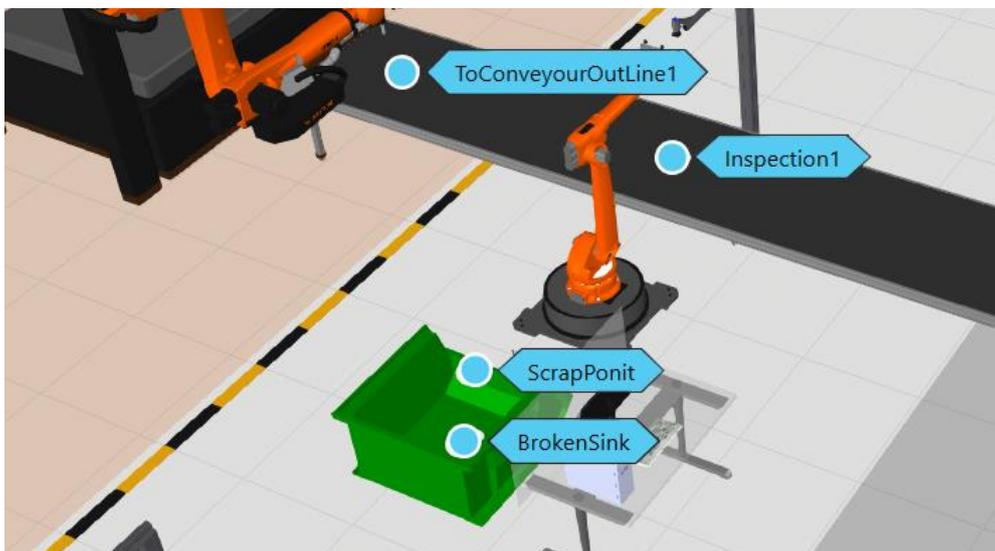


Figura 20. ProcessExecutors del proceso de calidad.

Y, por último, el flujo *OutputFullPallets* lleva a cabo el transporte de los pallets llenos desde los nodos, donde los operarios cargan las planchas válidas, hasta el almacén de salida (ver Figura 21).



Figura 21. Flujo simplificado del almacén de salida.

El PE que configura este flujo es el *OutShelfBuffer*, PE ubicado en las estanterías que realiza la función de almacenar los pallets llenos de puertas de automóvil.

3.4. Implementación de un módulo de comunicaciones inalámbricas

El comportamiento de los diferentes componentes que integran el escenario industrial modelado ha sido modificado y adaptado para incorporar un módulo que modele el intercambio de información entre los distintos elementos que integran el escenario. Este intercambio de información se realizará utilizando una tecnología inalámbrica, siendo una candidata con gran potencial la tecnología 5G. La implementación de este módulo de comunicaciones no forma parte de este trabajo fin de grado, pero sí la adaptación de los distintos componentes que modelan la maquinaria para poder incluir e interactuar con él. A continuación, se presenta una breve descripción de este módulo de comunicaciones para posteriormente explicar las modificaciones realizadas en los distintos componentes para incluir e interactuar con éste.

El módulo de comunicaciones es una nueva funcionalidad implementada en el software *Visual Components* por un compañero de la UMH en el marco del proyecto en el que se

ha desarrollado este trabajo fin de grado. Esta nueva funcionalidad se ha implementado mediante la definición de nuevos comportamientos a cada componente. Estos nuevos comportamientos implementados son de tipo señal y de tipo script, las clases correspondientes a estos objetos son *vcSignal* y *vcScript*. Los comportamientos añadidos se describen brevemente a continuación:

- *CommunicationModule*. Es un comportamiento de tipo *vcStringSignal* que contiene los parámetros que modelan una comunicación inalámbrica: objeto fuente y destino de la comunicación, tamaño del mensaje, periodicidad, latencia requerida, etc.).
- *CommunicationModuleScript*. Es un comportamiento de tipo script. Este script monitoriza la señal *ComTriggerSignal*. Cuando *ComTriggerSignal* se activa, asigna el valor correspondiente a la señal *CommunicationModule*. Por ejemplo, cuando se asigna un valor “*TransportRequest*” a *ComTriggerSignal*, el *CommunicationModuleScript* envía el mensaje correspondiente por la señal *CommunicationModule*.
- *ComTriggerSignal*. Es comportamiento de tipo señal, concretamente “*string*”. Se emplea para notificar al *CommunicationModuleScript* las condiciones de disparo que provocan el envío de un determinado mensaje. Por ejemplo, cuando un nodo se queda sin productos, envía el mensaje “*TransportRequest*” a través de *ComTriggerSignal*.
- *ComInfoSignal*. Es un comportamiento de tipo señal, concretamente “*string*”. Se emplea para notificar al *CommunicationModuleScript* determinada información de forma dinámica, es decir durante la simulación, para actualizar campos del mensaje, por ejemplo. Por ejemplo, cuando un controlador de AGVs asigna el recurso encargado de realizar un transporte, se notifica al *CommunicationModuleScript* mediante *ComInfoSignal* el nombre del recurso.
- *ComConditionScript*. Es un comportamiento de tipo script, empleado para enviar a través de *ComTriggerSignal* las condiciones de disparo, o envío de un determinado mensaje. Su función es la de monitorizar situaciones específicas del escenario que requieran el envío de un mensaje. Para enviar dicho mensaje se notifica la situación mediante *ComTriggerSignal* y *CommunicationModuleScript* se encarga de enviar el mensaje correspondiente en la señal *CommunicationModule*.

En la Figura 22 se muestran los distintos comportamientos que conforman el módulo de comunicaciones inalámbricas.

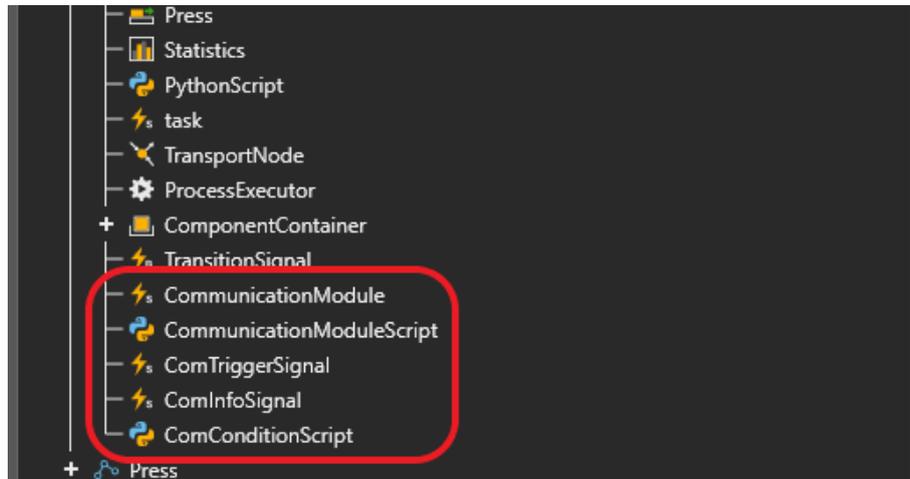


Figura 22. Ejemplo de comportamientos que forman el Módulo de Comunicaciones Inalámbricas.

Para que cada componente (maquinaria, robot, operario, etc.) pueda integrar e interactuar con el módulo de comunicaciones implementado se ha tenido que adaptar y modificar el código que modela el funcionamiento de cada componente para monitorizar las variables o eventos de cada componente (que para cada componente pueden ser distintas) cuyo valor provoca que se generen datos o mensajes a transmitir entre distintos componentes.

Por ejemplo, para que la prensa se comunique que con los nodos (sensores), los nodos con el almacén de entrada y este a su vez con los AGVs y quede registrada esa comunicación, ha sido necesario implementar los comportamientos arriba descritos en cada uno de los componentes de los que se requería conocer la comunicación.

Una vez que se implementan estos comportamientos en los componentes, y nos permiten conocer las comunicaciones que ha habido, los datos son recogidos en el *Data Collector*.

3.5. Implementación de Data Collector

Gracias a realizar la implementación del modelo digital de la planta industrial, se ha podido desarrollar los comportamientos de *Visual Components* necesarios para modelar la generación e intercambio de datos entre elementos del escenario (datos que serán transmitidos entre los nodos origen y destino utilizando una tecnología de comunicaciones inalámbrica). Además, con el objetivo de crear bancos de prueba digitales con la información de los datos generados en el escenario industrial y datos de eventos e información sobre el estado y distribución de los distintos elementos en el escenario, se ha desarrollado otro nuevo componente denominado Colector de datos o '*Data Collector*' cuya función

principal es leer y capturar los datos que describen el funcionamiento del escenario y el comportamiento de los distintos elementos en el mismo. La implementación de este nuevo componente no forma parte de este trabajo fin de grado, pero de nuevo sí la adaptación de los distintos componentes que modelan la maquinaria y otros elementos en el escenario para poder incluir e interactuar con este. A continuación, se describe brevemente cómo se ha implementado el *Data Collector*.

El *Data Collector* es un componente ficticio que no forma parte del escenario real y cuya única función es la de realizar la lectura de los datos de interés a lo largo de la simulación y su posterior registro en uno o varios ficheros. El nuevo componente parte de una figura geométrica, particularmente un cubo, al que se le han definido una serie de propiedades y comportamientos específicos para realizar la lectura y registro de los datos. En la Figura 23 muestra una vista del escenario modelado en la que se puede observar el componente *Data Collector*.



Figura 23. Vista del escenario 2 en la que se puede observar el nuevo componente '*Data Collector*'.

Las propiedades y/o comportamientos definidos para el componente '*Data Collector*' son:

- *PositionsRecording*: Comportamiento de tipo script. Monitoriza la posición de cada componente durante la simulación y la registra en el fichero '*data_position.csv*'.
- *Get & Connect CommunicationModules*: Comportamiento de tipo script, que conecta los componentes que incluyen el comportamiento '*Communication*

Module al script *'DataToTransmitRecording'*. Esto es necesario para que el script *'DataToTransmitRecording'* pueda acceder al *'Communication Module'* de cada componente y capturar la información sobre los datos generados para su posterior registro.

- *DataToTransmitRecording*: Comportamiento de tipo script. Monitoriza los datos que se generan en cada componente y que se transmitirán de forma inalámbrica. Además, realiza el registro de estos datos en el archivo *'data_communications.csv'*.



4. MODELADO DIGITAL DE UNA PLANTA DE MOLDEADO DE LÁMINAS DE ACERO PARA PUERTAS DE AUTOMÓVILES

El escenario escogido corresponde a una planta de producción cuyo objetivo es el prensado de láminas de acero para la producción de puertas de automóviles. Este escenario se basa en un diseño o *layout* previamente implementado en *Visual Components* y que representa una planta real. Por temas de confidencialidad, *Visual Components* no aporta información identificativa sobre la planta industrial concreta representada en este *layout*.

Es importante destacar que, aunque *Visual Components* ya incorpora este *layout* en su catálogo, simplemente se ha tomado como referencia de modelo de industria real dada su complejidad y posibilidades de actualización a Industria 4.0. Para este proyecto se ha desarrollado un *layout* desde cero añadiendo funciones adicionales como los almacenes automáticos o el transporte de productos mediante AGVs con el objetivo de representar una planta completa. La decisión de modelarlo desde cero, a pesar de que ya existiese parte de él en el catálogo del software, se ha tomado en base a la complejidad del diseño y la necesidad de conocer al detalle cómo se implementa la interacción entre los distintos elementos que componen el escenario y el flujo de trabajo para poder realizar modificaciones sobre el mismo.

La Figura 24 muestra una imagen de la planta de prensado modelada en *Visual Components*. La planta está dividida en tres zonas bien diferenciadas (identificadas en la Figura 25):

1. Almacén de entrada con gestión autónoma de stock. En el almacén de entrada se lleva a cabo la recepción y almacenaje de la materia prima, en este caso, planchas de acero. El almacén de entrada dispone de un controlador local de almacén que conoce y gestiona en tiempo real el estado de stock del almacén. Desde el almacén de entrada, una serie de AGVs se encargan de transportar el material necesario hasta el inicio de las líneas de prensado en las que se dará la forma requerida a las planchas.
2. Celda de prensado. Para dar la forma requerida a las planchas en base al diseño del producto final, las planchas de acero se someten a un proceso de prensado a través de una serie de prensas. En concreto, la celda de prensado en la que se lleva a cabo este proceso está formada por 3 líneas de fabricación en paralelo. La inyección de

material a cada línea, así como el traspaso de las planchas de una prensa a otra, se realiza mediante brazos robóticos de manera autónoma. Tras el proceso de prensado, se realiza un control de calidad de la plancha ya procesada (con la forma requerida). Las planchas con defectos de producción son descartadas mediante un brazo robot, mientras que las que cumplen los criterios de calidad continúan hasta el final de la cinta transportadora donde son depositadas por operarios en pallets para ser transportadas mediante una carretilla elevadora al almacén de salida.

3. Almacén de salida con gestión autónoma. En el almacén de salida se lleva a cabo la recogida y almacenaje del producto finalizado. Al igual que en el almacén de entrada, la gestión de los productos en el almacén se lleva a cabo de manera autónoma mediante un gestor local del almacén.

Además, la planta incorpora un sistema de monitorización central modelado en forma de oficina, que no está físicamente en la planta, que recoge datos del estado, funcionamiento y operación de la celda de prensado y de los almacenes de entrada y de salida. Este sistema de monitorización proporciona una visión global del funcionamiento y operación de la celda y permite la identificación de problemas o ineficiencias, así como sus causas.

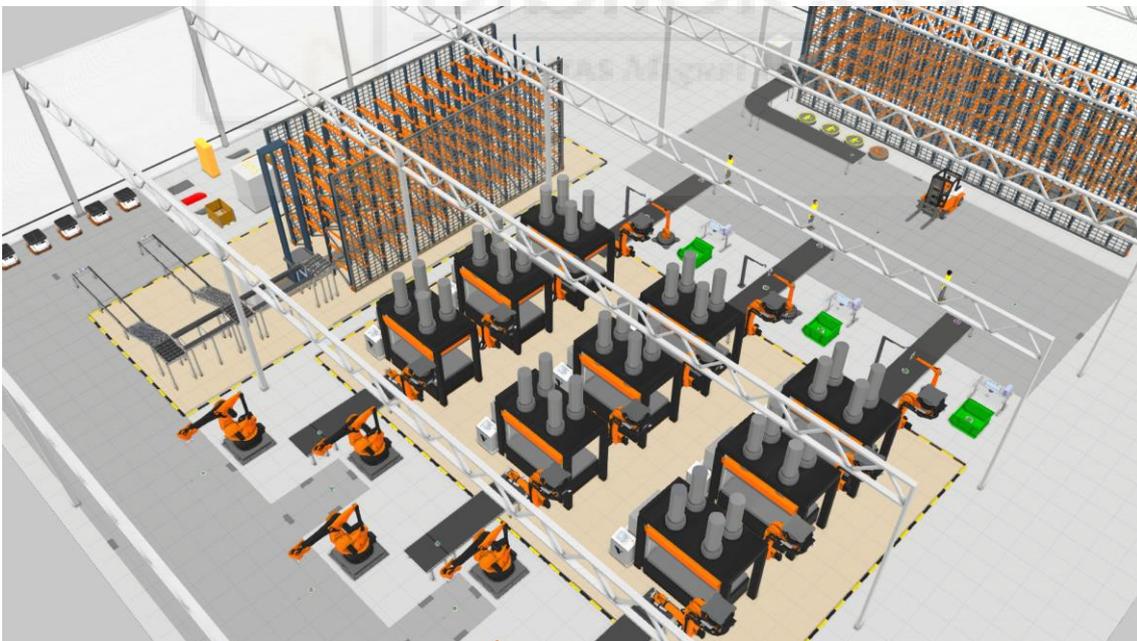


Figura 24. Representación del escenario - Planta de prensado de láminas de acero para puertas de automóviles.

En la Figura 25 se observa la distribución en planta. El cuadro (1) muestra el almacén de entrada, el cual está conectado mediante un pasillo adaptado para los AGVs a la celda de prensado del cuadro (2). Una vez se le ha dado forma al material es llevado al almacén final, representado en el cuadro (3).

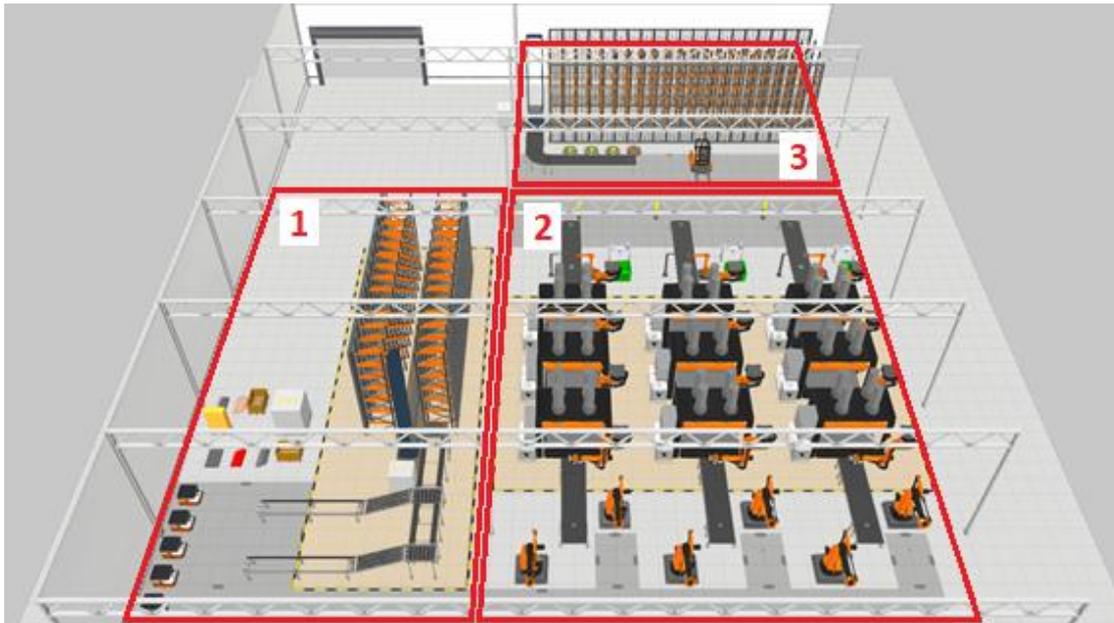


Figura 25. Celdas que forman la planta de prensado de láminas de acero para puertas de automóviles.

4.1. Almacén de entrada con gestión autónoma de stock

El almacén de entrada realiza la recogida y almacenaje de las planchas de acero, que son la materia prima utilizada en esta planta industrial. Este almacén consta de varios elementos enumerados en el párrafo siguiente, pero predominan dos estanterías metálicas con dimensiones de 13 x 6,4 m, las cuales cuentan cada una con 6 bahías (celdas individuales de almacenaje) de altura y 14 de largo, lo que le otorga una capacidad total para almacenar 168 pallets.

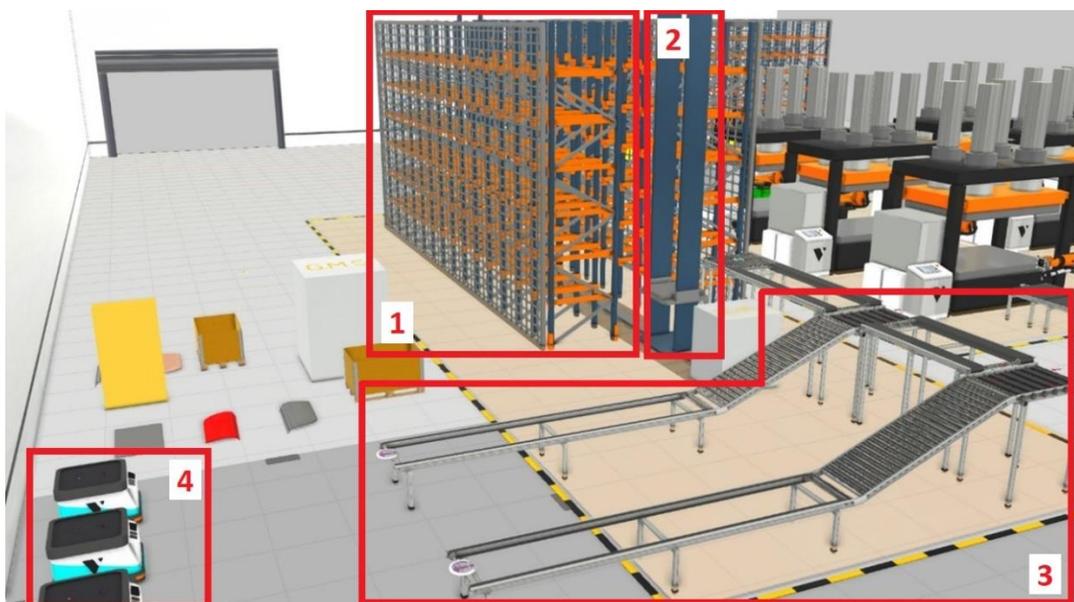
La Figura 26 muestra una vista general del almacén de entrada en la que se pueden observar los diferentes elementos que lo integran. Estos elementos son:

- Estanterías en las que se deposita el material de entrada identificadas en el recuadro con numeración (1).
- Grúa que recoge el material de la estantería para situarlo en las cintas transportadoras (identificadas en el recuadro con numeración (2)).
- Cinta transportadora que traslada el material depositado por la grúa hasta el punto de recogida de los AGVs (recuadro (3)).
- AGVs encargados de transportar el material desde el almacén hasta el comienzo de las distintas líneas de prensado (recuadro (4)).
- Controlador local de almacén que conoce y gestiona en tiempo real el material disponible en el almacén para cubrir las necesidades de material de entrada a la

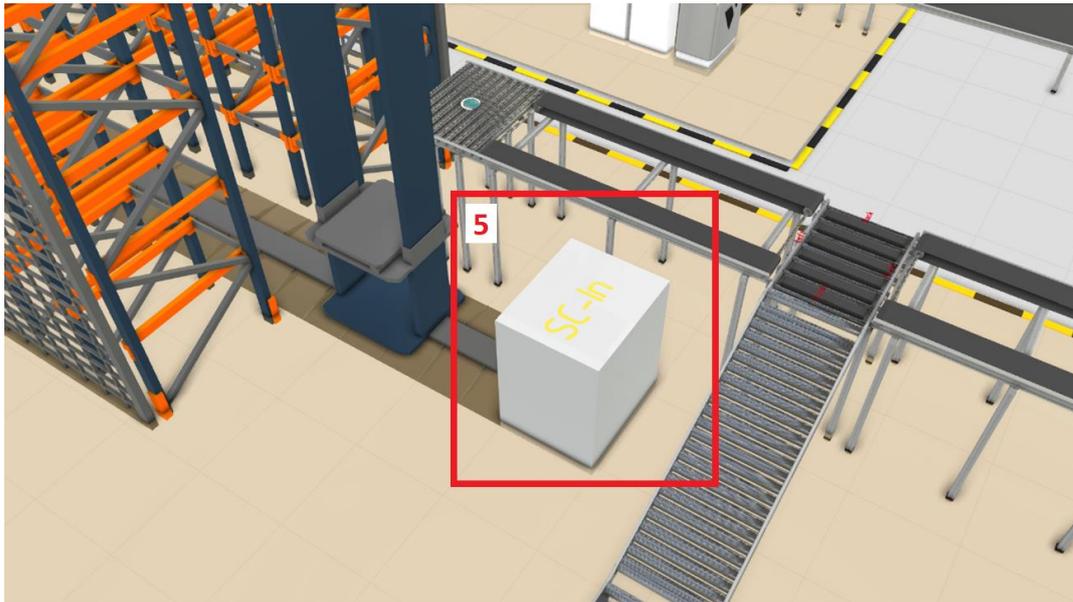
celda de prensado. Además, mantiene sincronizados y operativos los AGVs (recuadro (5)).

El gestor local del almacén es una aplicación software instalada en un servidor junto a la grúa (Figura 26.b). Este está compuesto por dos módulos software: el gestor del material y el controlador de los AGVs. El gestor del material conoce y gestiona en tiempo real el material disponible en el almacén para cubrir las necesidades de material de entrada a la celda de prensado. El controlador de los AGVs tiene conocimiento del estado, posición y tareas de los distintos AGVs en todo momento. En base a esta información, identifica y notifica al AGV que debe realizar cada transporte de material necesario desde el almacén de entrada hasta la línea de prensado correspondiente.

Cuando se produce la entrada de material en el almacén, éste es depositado en las bahías de las estanterías, las cuales poseen un tamaño adecuado para los pallets de 1,2 x 1 m. Las estanterías incorporan en cada bahía un sensor (Figura 27) que indica si está ocupada o no. Cada vez que algún sensor de estas baldas sufre un cambio de valor, se notifica al gestor local del almacén mediante un mensaje donde se le indica el cambio que ha sufrido dicho sensor. Cuando el gestor local del almacén recibe una solicitud de material desde una línea de prensado, envía la orden a la grúa para que saque material. Este material será transportado por los AGVs hasta la línea de prensado que ha solicitado material. El AGV se mueve a través de un pasillo reservado para ello (Figura 28), hasta los puntos de descarga de material, que se encuentra al inicio de cada línea de prensado (señalados en rojo en la Figura 28). De esa forma, la materia prima estará disponible para que el brazo robot correspondiente lo coja para iniciar el proceso de prensado.



a) Vista general del almacén de entrada.



b) Gestor local del almacén.
Figura 26. Almacén de entrada.

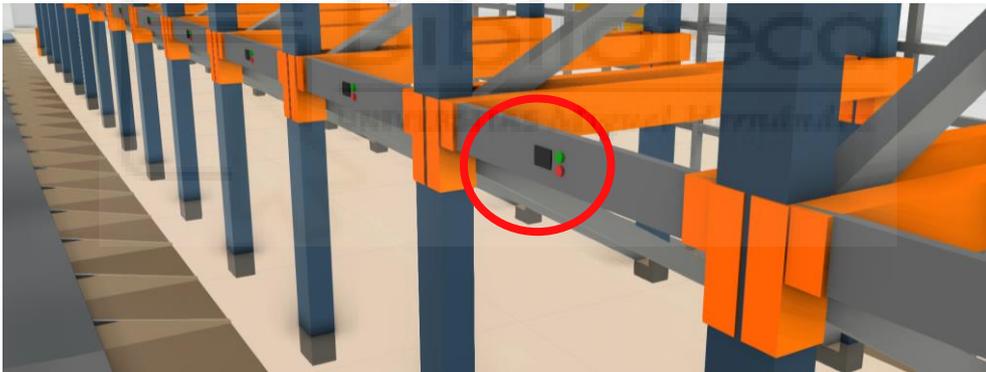


Figura 27. Sensores de las celdas del almacén automático.

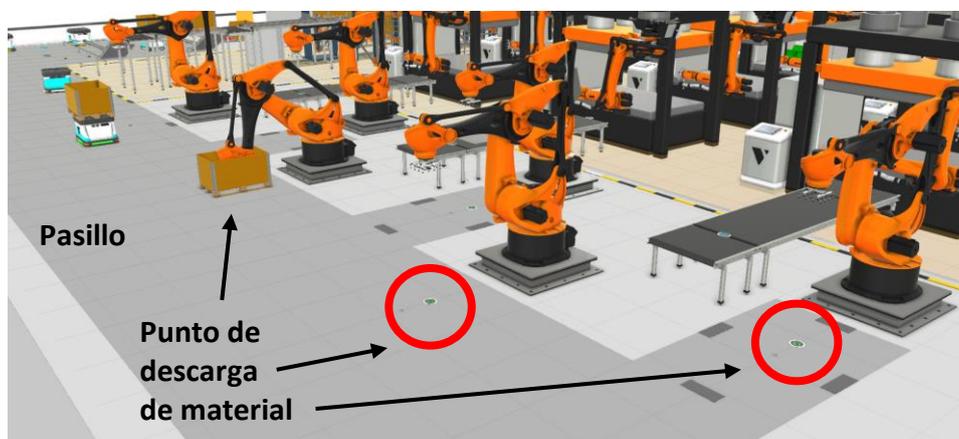


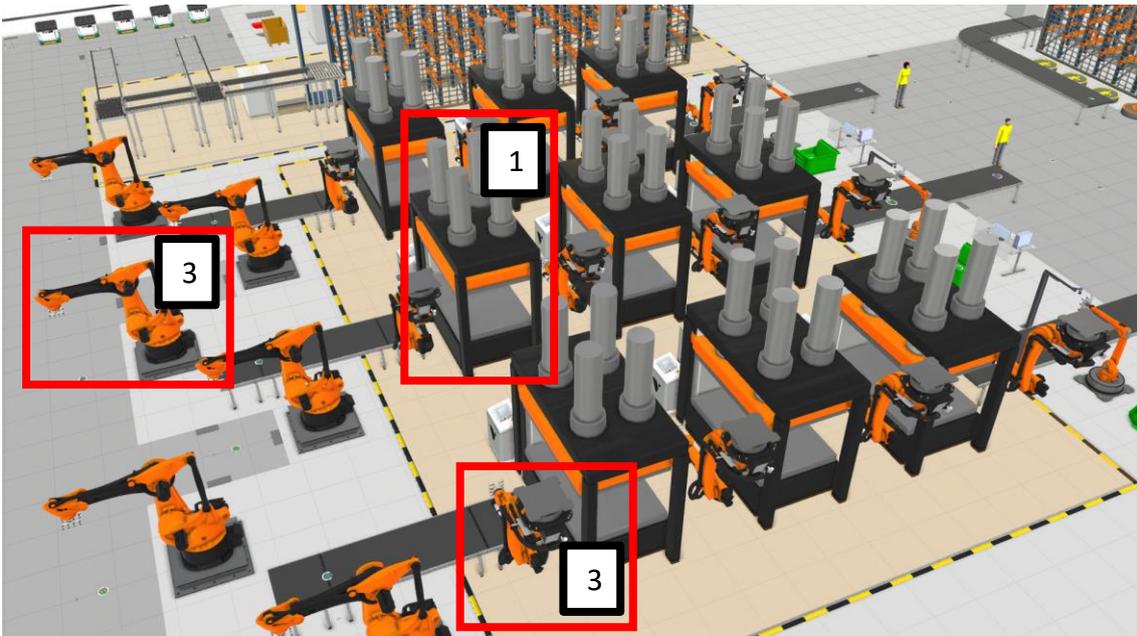
Figura 28. Área de operación de los AGVs.

4.2. Celda de prensado

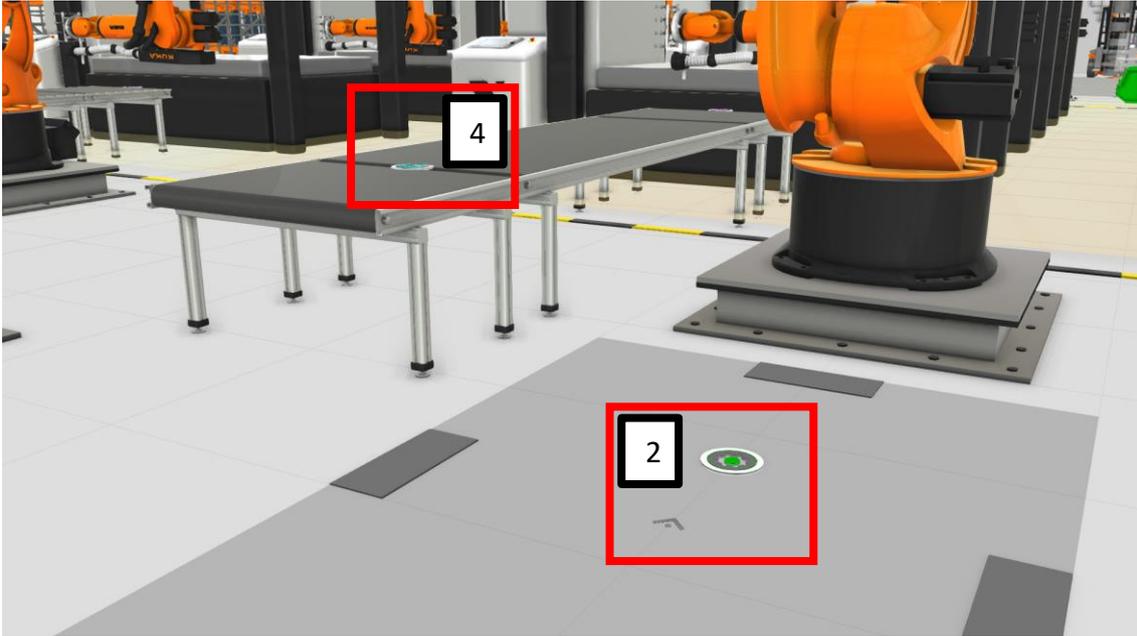
La celda de prensado recibe las planchas de acero provenientes del almacén para ser prensadas y convertidas en puertas de automóviles. La celda consta de 3 líneas de prensado idénticas que trabajan en paralelo. La Figura 29 muestra las líneas de prensado.

Cada línea está compuesta por los siguientes elementos:

- 3 prensas en las que se les da forma a las planchas de acero (recuadro (1) en Figura 29). Las prensas tienen unas dimensiones de 4 x 5 x 2 m, dotadas de un espacio interior adecuado al material con el que se trabaja.
- Puntos de descarga en los que los AGVs provenientes del almacén depositan los pallets con el material a una distancia operativa para los robots. Estos puntos poseen sensores que se encargan de avisar al gestor local del almacén si hace falta más material y mantener informados a los controladores de los robots de esta celda, condición necesaria para que estos actúen o no (recuadro (2) en Figura 29).
- Brazos robóticos que se encargan de mover el producto de una prensa a la siguiente (recuadro (3) en Figura 29).
- Cintas transportadoras que dirigen el material hasta el siguiente punto de trabajo. Tiene unos sensores al inicio y al final que son los encargados de indicar a los controladores de los robots si hay o no material (recuadro (4) en Figura 29).



a) Vista general de la celda de prensado.



b) Punto de descarga de material para cada línea de prensado.
 Figura 29. Celda de prensado.

Al inicio de cada línea de prensado, se sitúan 2 brazos robóticos que se encargan de introducir el material en la prensa (ver Figura 30). Estos 2 brazos robóticos trabajan de manera sincronizada. Para lograr esta sincronización, los robots intercambian información de su posición de forma periódica. De esta manera tienen la capacidad de decidir cuándo recogen material y lo depositan en la cinta.

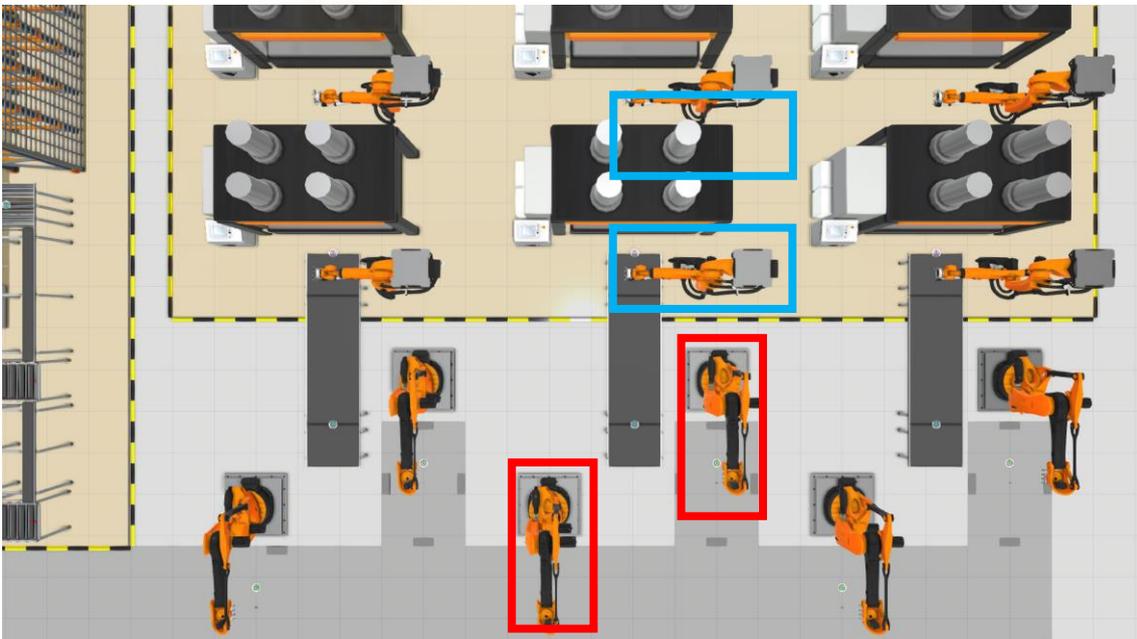


Figura 30. Vista de planta de la celda de prensado. Enmarcados en rojo, los robots que depositan planchas en la cinta en la línea central. En azul, los robots que mueven las planchas entre prensas en la línea central.

Cuando las planchas depositadas en la cinta llegan al final de esta, el sensor ubicado al final (Figura 31) enviará una señal al siguiente robot que recoge el material y lo introduce en la prensa (ver Figura 30 y Figura 32).

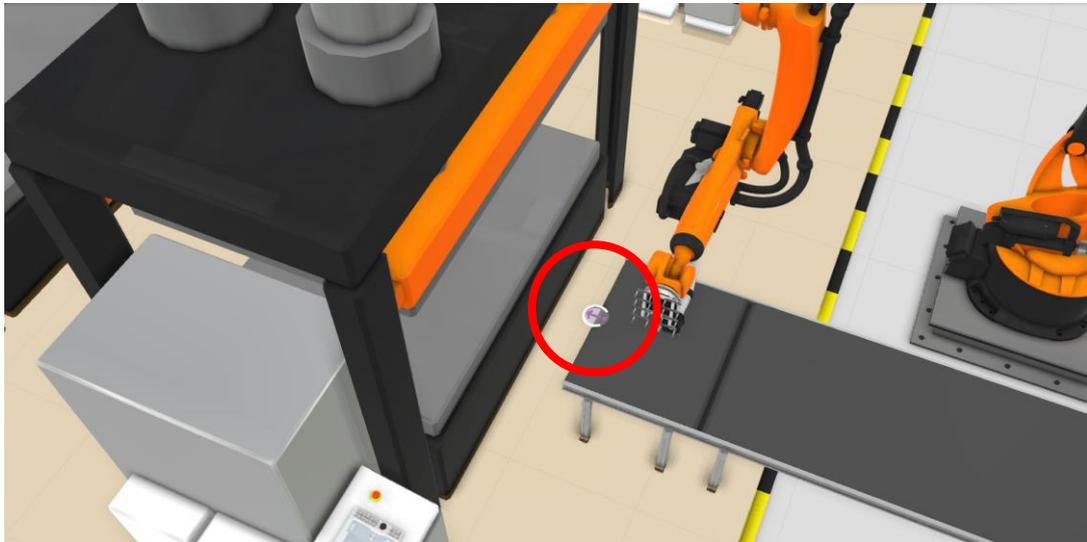


Figura 31. Sensor al final de la cinta transportadora de entrada.

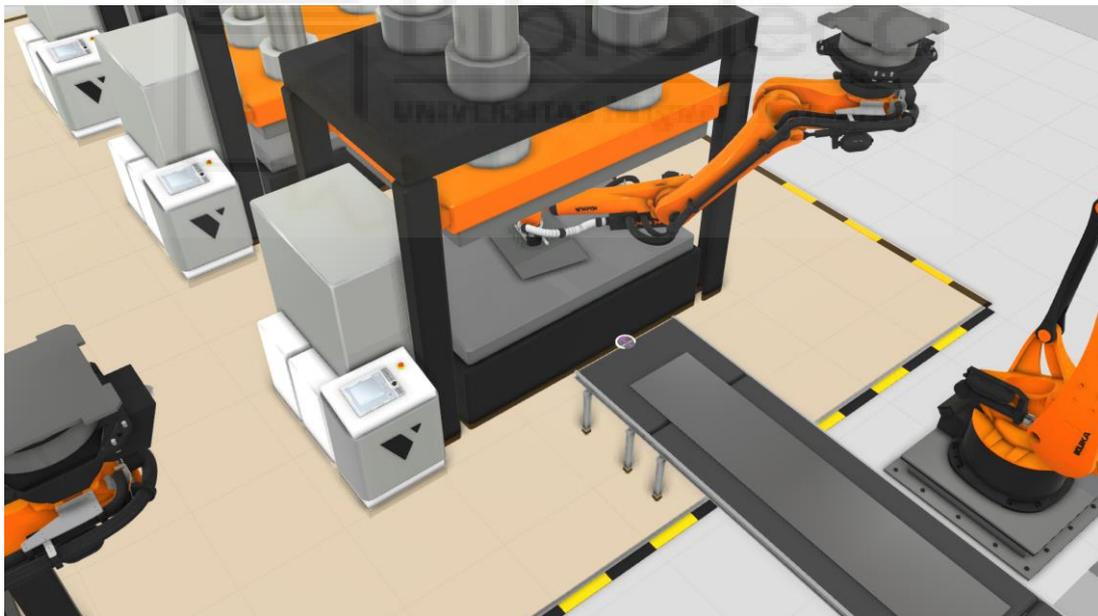


Figura 32. Robot introduciendo una plancha en la primera prensa.

Una vez introducido, la prensa detecta, mediante sus propios sensores, el material e inicia el proceso que demora 3 segundos de bajada, 1 segundo de prensado y finalmente otros 3 de subida, volviendo a la posición inicial. Finalizado el primer prensado, se sucede este proceso 2 veces más en las otras 2 prensas restantes. La prensa libera el producto y envía

la señal al controlador del brazo robot siguiente para que la extraiga y la introduzca directamente en la segunda prensa (Figura 33).



Figura 33. Robot sacando una plancha tras el primer prensado para introducirla en la segunda prensa.

Al final de cada línea de prensado se realiza un control de calidad en el cual se desechan las piezas que presenten defectos. A la salida de la tercera prensa, el producto ya acabado es colocado en la cinta transportadora que lo llevará a la zona de control de calidad (Figura 34). El control de calidad durante la producción es de suma importancia, ya que permite encontrar de forma rápida y con precisión fallos en los procesos a los que se somete el material. Sin este control, un porcentaje de las piezas que salen de las prensas seguirían adelante en la cadena, a pesar de presentar defectos, y pueden poner en riesgo la integridad del producto final.



Figura 34. Salida de las prensas e inicio del control de calidad.

La Figura 35 muestra la zona en la que se realiza el control de calidad y se identifica los distintos elementos que participan en este proceso. Estos elementos son:

- Cintas transportadoras, que van trasladando el producto a lo largo del proceso de control de calidad hasta llegar al operario humano. Estas cintas, también poseen sensores al inicio y al final para detectar si hay producto o no en ellas (recuadro (1) en Figura 35).
- Cámaras detectoras de fisuras y pequeños defectos (recuadro (2) en Figura 35).
- Brazos robots encargados de coger los productos defectuosos y sacarlos de la línea de producción (recuadro (3) en Figura 35).
- Contenedores para los productos defectuosos (recuadro (4) en Figura 35).
- Operarios cuya tarea es poner los productos sin defectos en pallets (recuadro (5) en Figura 35).

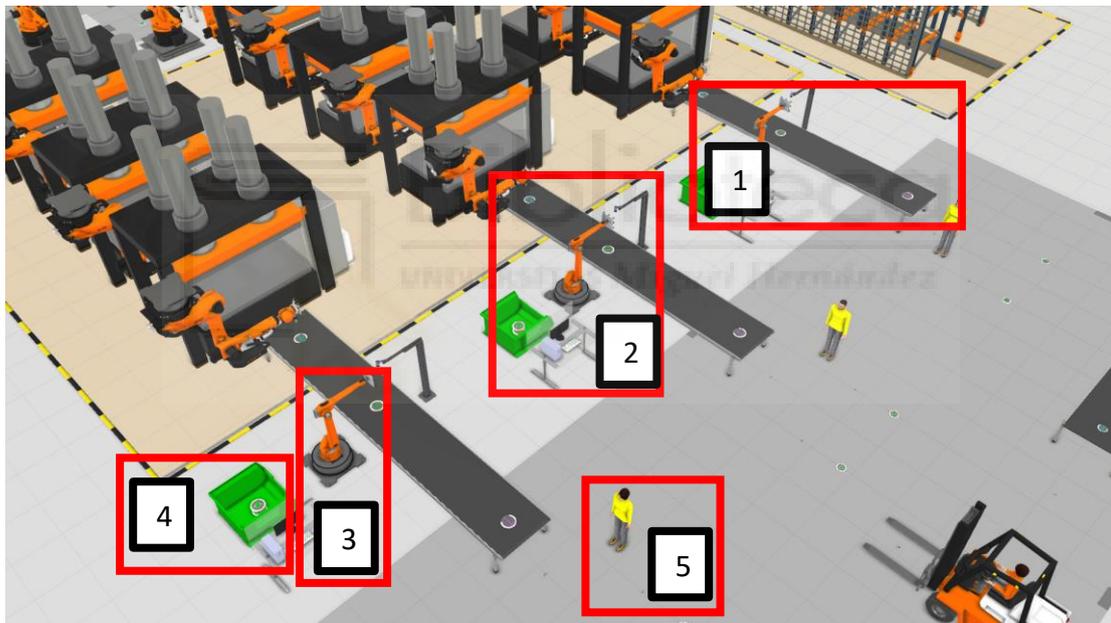


Figura 35. Vista general del proceso de control de calidad.

Continuando el flujo de trabajo a la salida de las prensas, cuando el último robot deposita el producto en las cintas este acaba llegando al nodo de control señalado en la Figura 36. Este nodo tiene un sensor para identificar que el producto ha llegado, parar el movimiento de la cinta y avisar a la cámara del control de calidad (Figura 37) para empezar a tomar imágenes del producto para su procesado, y así encontrar defectos si los tuviera. Una vez acabada la revisión, se envía una señal al brazo robot que tiene en frente para retirar el producto si el resultado del control de calidad es negativo. En ese caso, el producto se desecha en el contenedor verde (Figura 38). Cuando el brazo levanta el producto de la cinta, el nodo detecta la no presencia del mismo y vuelve a activar el movimiento de la

cinta. En caso contrario, si el resultado de la revisión es favorable, se continúa con el proceso.

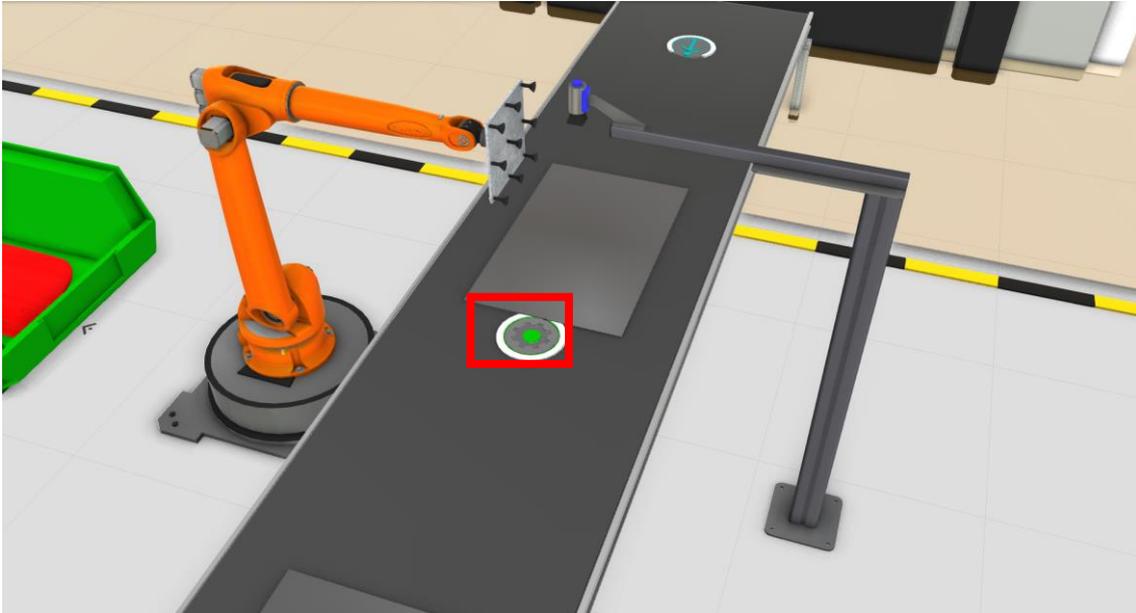


Figura 36. Nodo de control de calidad



Figura 37. Cámara detectora de fisuras y pequeños defectos.

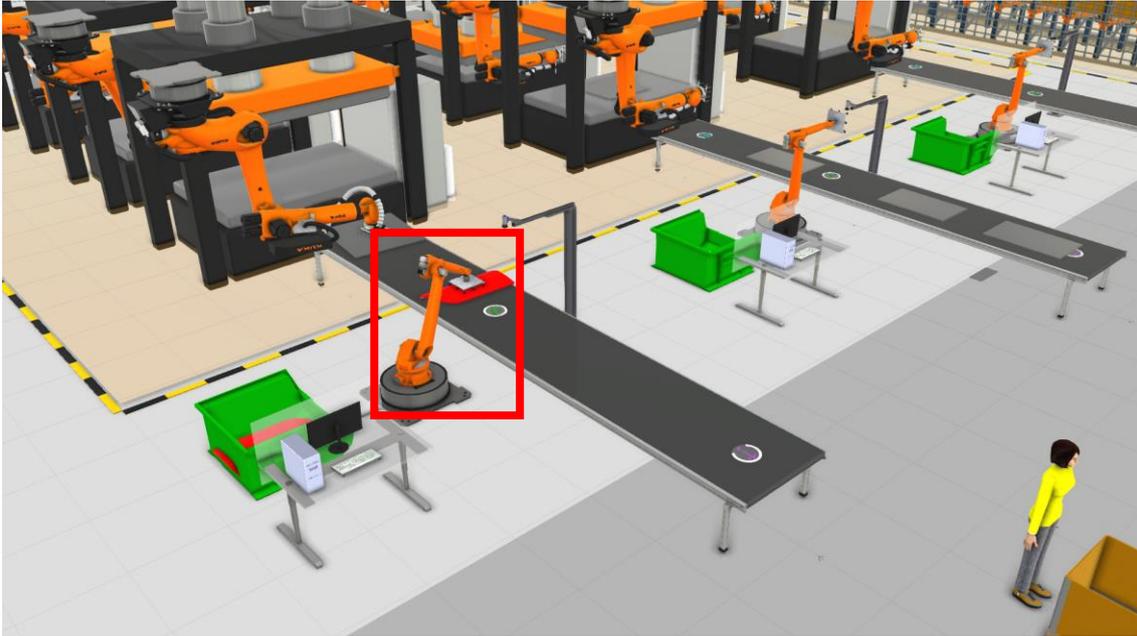


Figura 38. Una de las líneas desecha un producto por presentar defectos. El producto defectuoso es marcado es rojo.

Si el producto pasa de manera exitosa el control de calidad, continúa por la cinta hasta el final, donde un operario la retira y la deposita en un pallet tal y como se representa en la Figura 39 y Figura 40. Cuando el pallet esté lleno, la carretilla elevadora controlada por otro operario lo recogerá para llevarlo, ahora sí, a la celda final de la línea de producción: el almacén de salida con gestión autónoma (Figura 41).



Figura 39. Operario retira el producto de la cinta transportadora para paletizarlo.

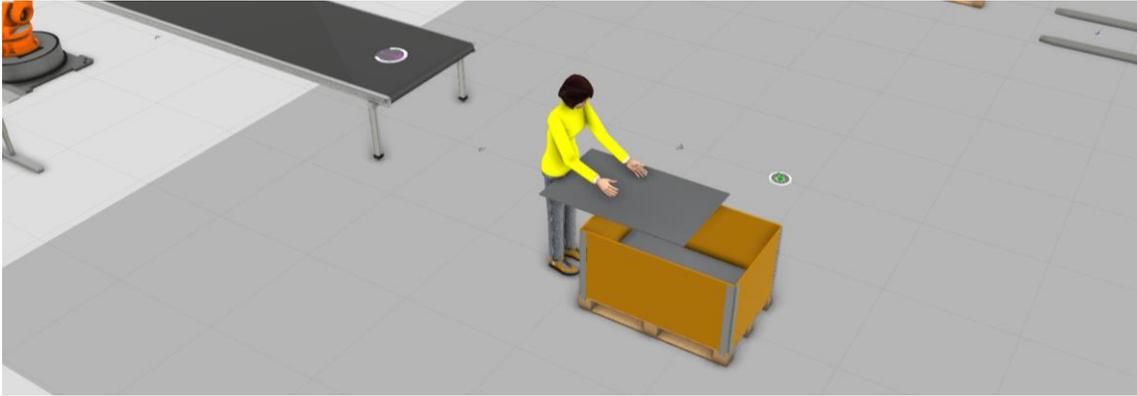


Figura 40. Operario depositando el producto en el pallet final.



Figura 41. Pallet llevado al almacén de salida.

4.3. Almacén de salida con gestión autónoma

Por último, y como ya se ha mencionado anteriormente, se encuentra el almacén de salida el producto final. La Figura 42 muestra una vista general del almacén de salida en la que se puede observar los diferentes elementos que lo integran. Estos elementos son:

- 2 estanterías en las que se deposita el producto finalizado. Cada estantería tiene unas dimensiones de 18,5 x 6,4 metros, las cuales cuentan cada una con 6 bahías (celdas individuales de almacenaje) de altura y 20 de largo, lo que le otorga una capacidad total para almacenar 240 pallets.
- Grúa que recoge el material de la estantería para situarlo en las cintas transportadoras.

- Cinta transportadora que dirige el material depositado por la carretilla elevadora hasta la grúa del almacén.
- Carretilla elevadora operada por un operador.
- Controlador de almacén local que conoce y gestiona en tiempo real la cantidad de producto almacenado y el espacio libre disponible.



Figura 42. Vista general del almacén de salida con gestión autónoma.

El flujo de trabajo en esta celda es el siguiente. El operario con la carretilla deposita los pallets con el producto finalizado en la cinta transportadora. Gracias a los sensores que incorpora al inicio de la cinta (Figura 43), ésta se activa cuando el producto se deposita sobre ella. de esta planta de fabricación finaliza aquí, en esta celda. A través de la cinta, el producto se dirige hacia la grúa del almacén para situarlos en la estantería.

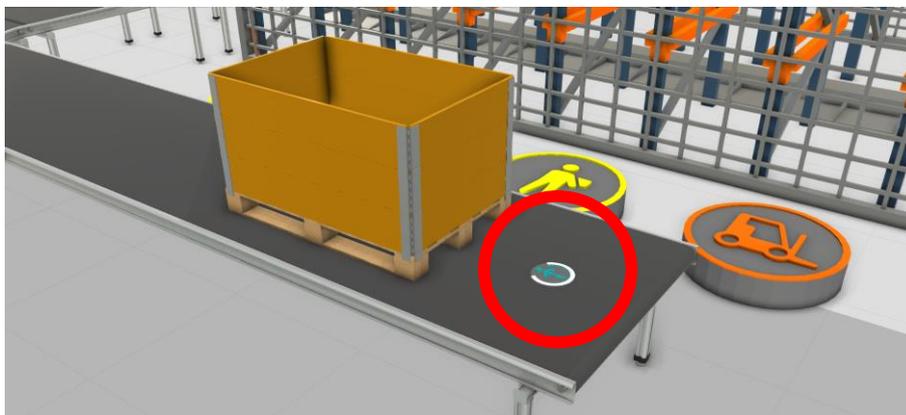


Figura 43. Sensor de la cinta transportadora.

4.4. Sistema de monitorización central

El sistema de monitorización central (mostrado en la Figura 44) es un servidor que recibe información sobre el funcionamiento y operación de los procesos que se llevan a cabo en las distintas celdas de la fábrica. Este se encuentra situado en una pequeña habitación, donde se encuentra un operario para supervisar y monitorizar los datos recibidos.

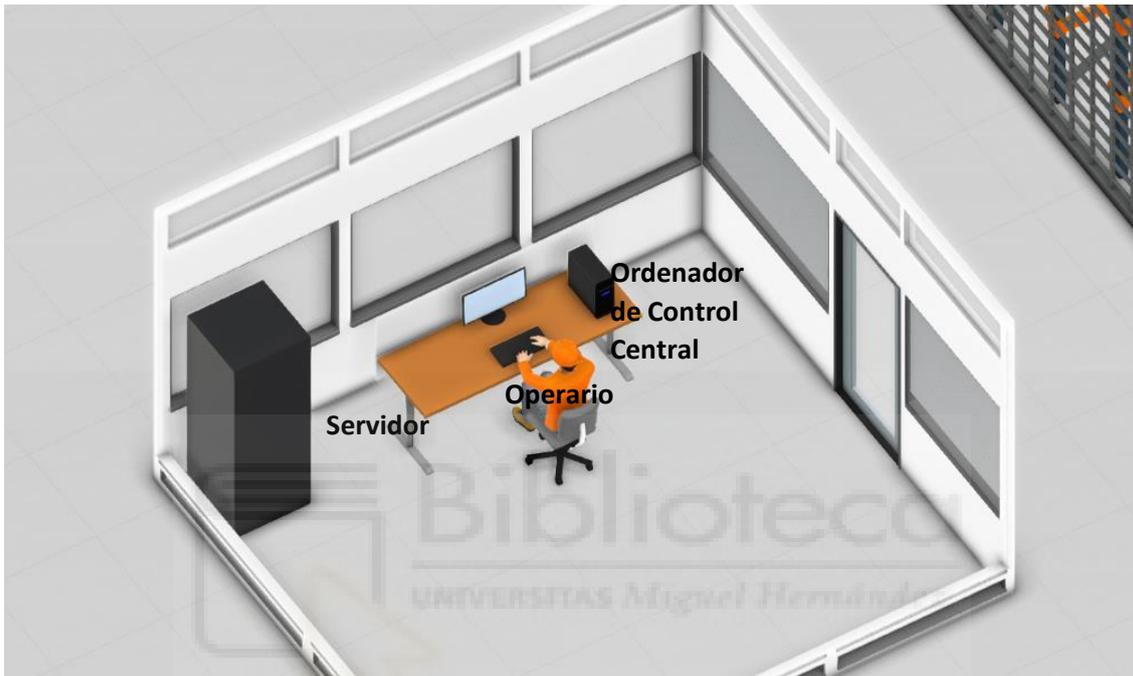


Figura 44. Sistema de monitorización central.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos atienden a los dos objetivos planteados en la sección 1.1.

5.1. Creación de *data sets*

Como se ha relatado anteriormente, para avanzar en la integración de la tecnología 5G y la IA y dar soporte a la transformación digital de la industria este trabajo se ha enmarcado en un proyecto de investigación financiado por la Diputación de Alicante. La disponibilidad del modelo digital de planta industrial permitirá generar valiosos *data sets* sobre la generación y transferencia de datos industriales en diferentes contextos y configuraciones de las plantas industriales.

El modelado digital del escenario permite simular el comportamiento real de una planta industrial y extraer información muy rica sobre su comportamiento real que puede ser analizada posteriormente para extraer conocimiento sobre su rendimiento y eficiencia e incluso en tiempo real aplicando técnicas de IA para prevenir posibles estados futuros (fallos en los procesos o maquinaria, defectos en la producción, etc.) y adaptar el sistema antes de que esto suceda. En este contexto, utilizando el modelo digital de la planta presentado en el apartado 4, junto con el módulo de comunicaciones inalámbricas (apartado 3.4) y el colector de datos (apartado 3.5), se han creado un conjunto de *data sets* con información que describe el comportamiento y funcionamiento de la planta modelada, y la generación e intercambio de datos entre elementos del escenario. En concreto, se ha registrado información sobre la posición de los distintos componentes que integran el escenario en cada momento, de los distintos estados en los que se encuentra cada componente (por ejemplo, activo o inactivo, fallo, sin batería, etc.), e información sobre los datos generados en cada componente y que son transmitidos de manera inalámbrica. Estos datos se guardan en tres ficheros diferentes del tipo .csv. A continuación, se describen los distintos ficheros .csv generados y la información registrada en cada uno de ellos.

5.1.1. Posición de los componentes

La flexibilidad y la capacidad de reconfiguración son requisitos clave de las plantas y líneas de producción en el marco de la Industria 4.0. Además, la integración de robots y maquinaria móvil, así como la interacción con operarios que se desplazan por la fábrica también será algo intrínseco de la Industria 4.0. Por tanto, es importante conocer la posición actualizada de los distintos componentes que integran el escenario. La información sobre la posición se registrará al comienzo de la simulación para todos los componentes.

Cuando un componente cambie de posición (componentes móviles) durante la simulación, se realizará el registro de su posición actualizada. El registro de la nueva posición se realizará cuando la distancia entre la posición actual y la anterior sea mayor a una distancia umbral establecida.

La información en el archivo .csv se guarda de la siguiente manera. La información relativa a cada componente en un instante de tiempo determinado (cada entrada en el fichero) se escribe en líneas diferentes. Para cada entrada, se guardan distintos datos que se presentan a continuación. La separación entre datos se realiza mediante “,”. En la primera fila del fichero se indica el nombre de cada campo registrado. En cada entrada del fichero se guarda la siguiente información:

- Índice del registro.
- *Component_Name*: identifica de manera única el componente en el escenario.
- *Timestamp*: Indica los segundos transcurridos desde el inicio de la simulación.
- *Position_X*: Posición en el eje X del componente. Se indica en milímetros utilizando 3 decimales. El origen del sistema de coordenadas se sitúa en el centro del escenario.
- *Position_Y*: Posición en el eje Y del componente. Se indica en milímetros utilizando 3 decimales.
- *Position_Z*: Posición en el eje Z del componente. Se indica en milímetros utilizando 3 decimales.
- *Orientation_X*: Orientación en el eje X del componente. Se indica en grados utilizando 3 decimales. La orientación 0.0 significa que el objeto se sitúa orientado en la misma posición que la posición global.
- *Orientation_Y*: Orientación en el eje Y del componente. Se indica en grados utilizando 3 decimales.
- *Orientation_Z*: Orientación en el eje Z del componente. Se indica en grados utilizando 3 decimales.

En la Figura 45 se muestra un extracto del fichero ‘*data_position.csv*’ obtenido para la planta modelada. Por ejemplo, en la línea 375 podemos leer que el componente *Mobile Robot Resource* en el instante de tiempo 201.0 segundos se sitúa en la posición (-20225.922, 2978.510, 0.0) mm y una orientación (0.0, 0.0, 90.0) grados. En la línea 377 se puede leer que este mismo componente en el instante 201.5 segundos se ha desplazado

hasta la posición (-20225.922, 2771.660, 0.0) mm manteniendo la orientación (0.0, 0.0, 90.0) grados.

```
373,Human (Otto),196.0,-21225.922,3000.000,0.000,-0.000,-0.000,-0.000
374,Human (Otto),201.0,-21225.922,3000.000,0.000,-0.000,-0.000,-76.591
375,Mobile Robot Resource,201.0,-20225.922,2978.510,0.000,0.000,-0.000,90.000
376,Human (Otto),201.5,-21369.528,2816.253,1.144,0.000,-0.000,-128.009
377,Mobile Robot Resource,201.5,-20225.922,2771.660,0.000,0.000,-0.000,90.000
378,Human (Otto),202.0,-21753.774,2324.601,4.205,0.000,-0.000,-128.009
379,Human (Otto),202.5,-22108.463,1870.768,7.031,0.000,-0.000,-128.009
380,Mobile Robot Resource,202.5,-20225.922,2564.810,0.000,0.000,-0.000,90.000
381,Human (Otto),203.0,-22463.708,1378.115,10.062,0.000,0.000,-128.009
```

Figura 45. Ejemplo del registro de información en el fichero *data_position.csv*.

5.1.2. Generación de datos en el escenario

En el fichero ‘data_communications.csv’ se ha registrado información sobre los datos generados en cada componente y que se transmitirán de forma inalámbrica. En particular, es de interés conocer la fuente y destino de la información, el instante temporal en el que se generan los datos y la cantidad de datos a transmitir. Si estuviera disponible esta información, también se registrará los requisitos de latencia (es decir, el tiempo máximo en el que los datos deben ser entregados en el destino) y de fiabilidad.

Con esta información, y relacionándola con la información de posición y distribución de los distintos componentes en el escenario, se obtiene información sobre la generación espacio-temporal de datos en el escenario. La información registrada es la siguiente:

- *Iteration*: Indica el número del registro que se realiza. Cada registro representa un proceso de comunicación.
- *Timestamp*: Tiempo transcurrido desde el inicio de la simulación en segundos.
- *Source*: Nombre del componente que genera y transmite los datos.
- *Destination*: Nombre del componente destino al que se dirigen los datos.
- *Message Id*: Es el identificador empleado para cada tipo de mensaje.
- *Communication Type*: Identifica si la comunicación es periódica (representado por ‘p’) o aperiódica (representado por ‘a’).
- *Period*: En caso de ser un mensaje periódico, indica la periodicidad en milisegundos. Si el mensaje es aperiódico, se indicará el valor ‘-1’.
- *Data Size*: Tamaño de los datos generados y que se enviarán en el mensaje.
- *Latency*: Tiempo máximo en el que los datos deben entregarse en el destino. Si la información de latencia requerida no está disponible, se registra el valor -1.

- *Reliability*: Indica la fiabilidad requerida en la transmisión de estos datos. En concreto se calcula como el porcentaje de mensajes entregados en el destino cumpliendo con la latencia requerida entre el total de mensajes enviados. Si la información sobre nivel de fiabilidad requerido no está disponible, se registra el valor -1.
- *Communication Technology*: Indica si la comunicación es inalámbrica (representado por 'wl') o cableada (representado por 'l').
- *Message Value*: Campo sin valor que ha sido dejado por si en un futuro se quisiera transmitir otra información, por el momento se mantendrá el valor -1.
- *AckRequired*: Indica si el mensaje transmitido requiere confirmación o no.

La Figura 46 muestra, a modo de ejemplo, un extracto del fichero 'data_communications.csv'. En este ejemplo se puede observar el registro de los distintos atributos explicados anteriormente.

```

1,0.0,Mobile Robot Resource #6,StorageController,TransportCompleted,a,-1,64,100,99.9,wl,-1,True
2,0.0,Mobile Robot Resource #5,StorageController,TransportCompleted,a,-1,64,100,99.9,wl,-1,True
3,0.0,Mobile Robot Resource #4,StorageController,TransportCompleted,a,-1,64,100,99.9,wl,-1,True
4,0.0,Mobile Robot Resource #3,StorageController,TransportCompleted,a,-1,64,100,99.9,wl,-1,True
5,0.0,Mobile Robot Resource #2,StorageController,TransportCompleted,a,-1,64,100,99.9,wl,-1,True
6,0.0,SC - AGV Controller,Mobile Robot Resource #2,ACK,a,-1,64,100,99.9,wl,-1,False
7,0.0,Sink Process,StorageController,MaterialRequest,a,-1,64,100,99.9,wl,-1,True
8,0.0,StorageController,Sink Process,ACK,a,-1,64,100,99.9,wl,-1,False
9,0.0,Mobile Robot Resource #6,StorageController,AGVStatusReport,p,250,250,100,99.9,wl,-1,False
10,0.0,Mobile Robot Resource #5,StorageController,AGVStatusReport,p,250,250,100,99.9,wl,-1,False
11,0.0,Mobile Robot Resource #4,StorageController,AGVStatusReport,p,250,250,100,99.9,wl,-1,False
12,0.0,Mobile Robot Resource #3,StorageController,AGVStatusReport,p,250,250,100,99.9,wl,-1,False
13,0.0,Mobile Robot Resource #2,StorageController,AGVStatusReport,p,250,250,100,99.9,wl,-1,False
14,0.0,SC - Crane Controller,GlobalMonitorSystem,StorageStatistics,p,60000,64,500,99.0,wl,-1,True
15,0.0,GlobalMonitorSystem,SC - Crane Controller,ACK,a,-1,64,500,99.9,wl,-1,False
16,0.0,SC - AGV Controller,GlobalMonitorSystem,TransportStatistics,p,60000,64,500,99.0,wl,-1,True
17,0.0,GlobalMonitorSystem,SC - AGV Controller,ACK,a,-1,64,500,99.9,wl,-1,False
18,0.0,Workpiece Shelf,StorageController,TransportMaterial,a,-1,64,100,99.9,wl,-1,True

```

Figura 46. Ejemplo del registro de información en el fichero *data_communications.csv*.

5.2. Análisis de rendimiento de la planta implementada

En esta sección se resuelve el segundo objetivo planteado, en el que se ha analizado el rendimiento y eficiencia del escenario modelado y descrito en el apartado 4. Con este análisis, se muestra el potencial de este tipo de modelos digitales para planificar el despliegue de una planta industrial y la necesidades y planteamiento de los procesos productivos para alcanzar determinados objetivos de producción.

A continuación, se presentan una serie de resultados que miden el rendimiento y eficiencia de la planta modelada. Al tratarse de una simulación virtual con gráficos en 3D, el

software permite hacerlo con distintas opciones (ver Figura 47) de detalle gráfico y tiempo total. Además, se puede generar un archivo de vídeo o PDF (con vídeo incrustado) del transcurso de la simulación.

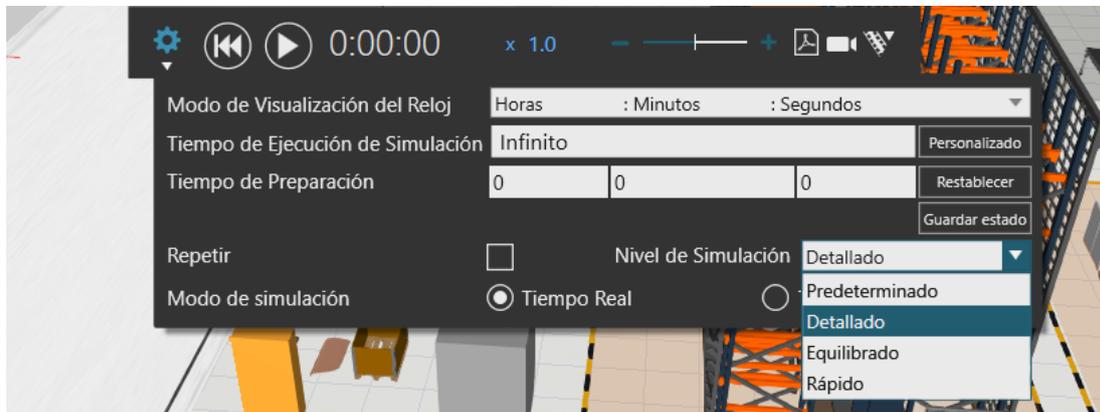


Figura 47. Ajustes de la simulación.

Visual Components ofrece gran variedad de estadísticas con información sobre el funcionamiento y rendimiento de la planta, datos que se pueden representar mediante distintos tipos de gráficos: gráficos de líneas, áreas, barras o circulares. Además, como se ha especificado en el apartado 3, cuando se requiera un análisis más profundo, los datos de simulación se pueden exportar fácilmente en formatos de datos PDF o Microsoft Excel. Los datos que permite extraer son de carácter diverso y la elección de los parámetros de rendimiento a monitorizar y su representación debe configurarse de manera previa al inicio de la simulación.

Nuestro interés se centra en el análisis del uso de los AGVs incluidos en el escenario para el transporte de material y productos, el número de salidas (cintas transportadoras) que requiere el almacén inicial y el número de operarios requeridos para paletizar el producto moldeado con la finalidad de ver cómo afectan estas variables a la producción total. Para ello, se han realizado simulaciones de 25 minutos y, 45 en los casos donde se analiza la parte final de producción. En primer lugar, para analizar cómo afecta la disponibilidad de AGVs en la producción y por tanto, el número de AGVs que se necesitan para obtener la máxima eficiencia del sistema (subsección 5.2.1) se han evaluado 3 configuraciones diferentes:

1. Supuesto inicial con 2 cintas y 2 AGVs.

2. Se añade un AGV a la configuración original para cerciorarnos
3. Se prueba a eliminar una de las cintas que dan soporte al almacén inicial para comprobar si es determinante o no.

En segundo lugar, se ha analizado cómo afecta la disponibilidad de operarios humanos en la planta a la recepción de pallets por parte del almacén final (subsección 5.2.2). En este caso se analiza si un operario por línea (3 en total) es suficiente para cubrir las necesidades o 2 pueden suplir la carencia de un tercero.

5.2.1. Análisis de AGVs necesarios en la planta

Configuración 1: 2 cintas y 2 AGV

La configuración inicial la conforman 2 salidas del almacén inicial mediante cintas transportadoras y 2 AGVs . En la Figura 48 se mide la distancia recorrida por los AGVs durante los 25 minutos de la simulación. Se observa que contar con 2 AGVs no supone una cantidad excesiva de dispositivos que provoque inoperatividad entre ellos. Es decir, prácticamente están siempre en continuo movimiento. Aquí surge la duda de si un tercer AGV sería beneficio o desembocaría en tener dispositivos inoperativos por no ser requeridos.

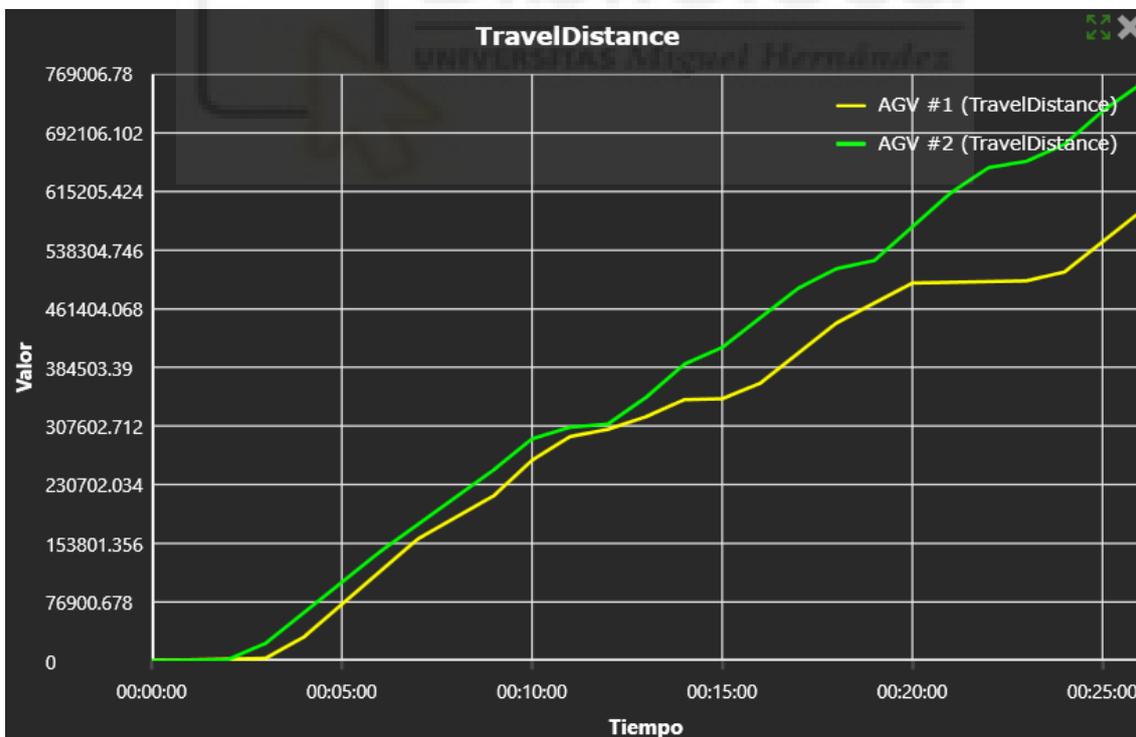


Figura 48. Caso 2: Distancia recorrido por los AGVs

En cuanto a la capacidad de la batería (ver Figura 49) observamos que la batería desciende un 8% aproximadamente. Este dato es relevante porque si la fábrica operase más tiempo

del que se tiene en cuenta en este análisis sería recomendable tener AGVs suficientes para cubrir a los descargados. Aquí solo se valora el tiempo de simulación de 25 minutos

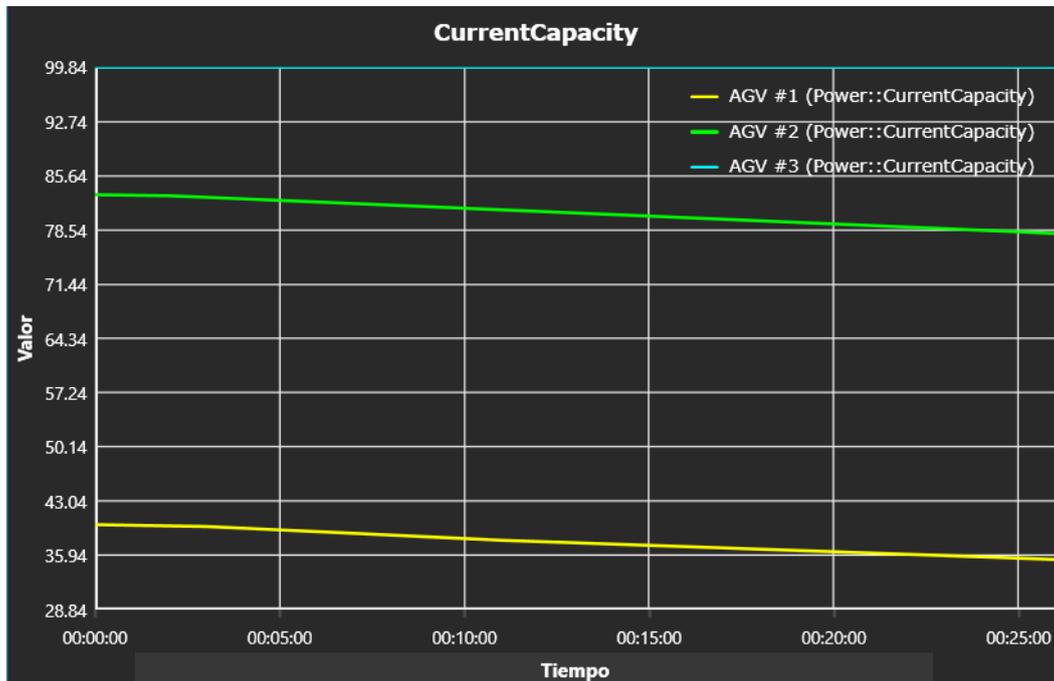


Figura 49. Caso 2: Capacidad batería AGVs.

La actividad de las prensas se mantiene operativa la totalidad del tiempo sin parones (ver Figura 50). Y la Figura 51 muestra que la producción total, dato que será relevante para compararlo con el resto de los casos.



Figura 50. Caso 2: Actividad de las prensas.

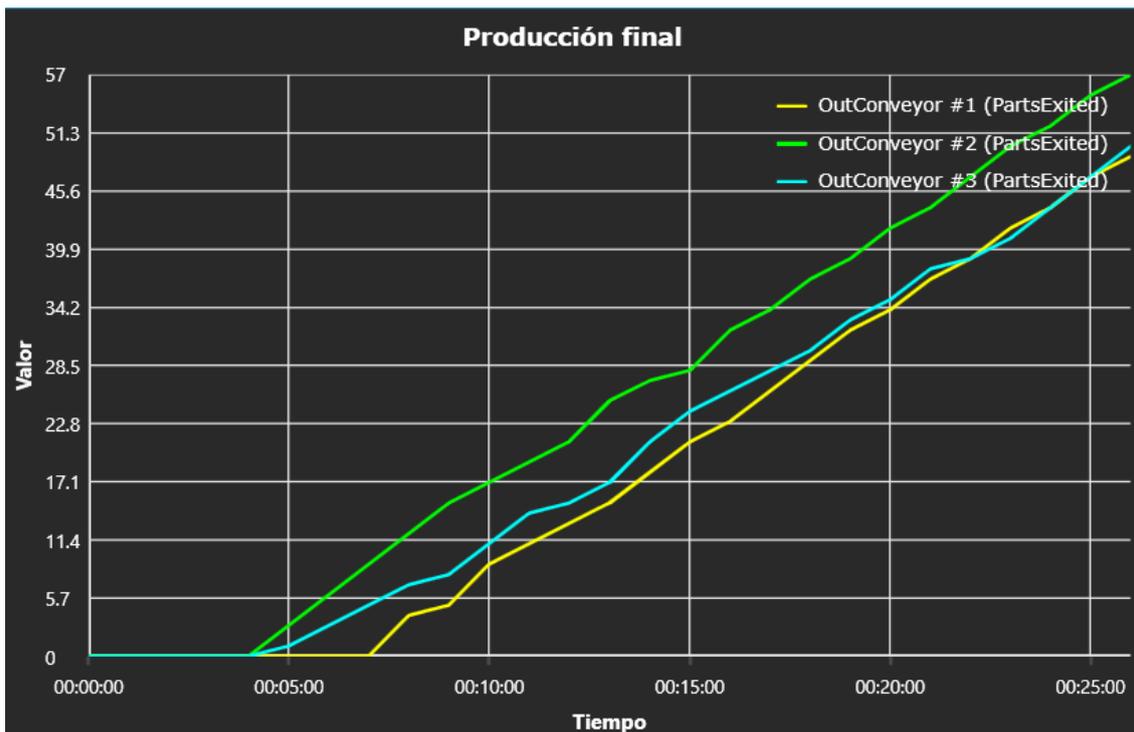


Figura 51. Caso 2: Producción final.

Configuración 2: 2 cintas y 3 AGV

En la segunda configuración añadimos un AGV, siendo 3 en total, para estudiar de qué manera afecta a la producción total y responder a la duda surgida anteriormente. En la Figura 52 se observa que, el AGV #2, a partir del minuto 10 deja de operar al ser suficiente la actividad de los otros 2 AGVs. Esto ocurre porque solo opera para poner en funcionamiento por primera vez a una de las líneas, después, se queda en su puesto de carga al no requerirse un tercer AGV lo que resta de simulación.

Esto ya nos indica que probablemente la producción final no se vea alterada demasiado si prescindimos de él. Aun así, es interesante conocer el nivel de batería durante esos 25 minutos para valorar si es pertinente tener un tercer AGV para suplir a alguno de los anteriores cuando se agota su batería.



Figura 52. Caso 1: Distancia recorrida por los AGVs.

En la Figura 53 constatamos que los niveles de batería caen un 3% aproximadamente en 25 minutos de simulación. Si la actividad de la fábrica fuera de 24 horas sí sería oportuno mantener AGVs aunque no estuvieran operativos para poder cubrir posteriormente a AGVs sin carga.

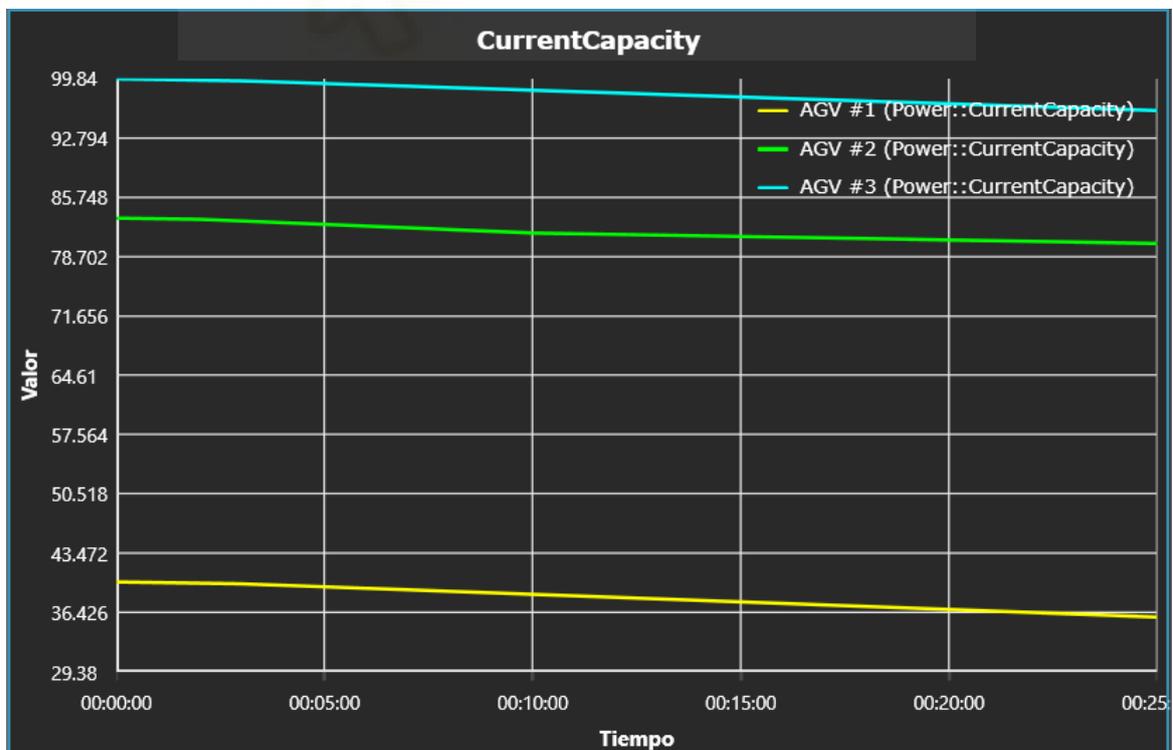


Figura 53. Caso 1: Capacidad batería AGVs.

La Figura 54 muestra la actividad de las primeras prensas de cada línea. Esto se mide obteniendo el número de producto que sale de cada una de las prensas en un determinado tiempo. Durante toda la simulación las prensas presentan ritmos constantes de producción sin que haya ninguna parada. De esta forma comprobamos que utilizar 2 cintas y 3 AGVs proporcionan un funcionamiento estable en la fábrica.



Figura 54. Caso 1: Actividad de las prensas.

La Figura 55 expone la producción total a la que se llega en 25 minutos de simulación por cada línea de prensado.

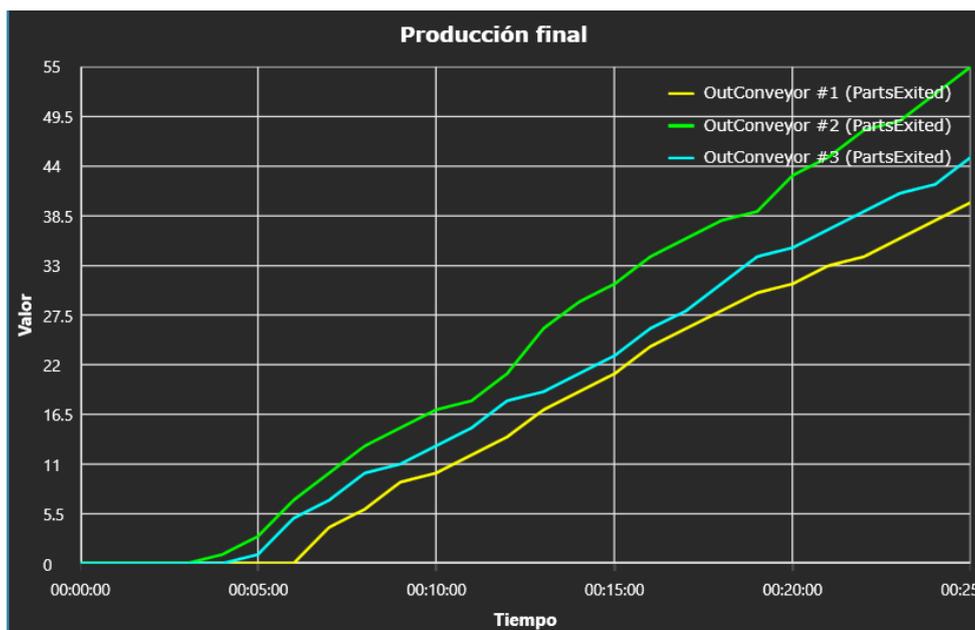


Figura 55. Caso 1: Producción final.

Configuración 3: 1 cintas y 2 AGV

Cunado cerramos una de las cintas que asisten al almacén inicial, quedando operativa solo una y siendo dos el número de AGVs, cabe la duda de si será suficiente para abastecer a las prensas y mantenerlas operativas continuamente o generará cuellos de botella. Tal y como se observa en la Figura 56, el AGV #2 sufre una inactividad de 4 minutos durante la simulación desde el minuto 8 al 12 aproximadamente. Esto podría afectar al ritmo de producción provocando que alguna de las prensas dejara de funcionar durante unos minutos. La Figura 57 expone que, igual que en el caso 1, la batería solo desciende un 3% aproximadamente.



Figura 56. Caso 3: Distancia recorrido por los AGVs

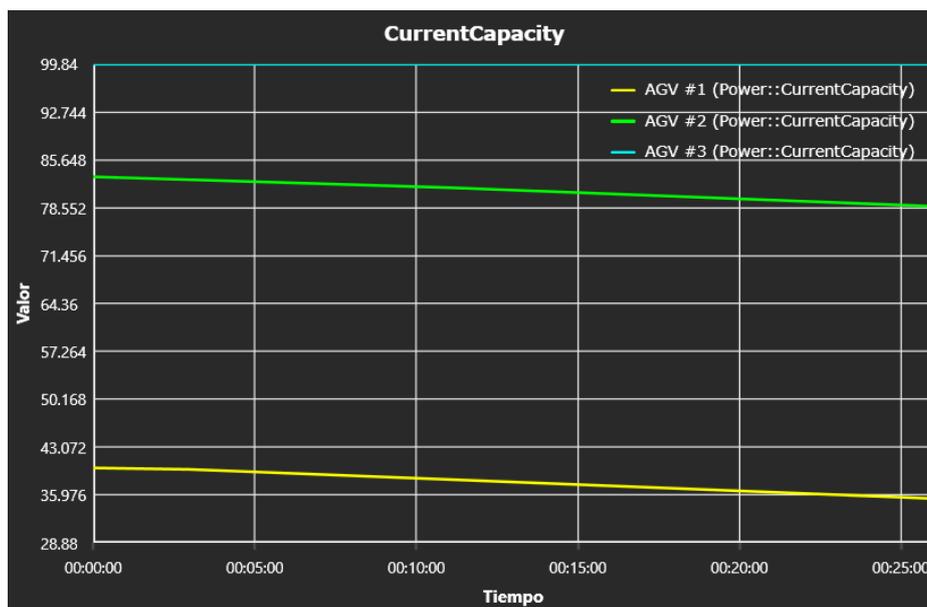


Figura 57. Caso 3: Capacidad batería AGVs.

La parada de actividad que muestra la Prensa #3 en la Figura 58 puede ser explicada por la inactividad de uno de los AGV que se ha comentado anteriormente. Esto ha ocurrido porque la línea #3 de prensado se ha quedado sin material, y, por lo tanto, sin producir. Aquí se concluye que eliminar una de las cintas no es mejor opción.



Figura 58. Caso 3: Actividad de las prensas.

La producción total (ver Figura 59) refleja un sustancial descenso en comparación a los anteriores casos por la comentada parada que ha sufrido la línea de prensado #2.

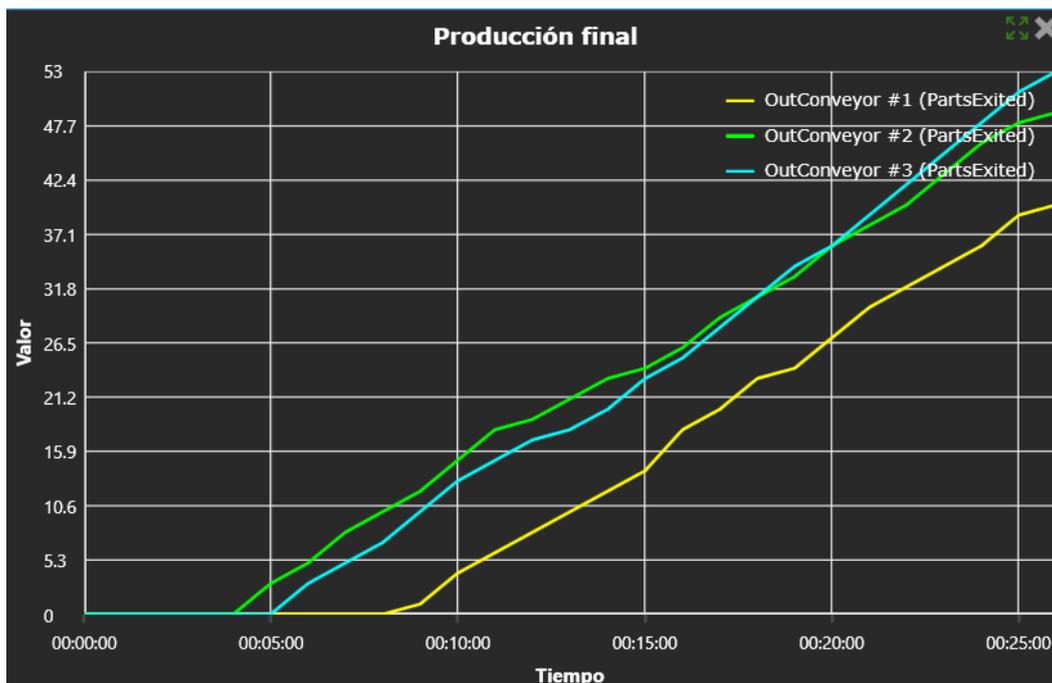


Figura 59. Caso 3: Producción final.

De los tres casos analizados, y para una simulación de producción de 25 minutos, el más favorable por uso de recursos y efectividad en su uso es el caso 1. Un aumento del número de AGVs supondría dispositivos inoperativos. En cuanto a las salidas del almacén inicial, se constata que eliminar una de ella es contradictorio provocando que la línea de prensado #3 pare durante unos minutos por falta de material.

5.2.2. Análisis de operarios humanos necesario en la planta

Ahora se exponen los dos casos partiendo del más favorable (el 1) en los que la variable del operario humano será analizada. Se quiere comprobar si el almacenamiento final se ve afectado por el número de operarios que asisten a las 3 líneas de prensado. En ambas simulaciones se elige un tiempo de 45 minutos por la demora del producto hasta llegar a esta parte de la producción.

Configuración 1a: 3 operarios

En este caso se ha tenido en cuenta que cada línea de producción tiene un operario humano asignado al final de proceso de calidad, esperando el producto para paletizarlo. En total son 3 operarios. La Figura 60 mide la distancia recorrida por operario para comprobar que, efectivamente, las curvas presentan pendientes similares, y no hay cargas de trabajo desiguales ni periodos de inactividad prolongados.

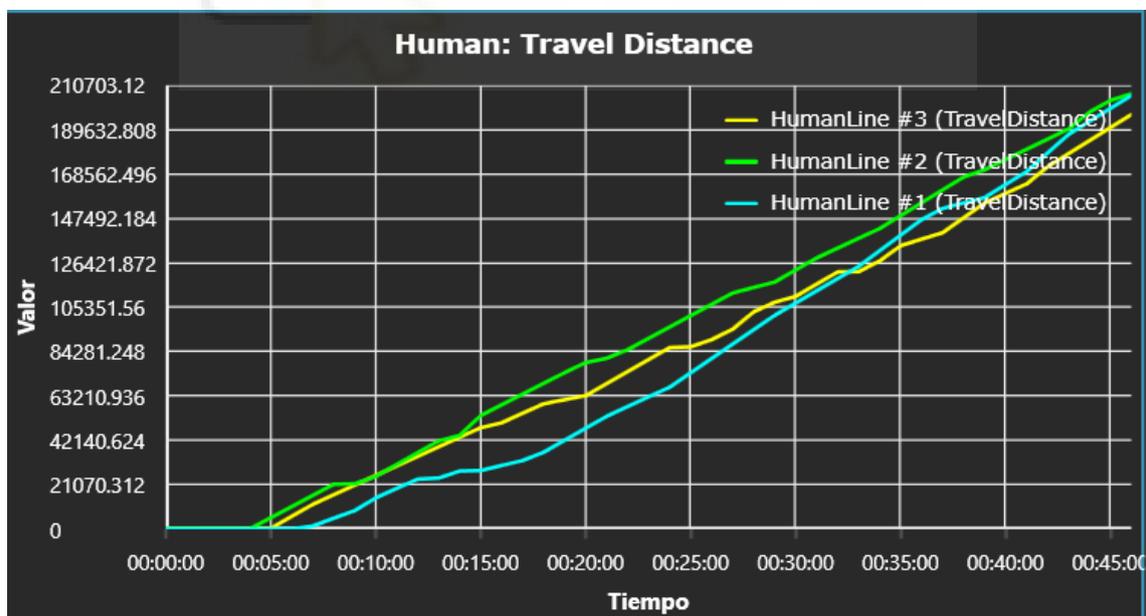


Figura 60. Caso 1a: Distancia recorrida operarios humanos.

Haciendo uso de 3 operarios durante 45 minutos de simulación el almacén final logra llenarse con 15 pallets (ver Figura 61).



Figura 61. Producto depositado en almacén final.

Configuración 1b: 2 operarios

En este caso prescindimos del operario de la línea central, para comprobar si los operarios de las líneas adyacentes pueden cubrir esa falta. Esta falta se acaba sufriendo con la alternancia de los operarios para asistir a la línea central. Por eso, la Figura 62 muestra esas oscilaciones representando la alternancia entre una carga de trabajo mayor y otra menor para ambos operarios, habiéndose medido la distancia recorrida por operario en cada momento.

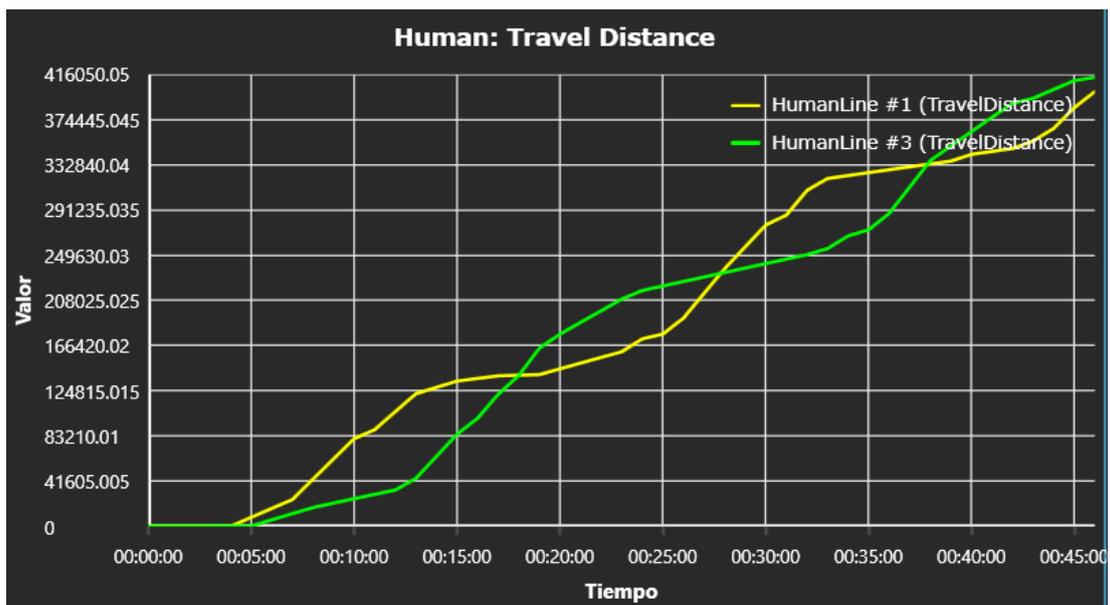


Figura 62. Caso 1b: Distancia recorrida operarios humanos.

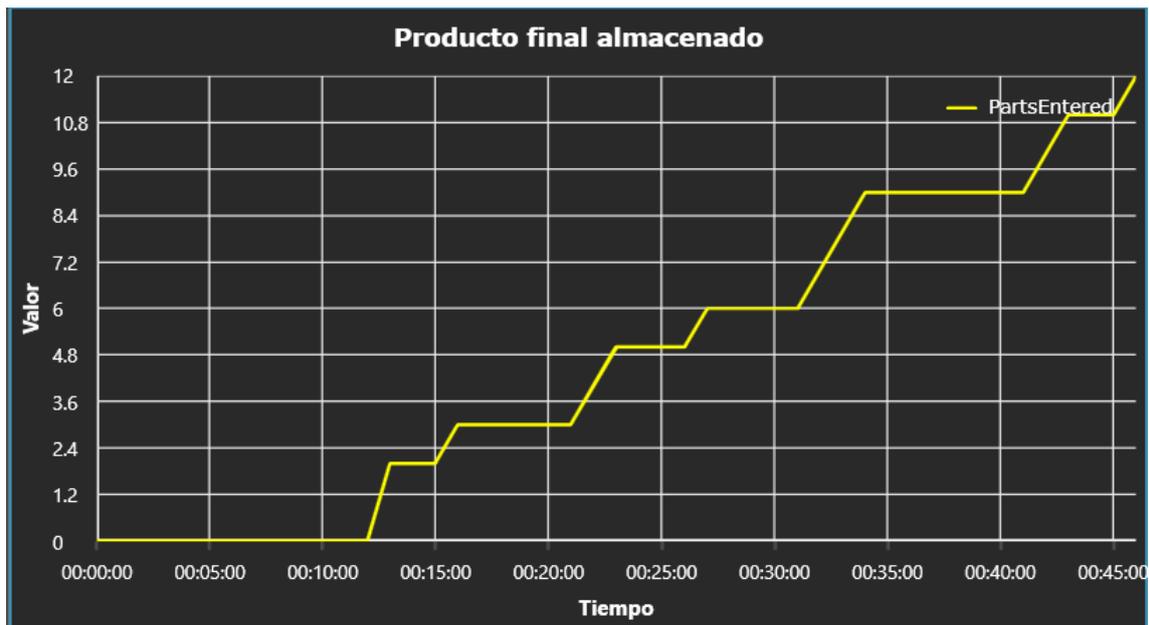


Figura 63. Producto depositado en almacén final.

Como vemos, aunque 2 operarios pueden ocuparse de la línea central, tras 25 minutos se comprueba que el almacén presenta una reducción de 3 pallets en comparación al caso 2a (ver Figura 63).

Por lo tanto, se concluye que el uso de 2 cintas transportadoras en el almacén inicial, 2 AGVs y 3 operarios humanos presentan datos más favorables que el resto de las alternativas en términos de eficiencia. Pues haciendo un mejor uso de los recursos se produce la mayor cantidad de pallets.

La exposición de los datos de esta simulación constata las oportunidades de análisis que conlleva el uso de herramientas de simulación de plantas industriales. De esta manera, en una hipotética puesta en marcha, sabríamos previamente que recursos usar y como configurar la planta industrial de manera que se minimicen los costes y pérdidas posteriores a la puesta en marcha real. Podremos calcular el número óptimo de robots móviles, el ritmo de salida del material de los almacenes, los operarios necesarios para asistir a los dispositivos y máquinas industriales. Pero el potencial no solo reside en una puesta en marcha perfecta, sino que es una oportunidad para practicar y entrenar a los trabajadores frente a posibles fallos de producción.

6. CONCLUSIONES

En este trabajo final de grado se ha desarrollado el modelado digital de una planta de moldeado de puertas de automóvil. Tal y como se ha presentado en el apartado 4, la planta industrial seleccionada en este trabajo presenta un alto grado de automatización y digitalización, representando por tanto un escenario con aplicaciones típicas de la Industria 4.0. En concreto, la planta seleccionada incluye robots móviles y AGVs para el transporte de material entre distintas zonas de la planta y operarios humanos, reflejando así, un entorno hombre-máquina. Estos AGVs trazan el camino a seguir y responden a peticiones de material de las distintas líneas de producción de manera autónoma. En la planta se han implementado 3 líneas de prensado en las que se incluyen brazos robóticos que insertan y recogen el material en las distintas prensas. Los distintos brazos robóticos y las prensas trabajan de manera coordinada. Para ello, mantienen una comunicación continua entre sí (prensas, brazos robóticos) e inalámbrica para informar continuamente sobre su posición y estado actual, entre otra información. Además, se simula un proceso de calidad en el cual, las puertas moldeadas son puestas en revisión por una cámara, en búsqueda de imperfecciones en el material, que hagan que el producto no sea válido. Una vez superado el proceso de calidad los operarios humanos trabajan en coordinación con las cintas transportadoras para dar salida al producto.

El modelado de esta planta se ha realizado utilizando el software de modelado 3D industrial Visual Components. Este software ofrece diversas herramientas para el modelado de entornos industriales. Por ejemplo, incluye un amplio catálogo de componentes, comportamientos y herramientas de simulación que permite montar un escenario de manera muy ágil. Sin embargo, cuando se requiere modificar comportamientos de los distintos componentes es necesario profundizar en los scripts de Python. Además, no solo la modificación de los propios componentes tiene una dificultad añadida, si no que la creación de flujos más complejos, como flujos paralelos, requieren un gran trabajo y esfuerzo ir un mayor nivel de formación en el uso de la herramienta, tal y como ha sido el caso en este trabajo fin de grado

Este trabajo ha demostrado la utilidad y potencial de disponer de este tipo de escenarios digitales para lograr la transformación digital de la industria. En primer lugar, la disponibilidad del modelo digital de planta industrial nos ha permitido generar valiosos *data sets* sobre el funcionamiento real de la planta, así como de la generación y transferencia de datos industriales en diferentes contextos y configuraciones de las plantas industriales.

Estos *data sets* pueden ser analizados posteriormente para extraer conocimiento sobre su rendimiento y basar la gestión de la planta y los procesos industriales, e incluso de las redes de comunicaciones que soportan el escenario en este conocimiento. Este análisis de los datos puede incluso realizarse en tiempo real, como en el gemelo digital, aplicando técnicas de IA para prevenir posibles estados futuros (fallos en los procesos o maquinaria, defectos en la producción, etc.) y adaptar el sistema antes de que esto suceda. Es importante resaltar que actualmente no se dispone de este tipo de *data sets* debido principalmente al carácter confidencial del diseño y configuración de sistemas de producción en plantas industriales reales. La obtención de los *data sets* obtenidos gracias la labor realizada en este trabajo fin de grado tiene por tanto un alto valor, principalmente para el diseño y aplicación de técnicas de inteligencia artificial para la gestión de este tipo de escenarios.

Por otro lado, este trabajo fin de grado también ha mostrado el potencial que ofrece disponer de estos modelos digitales en el proceso de puesta en marcha y optimización de las plantas industriales. La construcción de una planta industrial se caracteriza por la complejidad de los sistemas que lo integran y el correcto funcionamiento posterior. Hasta que los softwares de modelado industrial y las computadoras no han dado un salto tecnológico, el diseño y puesta en marcha de una planta industrial se ha hecho de la forma tradicional con las desventajas que conlleva. Una puesta en marcha virtual puede suponer ahorros significativos en costes por errores posteriores derivados de un mal diseño.

Disponer de este tipo de modelos digitales de planta también será vital para la implementación de gemelos digitales, que al contrario que la puesta en marcha virtual es una herramienta que demuestra todo su potencial cuando la planta ya está funcionando. Se podrá monitorizar todo proceso y máquina de forma digital a la vez que se generan *data sets*. Esto supone una mejora continua en la producción, de forma que se posible predecir fallos en los dispositivos y maquinaria industrial. Así se minimizarán todas las pérdidas por los posibles parones que sufran las líneas de producción.

Bibliografía

- [1] Ministerio de Industria, Comercio y Turismo, “La transformación digital de la industria española”, 2021.
- [2] A. Villalonga Jaén, F. Castaño Romero, R. Haber Guerra, G. Beruvides López y J. Arenas, “El control de sistemas ciberfísicos industriales. Revisión y primera aproximación”, *Actas de las XXXIX Jornadas de Automática*, Badajoz, 2018.
- [3] The National Science Foundation, “Cyber-Physical Systems (CPS)”, [En línea]. Available: <https://www.nsf.gov/pubs/2021/nsf21551/nsf21551.htm>. [Último acceso: 3 Diciembre 2021].
- [4] “Industria Conectada 4.0”, [En línea]. Available: <https://www.industriaconectada40.gob.es/Paginas/index.aspx>.
- [5] European Commission, “The European Green Deal”, Bruselas, 2019.
- [6] Industry4.E Lighthouse, “Industry 4.0 Whitepaper”, 2021.
- [7] BBVA, “¿Qué es un gemelo digital y para qué sirve?”, [En línea]. Available: <https://www.bbva.com/es/que-es-un-gemelo-digital-y-para-que-sirve/>.
- [8] Visual Components, “Visual Components”, [En línea]. Available: <https://www.visualcomponents.com/>.
- [9] 5G-ACIA, “Key 5G Use Cases and Requirements from the Viewpoint of Operational Technology Providers”, Frankfurt, 2020.
- [10] S. Castellanos, “Digital Twins Concept Gains Traction Among Enterprises”, *The Wall Street Journal*, 12 Septiembre 2018.
- [11] E. Fuenmayor, M. Singh, E. P. Hinchy, Y. Qiao y D. Devine, “Digital Twin: Origin to Future”, *Applied System Innovation*, 2021.

- [12] W. Bellamy III, “Aviation Today”, [En línea]. Available:
<https://www.aviationtoday.com/2018/09/14/boeing-ceo-talks-digital-twin-era-aviation/>.
- [13] D. Muilenburg, “The Boeing Company (BA) Morgan Stanley Laguna Brokers Conference,» *Morgan Stanley Laguna Conference*, Dana Point, 2012.
- [14] A. Fuller, Z. Fan, C. Day y C. Barlow, «Digital Twin: Enabling Technologies,» *IEEE*, 2020.
- [15] J. Wu, Y. Yonghui y H. Zuo, «The Development of Digital Twin Technology Review,» *2020 Chinese Automation Congress (CAC)*, 2020.
- [16] S. Doolani, C. Wessels, V. Kanal y C. Sevastopoulos, «A Review of Extended Reality (XR) Technologies for Manufacturing Training,» *Technologies*, vol. 8, n° 4, p. 77, 2020.
- [17] Samsung Research, «6G The Next Hyper-Connected Experience for All,» 2020.
- [18] V. Paelke, «Augmented reality in the smart factory: Supporting workers in an industry 4.0. environment,» *Proceedings of the 2014 IEEE Emerging Technology and Factory Automation (ETFA)*, Barcelona, 2014.
- [19] Siemens, «Tecnomatix,» [En línea]. Available:
<https://www.plm.automation.siemens.com/global/es/products/tecnomatix/>.
- [20] FlexSim Software Products, Inc, «FlexSim,» [En línea]. Available:
<https://www.flexsim.com/es/>.
- [21] Visual Components, «Visual Components Courses,» [En línea]. Available:
<https://academy.visualcomponents.com/courses>.