



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Definición, caracterización e implementación de un gemelo digital aplicado a procesos de fabricación.

Definition, characterization and implementation of a digital twin applied to manufacturing processes.

Autor/es

Adama Keita Keita

Director/es

María Pilar Lambán Castillo
Paula Morella Avinzano

Titulación del autor

Grado en Ingeniería Mecánica

Escuela de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de Zaragoza
Año 2023



Universidad
Zaragoza



Escuela de
Ingeniería y Arquitectura
Universidad Zaragoza

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría dar las gracias en primer lugar a mi familia y mis amigos por apoyarme en todo momento tanto en lo personal como en lo educacional.

En segundo lugar, agradecer a mis dos tutoras Pilar Lambán y Paula Morella las cuales me dieron la oportunidad de realizar este trabajo fin de grado con ellas a su vez agradecer también su tiempo, dedicación y orientación prestadas en este proyecto.

Y por último agradecer a dos profesores L.R.R y M.J.G que supusieron un punto de inflexión de inflexión en mi desarrollo personal pudiendo llegar a ser lo que soy hoy.

RESUMEN

Este trabajo de fin de grado plantea la definición, caracterización e implementación de un gemelo digital aplicado a un proceso productivo para ellos se comenzará con una investigación para poder definir y clasificar el gemelo digital o digital twin así como crear unas pautas o directrices para poder definir una entidad virtual seguido de la identificación de las cualidades que debe de tener un programa para poder modelar a este y la selección del software con el que se va a trabajar en este proyecto. Continúa con un análisis de las entradas (inputs) y salidas (outputs) que son necesarios en el programa para poder realizar diferentes escenarios de investigación y obtener indicadores del entorno productivo modelado.

INDÍCE

RESUMEN.....	3
MEMORIA.....	5
INDÍCE	6
1. Introducción.....	7
1.1. Objetivos y alcance	7
2. Pilares de la investigación	9
2.1. Qué es el Digital Twin	13
2.2. Clasificación y definición del Digital Twin	14
2.3. Metodología para la definición de la entidad virtual	17
2.3.1. Programas de simulación (estudio programas TECNALIA)	18
3. Análisis de la herramienta FlexSim para la integración de datos en tiempo real en procesos con máquina-herramienta	20
3.1. Análisis INPUTS FlexSim	29
3.2. Relación INPUTS- Variables MHs.....	31
3.3. Relación OUTPUTS – KPI´s	32
4. Escenarios de investigación.....	35
4.1. Conceptualización de los escenarios.....	35
4.2. E1. HAAS.....	36
4.3. E2. HAAS + TORNO	42
4.4. E3. HAAS+ TORNO + AGV.....	44
5. COCLUSIONES	46
6. BIBLIOGRAFÍA	48



Universidad
Zaragoza



Escuela de
Ingeniería y Arquitectura
Universidad Zaragoza

MEMORIA

INDÍCE

MEMORIA.....	5
INDÍCE	6
1. Introducción.....	7
1.1. Objetivos y alcance	7
2. Pilares de la investigación	9
2.1. Qué es el Digital Twin	13
2.2. Clasificación y definición del Digital Twin	14
2.3. Metodología para la definición de la entidad virtual	17
2.3.1. Programas de simulación (estudio programas TECNALIA)	18
3. Análisis de la herramienta FlexSim para la integración de datos en tiempo real en procesos con máquina-herramienta	20
3.1. Análisis INPUTS FlexSim	29
3.2. Relación INPUTS- Variables MHs.....	31
3.3. Relación OUTPUTS – KPI´s	32
4. Escenarios de investigación.....	35
4.1. Conceptualización de los escenarios.....	35
4.2. E1. HAAS.....	36
4.3. E2. HAAS + TORNO	42
4.4. E3. HAAS+ TORNO + AGV.....	44
5. COCLUSIONES	46
6. BIBLIOGRAFÍA	48

1. Introducción

El presente trabajo de fin de grado se realiza con la finalidad de dar continuación a una investigación iniciada por la cátedra TECNALIA. Esta investigación divide el gemelo digital o digital twin en varios puntos: entidad física, entidad virtual, datos, conexión y servicios pero en este proyecto se llevara a cabo el punto de entidad virtual centrándose en la definición, estandarización e implementación de la metodología del gemelo digital o digital twin en los procesos productivos que se llevan a cabo en el laboratorio 4.0 que tiene la universidad de zaragoza en colaboración con la cátedra TECNALIA, ubicado en el departamento de Ingeniería de Diseño y Fabricación de la escuela de ingeniería y arquitectura.

1.1. Objetivos y alcance

Dado que el laboratorio 4.0 se encuentra bajo propiedad de la universidad de zaragoza y la cátedra TECNALIA durante la realización del proyecto se ha colaborado con este centro de investigación en todo momento con el objetivo de profundizar en la materia, estandarizar los pasos a seguir para poder definir no solo este gemelo digital sino todo gemelo digital aplicado a cualquier proceso productivo, determinar cuáles de los softwares bajo propiedad de la cátedra TECNALIA están capacitados para poder modelar un gemelo digital pudiendo definir correctamente las tres dimensiones que componen la entidad virtual (dimensión geométrica, dimensión física y dimensión de comportamiento) e identificar los distintos tipos de elementos que puede simular, identificar las diferentes variables de entrada (inputs) que son necesarios para caracterizar los elementos a modelar y las variables de salida (outputs) que devuelve el software, un análisis para poder ver si es posible integrar los datos que se toman de las máquinas sensorizadas del laboratorio 4.0 directamente en el software y por ultimo modelar y analizar dicho entorno productivo para poder llevar a cabo diferentes escenarios de estudio.

Para poder llevar a cabo todo esto el proyecto comienza con la revisión del estado del arte respecto al alcance de la investigación, para poder tener una idea general de toda la materia, y poder así, ir obteniendo conocimientos sobre el gemelo digital y la industria 4.0, este sigue con una investigación de bondades y capacidades de simulación de entornos de los diferentes softwares que tiene la cátedra TECNALIA, seguido de un estudio de parámetros y variables necesarios para caracterizar los diferentes recursos que se quieren modelizar así como un análisis de los outputs que devuelve el software, continua con integrar los datos que toman las máquinas sensorizadas en el software y finaliza con el planteamiento de los diferentes escenarios que se quieren simular con la herramienta de modelado 3D para su posterior análisis y obtención de conclusiones.

El laboratorio 4.0 cuenta con una máquina torno Pinacho y una fresadora HAAS ambas sensorizadas las cuales están tomando datos constantemente durante su funcionamiento y los almacenan en un ordenador industrial. Para poder modelar el entorno productivo mencionado anteriormente se utilizará la herramienta de modelado 3D FlexSim la cual nos ayudará a implementar el gemelo digital del laboratorio 4.0, así como simular las diferentes hipótesis y casos de estudio.

Las diferentes fases del trabajo son:

- Estudio y análisis de toda la información relacionada con la materia.
- Selección del software a utilizar.
- Introducción al manejo del software a utilizar; estudio de parámetros y variables necesarias.
- Análisis de las variables de salida que devuelve el software.
- Toma de datos de la máquina-herramienta a modelar.
- Modelado de la máquina-herramienta en el software.
- Análisis de resultados y conclusiones.

A continuación se comenta la estructura de la memoria, compuesta por un primer punto llamado pilares de la investigación donde se explica y clasifica el gemelo digital y se realiza un estudio de programas que puedan modelar este, seguido por un segundo punto llamado análisis de la herramienta FlexSim para la integración de datos en tiempo real donde se llevara a cabo un estudio de los inputs y outputs de este software así como la relación con las variables de la máquina herramienta y un último punto denominado escenario de investigación en el cual se llevaran a cabo diferentes simulaciones con las dos máquinas.

2. Pilares de la investigación

Antes de empezar a hablar del gemelo digital o digital twin se va a explicar que es la industria 4.0 debido a que el gemelo digital forma parte de la industria 4.0 y creo que es necesaria su explicación para la comprensión de este.

La industria 4.0 es conocida como la cuarta revolución industrial, y consiste en la interconexión de todos los subprocesos del entorno productivo de manera automatizada, informatizada e inteligente [1], para mantener todos los equipos conectados entre sí, pudiendo así tener la capacidad de optimizar tiempos y recursos e incluso tomar decisiones de manera autónoma, y esto se consigue combinando técnicas avanzadas de producción y operaciones con tecnologías inteligentes que se implementarán en las organizaciones, las personas, máquinas, y los activos.



Figura 1: Imagen de las cuatro revoluciones industriales.

Esta nueva revolución apuesta por la automatización y la digitalización de todos los procesos tanto los administrativos y los de gestión como los de producción este último será el que más impacto tenga sobre las empresas ya que si se consigue implementar de la manera adecuada supondrá grandes beneficios como la disminución de errores, la mejora de la calidad en las condiciones de los operarios porque dejarán de realizar las tareas más pesadas, repetitivas y peligrosas pudiendo así utilizar ese tiempo que empleaban en esas anteriores tareas en realizar otras operaciones con mayor valor añadido.

Los productos finales también verán aumentados su calidad debido a que al automatizar esas tareas y las pasen a realizar robots disminuimos el porcentaje de error que se puede llegar a cometer, también supondrá una disminución de coste ya sea en mano de obra, cantidad de material necesitado, obteniendo así unos niveles de producción más eficientes, rentables y rápidos.

Por tanto, los beneficios que se obtienen de la implementación de la industria 4.0 en una empresa se pueden resumir en:

- Optimización de procesos.
- Minimización de errores.
- Disminución de paradas de la producción.
- Ahorro de costes en personal.
- Aumento de la eficiencia en el uso de energía y materias primas.
- Mayor calidad del producto final.
- Producción más flexible, rápida y fluida.
- Mejora global de los procesos logísticos: organización del almacén, control del stock y del inventario.
- Aumento de la seguridad de los operarios durante la producción.
- Aumento de la rentabilidad y productividad de la empresa.



Figura 2: Beneficios de la implementación de la industria 4.0.

En definitiva, el objetivo es lograr una transformación del proceso productivo que permitan ganar en eficacia y rentabilidad, además de mejorar la calidad de los productos y de las condiciones de trabajo de los empleados [2].

Una forma de conseguir esto, es digitalizando el sistema de producción, es decir conseguir una hibridación entre el mundo físico y el mundo digital, haciendo que los equipos y maquinarias dispongan de sensores los cuales tomen datos constantemente para después almacenarlos, procesarlos e interpretarlos. Este flujo de información se puede realizar de diferentes maneras:

- **Del mundo físico al mundo digital.** Se captura la información del mundo físico y se crea un registro digital de la misma [3].
- **Del mundo digital al mundo digital.** En este caso, la información se obtiene del mundo digital y se comparte para servir como base de escenarios de investigación.
- **Del mundo digital al físico.** Se recopila información y resultados del mundo digital mediante la simulación, para poder introducir esos cambios en el mundo físico.

La industria 4.0 engloba varias tecnologías que se pueden implementar o utilizar juntas o por separado ya que son independientes una de las otras y son:



Figura 3: Técnicas que componen la industria 4.0.

Internet de las cosas (IOT)

Esta tecnología consiste en una única red global la cual sirve como un punto de conexión común tanto para las personas, maquinas, dispositivos e internet con el fin de poder facilitar el intercambio de los datos. Como su propio nombre indica es el internet de las cosas en el ámbito de los procesos industriales y es un punto fundamental de la industria 4.0.

Big Data

Como había comentado anteriormente una de las ideas principales de la industria 4.0 es la sonorización de las máquinas para su después toma de datos, pues la toma masiva de datos para su después manipulación y procesamiento mediante modelos matemáticos es conocida como big data. En ocasiones pueden llegar a incorporar técnicas de inteligencia artificial y ser autodidactas, es decir, aprender por sí mismos.

Automatización robótica de procesos (RPA)

La tecnología de automatización robótica de procesos consiste en la automatización de procesos informáticos o tareas mecánicas los cuales siempre son los mismos y conllevan una tarea repetitiva con el objetivo de liberar a los trabajadores pudiendo emplear ese tiempo en otras acciones que aporten mayor valor o de mayor complejidad.

Cloud Computing

Esta tecnología consiste en que los ordenadores simulen la toma de decisiones de un humano automáticamente sin la necesidad de que este controlada ni supervisada por este. Esto se consigue gracias a la tecnología cognitiva ya que permite que los sistemas aprendan solos, reconozcan patrones y sean independientes dentro de una cierta medida.

Ciberseguridad

La ciberseguridad es otra de las tecnologías importantes debido a que si es importante obtener los datos e información para su después procesamiento es igual de importante mantener toda esa información almacenada de una manera segura encargando así de esa tarea.

Realidad aumentada

Mediante softwares avanzados permiten ver una entidad física enriquecida con elementos virtuales, es decir crea una realidad mixta en tiempo real la cual el usuario puede interactuar con ella, recibir indicaciones o información de este. Esta tecnología se está empezando a utilizar en las empresas para realizar mantenimiento.

Fabricación aditiva o impresión 3D

La impresión 3D es una de las tecnologías más conocidas hoy en día y consiste en la impresión de entidades físicas a partir de modelos digitales 3D diseñados mediante software y que no requieren de ningún tipo de utillaje ni molde ni herramientas adicionales simplemente la impresora 3D y el material con el que se quiera realizar la impresión de la pieza.

Una vez explicados los conceptos de la industria 4.0 y las tecnologías que la componen se procederá a explicar que es el gemelo virtual o digital twin, su clasificación, la metodología que se utiliza para definirlo y un estudio de los programas de simulación.

2.1. Qué es el Digital Twin

En la actualidad, gracias a la tercera revolución industrial o revolución tecnológica la cual ha facilitado el acceso a la información y su transmisión alrededor del mundo de una manera instantánea y sencilla, da como resultado que se estén realizando avances tecnológicos constantemente. Estos avances permitieron que, en el año 2002 en la universidad de Michigan, Michael Grieves mencionara por primera vez el nombre de gemelo digital aplicado al entorno de la fabricación ya que el autor de este concepto es David Guelernter que lo menciona en su libro *Mirror Worlds* [4]. Un gemelo digital o digital twin es una representación digital de un objeto, proceso o servicio físico, es decir, réplicas virtuales utilizadas para hacer simulaciones, investigar problemas de rendimiento y crear mejoras para poder trasladarlas después al objeto físico en cuestión.

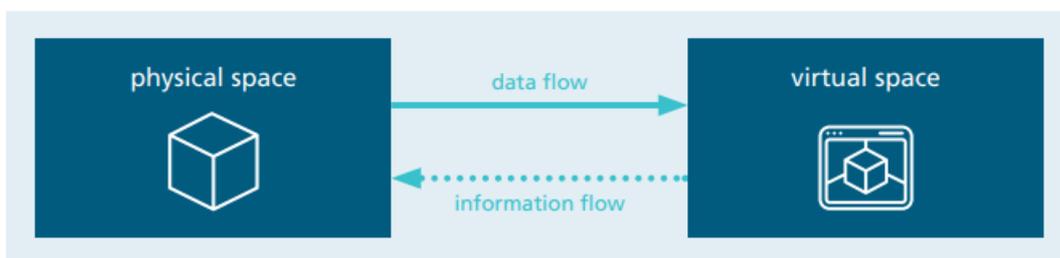


Figura 4: Funcionamiento del gemelo digital o digital twin.

Para que el gemelo digital sea lo más preciso posible, el objeto físico a replicar debe estar dotado de sensores encargados de recopilar datos constantemente sobre su estado en tiempo real y las condiciones de trabajo. Estos datos una vez procesados y analizados y servirán como entrada (inputs) para el modelo digital de dicho objeto físico.

Se hace hincapié en la falta de estandarización a la hora de implementar y definir un gemelo digital, pero se está trabajando en ello con el desarrollo de la primera normativa internacional la cual contendrá las descripciones de los conceptos más importantes, casos de uso y modelos de referencia para el gemelo digital, con el objetivo de ofrecer una base sólida y estructurada a la hora de diseñar gemelos digitales. Esta normativa está siendo desarrollada por el grupo de trabajo ISO/IEC JTC 1 [5], el cual es una agrupación del comité técnico de la Organización Internacional de la Estandarización (ISO) y el Internacional Electrotechnical Comisión (IEC). Además, numerosas organizaciones y asociaciones están uniéndose bajo la dirección de la nueva asociación industria de gemelos digitales (IDTA) y con la plataforma industria 4.0 con el objetivo de impulsar la implantación del gemelo digital de acuerdo con la guía de principios de la industria 4.0 de cara al año 2030 [5].

Esta técnica se emplea principalmente para dos diferentes casos:

- **Prototipo de gemelo digital:** En este caso el gemelo digital sirve como prototipo de un producto que todavía no se ha desarrollado físicamente donde se puede ver el aspecto y comportamiento de este antes de llegar al producto definitivo que pasará a ser creado físicamente.

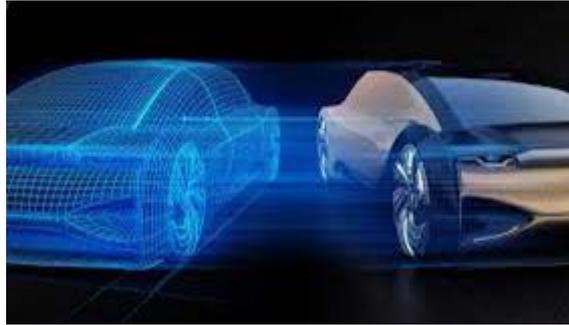


Figura 5: Creación de un objeto físico a partir de un prototipo de gemelo digital o digital twin.

- **Simulación de gemelo digital:** El segundo caso de uso es cuando se utiliza el gemelo digital para realizar simulaciones de diferentes escenarios de uso de un objeto que ya está creado físicamente para su posterior implementación en la entidad física.



Figura 6: Simulación de un gemelo digital o digital twin a partir de un objeto físico.

En los últimos años, el gemelo digital se ha expandido a industrias verticales, como el transporte pero hay dos tipos de industrias que pueden requerir un gemelo digital, el primer tipo es la industria con productos de alto valor, como la fabricación (automotriz, aeronáutica, electrónica), la construcción y la planta de energía debido a que cualquier error en esa industria puede costar millones de euros en pérdidas pero se pueden reducir los errores mediante la creación de un gemelo digital del objeto. La otra industria son todos los servicios relacionados con la vida, tales como la atención médica y servicio de emergencia ya que la tasa de éxito son los factores principales en esos servicios y el gemelo digital podría proporcionar ensayos para los médicos o equipos de rescate para tener mejor conciencia de la situación.

2.2. Clasificación y definición del Digital Twin

Una vez explicado que es el gemelo digital o digital twin y para qué sirve se va a definir en su totalidad explicando las partes que la componen y su correspondiente clasificación. Como se ha mencionado anteriormente el gemelo digital o digital twin es una representación digital de un objeto, proceso o servicio físico y este se compone en cinco diferentes elementos: entidad física, entidad virtual, los datos, la conexión y los servicios los cuales son necesarios para poder definir correctamente un gemelo digital según la arquitectura de las 5 dimensiones propuesta por Tao [6].

Entidad física

La entidad física es el gemelo de la entidad virtual y como su propio nombre indica es el objeto físico que se quiere modelar. Es la capa inferior del modelo de cinco dimensiones y tiene dos funciones principales: la recopilación de datos mediante sensores que integran datos en tiempo real en el gemelo digital y control de dispositivos. Por tanto, las entidades físicas sirven como fuente de datos y como dispositivos de actuación para las entidades virtuales. Se debe establecer cuál será la entidad física con la que se va a trabajar pudiendo ser un producto, máquina, control, estación de trabajo, planta, corporativo o cadena de suministro.

Entidad virtual

La entidad virtual es el elemento más importante del modelo de cinco dimensiones y sirve como base para las demás. Las entidades virtuales sirven como representación digital de las entidades físicas con el objetivo de modelar la entidad física en el espacio virtual para poder realizar simulaciones y proporcionar información. Se debe identificar en qué fase del ciclo de vida se situará el gemelo virtual siendo un diseño, prototipo, desarrollo, producción o eliminación.

Los datos

Los datos son el motor del gemelo digital ya que estos son los encargados de alimentar a la entidad virtual para que esta simule el comportamiento de la entidad física. Estos datos se obtienen mediante sensores que desempeñaran un papel crucial en la medición, control y seguimiento de los diferentes parámetros que se quieran modelar. Este apartado incluye la representación, clasificación y tratamiento, mantenimiento, fusión, uso de datos. Gran parte de las tecnologías relacionadas con el procesamiento y la gestión de datos en el gemelo digital se pueden lograr adoptando los estándares existentes en el procesamiento de datos. Se deberá de identificar cuáles son los datos más relevantes que se deben de tomar para definir el gemelo digital dependiendo de la entidad física seleccionada.

La conexión

Otro de los elementos más importantes es la conexión ya que es el encargado de hacer que las dos entidades, la física y la virtual, estén constantemente en contacto. Este elemento es fundamental porque toda la información pasa a través de este por lo que se requiere que la conexión sea rápida, segura e ininterrumpida para poder garantizar el buen funcionamiento del gemelo digital. Esta conexión se puede realizar de varias maneras mediante el sistema de automatización Pyramid, Ethernet, EntherNet/IP, EntherCAT, Modbus/TCP, CC link IE, SERCOS, PLC, DCS, FCS, SCADA y OPC UA.

Servicios

El último de los elementos necesarios para definir un gemelo digital es el de servicio donde se debe de reflejar la finalidad o las necesidades que va a satisfacer el gemelo digital ya que este es el propósito del gemelo digital.

Por lo tanto, se ha de identificar la etapa en la que se va a situar el gemelo digital debido a que puede ubicarse en diferentes etapas como la etapa de diseño, de proceso, monitoreo, control y optimización. Algunos ejemplos de los servicios que puede ofrecer el gemelo digital son mantenimiento predictivo de las máquinas, predicción de la calidad de los productos, obtener la trazabilidad de los productos a lo largo del proceso y control predictivo del entorno de los edificios. También se pueden encontrar normas estandarizadas que se pueden utilizar para definir cada uno de los cinco elementos mencionado anteriormente correspondientes al modelo de gemelo digital de cinco dimensiones que se muestran en la Figura 7, cada dimensión consta de estándares correspondientes, los estándares que se muestran a continuación son específicos para gemelos digitales o tecnologías de gemelos digitales.

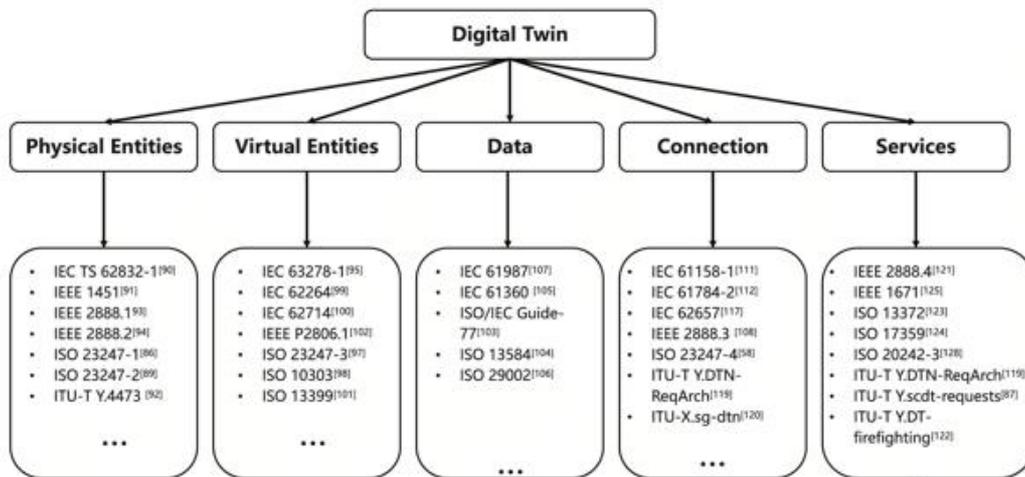


Figura 7: Arquitectura de las 5 dimensiones de TAO y ejemplos de normas estandarizadas. [6]

Una vez definido completamente el gemelo digital o digital twin y los elementos que lo componen se va a clasificar los diferentes tipos de gemelo digital. Podemos encontrar diferentes tipos de gemelo digital o digital twin pudiendo ser de un producto, máquina, control, estación de trabajo, planta, corporativo o cadena de suministro, pero los más relevantes son: gemelo de un producto o product twin, gemelo de una máquina o machine twin y el gemelo de un edificio o building twin ya que con la combinación de estos tres se obtienen los demás.

- **Gemelo digital de un producto (digital product twin):** Se define como gemelo digital de un producto cuando la entidad física a replicar es la de un producto u objeto. La cual se modela a partir de información como la calidad de producto, las características de las materias primas que las componen, así como los parámetros del proceso.
- **Gemelo digital de una máquina (digital machine twin):** El segundo tipo de gemelo digital que podemos encontrar es el de una máquina que se refiere a cuando la entidad física que se replica es la de una máquina y las operaciones que esta realiza. Los datos necesarios para su modelado son las dimensiones de la máquina, los materiales, las propiedades, las especificaciones de fabricación y sus parámetros del proceso (velocidad del husillo, tiempo de procesado, cambio de utillajes, paradas...). Este gemelo digital permitiría monitorizar los estados de la máquina, mejorar la eficiencia y el mantenimiento.

- **Gemelo digital de un edificio (digital building twin):** Y el tercero de los gemelos es el de modelar un edificio o infraestructura donde el gemelo digital contiene toda la información necesaria para la construcción y funcionamiento del edificio. Un claro ejemplo de este caso sería el modelado de una nave industrial 3D en inventor.

2.3. Metodología para la definición de la entidad virtual

La entidad virtual es la representación virtual de la entidad física y se compone de tres apartados dimensión geométrica, dimensión física y dimensión de comportamiento las cuales son necesarias para poder representar virtualmente cualquier objeto físico. El apartado de **dimensión geométrica** corresponde con las dimensiones de un objeto físico, tales como tamaño (ancho, largo y alto), forma, tolerancias, distancias... etc. El segundo apartado que compone la entidad virtual es el de **dimensión física** el cual se refiere a los fenómenos físicos propios de la entidad tales como el material del que este compuesto, colores, texturas, rugosidades... etc. Y el último de los apartados es el de **dimensión de comportamiento** que hace referencia a comportamientos y respuestas a fenómenos externos como fuerzas, velocidades, cambios de forma, interacción entre objetos... etc.

Como ya se ha comentado anteriormente en este proyecto hay falta de estandarización a la hora de modelar gemelos digitales por lo tanto uno de los objetivos de este trabajo de fin de grado es definir las pautas a seguir para modelar no solo este gemelo digital sino cualquier tipo de gemelo digital, siendo estas pautas una guía para la definición de la entidad virtual.

1. **Selección de la entidad física:** El primer paso a la hora de definir un gemelo digital debe ser identificar la entidad física la cual se quiere analizar, replicar, modelar, o mejorar pudiendo ser un producto, máquina, control, estación de trabajo, planta, corporativo o cadena de suministro. Este primer paso es muy importante ya que dependiendo de la entidad física que se quiera modelar se tendrán que identificar unas variables u otras.
2. **Identificación de variables y parámetros:** Una vez se haya seleccionado la entidad física el siguiente paso es el de identificar las variables más relevantes de la entidad física seleccionada tales como la velocidad del husillo, tiempo de procesado, calidad del producto, horas de trabajo, tiempo entre fallos ... son ejemplos de variables que se deben de identificar dependiendo la entidad física.
3. **Toma de datos:** Se debe de realizar una toma de datos de la entidad física seleccionada, cuantos más datos se tomen más información obtendrá el modelo. Esta toma de datos se puede realizar colocando sensores en dicha entidad física los cuales serán los encargados de recopilar datos para su después implementación en el modelo que se vaya a crear.
4. **Selección del software:** El cuarto paso es uno de los más importantes ya que se debe seleccionar un software el cual sea capaz de modelar la entidad física seleccionada la cual dará lugar a la entidad virtual y que cuenten con una amplia librería de objetos para realizar las diferentes simulaciones que se requieran.

5. **Identificación de inputs:** Con los datos obtenidos y el software seleccionado se deben de identificar cuáles son los inputs o datos de entrada que permite el programa.
6. **Creación de modelo base:** En este punto con toda la información obtenida ya sea manualmente o mediante sensores se debe de crear un modelo el cual servirá como base para las diferentes simulaciones o escenarios de investigación.
7. **Identificación de Outputs o KPI's:** Tras la creación del modelo se debe de identificar las variables que devuelve el sistema, así como los indicadores que se quieran medir o controlar y así poder ver si el sistema devuelve las variables que se desean.
8. **Comprobación de resultados:** Se debe de comprobar que los resultados obtenidos tengan sentido tales como unidades y tiempos y que la simulación este funcionando correctamente.
9. **Calibración:** Una vez obtenidas las variables que devuelve el sistema estas se deben de comparar con las variables de la entidad física para ver si son las mismas, difieren un poco o no tienen nada que ver una con la otra este punto es muy importante debido a que de este dependerá en nivel de precisión del gemelo digital o digital twin.
10. **Seguimiento y actualización:** Por último, se debe de realizar una pequeña comprobación de resultados periódicamente para asegurar que el modelo sigue funcionando correctamente, así como su actualización en cuanto se implementen mejoras o cambios en la entidad física.

2.3.1. Programas de simulación (estudio programas TECNALIA)

Un gemelo digital se crea en un programa de ordenador que usa datos del mundo real para recrear simulaciones que pueden predecir cómo funcionará un producto o proceso. Se utilizan para evitar fallos en los objetos físicos y para realizar funciones avanzadas de análisis, monitorización y predicción. Pero para ello primero será necesario seleccionar un software con el que trabajar, al contar con la colaboración del centro de investigación TECNALIA estos nos ofrecen un listado de los softwares que están bajo su propiedad para poder realizar el estudio y seleccionar el software con el que finalmente se trabajara.

El criterio sobre el cual se basa el estudio es sobre la capacidad de los softwares disponibles en el listado de TECNALIA para definir la entidad virtual y los tres apartados que la componen dimensión geométrica, dimensión física y dimensión de comportamiento. El estudio se recoge en la Tabla 1 donde se indica con un Si, si el software en cuestión cumple con los requisitos descritos anteriormente y con un - cuando este no los cumple. Por tanto, todos aquellos programas que no obtengan tres si se descartaran puesto que no pueden cumplir los tres apartados que componen la entidad virtual y no se podría definir el gemelo digital correctamente en ellos.

Una vez descartados los softwares que no cumplen los tres apartados se ha de seleccionar uno de entre todos los softwares los que si cumplen los tres apartados (remarcados en verde oscuro en la tabla 1). Llegados a este punto se puede seleccionar cualquiera de los softwares restantes ya que todos cumplen con los tres apartados (dimensión geométrica, dimensión de física y dimensión de comportamiento) que componen la entidad virtual, pero en este proyecto se escoge trabajar con el software FlexSim.

Software	D. Geométrica	D. Física	D. Comportamiento
AutoCAD	Si	Si	-
Abaqus	Si	Si	Si
Altair	Si	Si	Si
ANSYS M	Si	Si	Si
ANSYS F	-	Si	Si
ANSYS S	-	Si	-
CadnA	-	-	-
Catia	Si	Si	Si
Dymola	Si	Si	-
Creo S	Si	Si	Si
Creo E	Si	Si	Si
Cubus	Si	Si	-
Forge	Si	Si	-
Matlab	-	-	Si
Simulink	Si	-	Si
Maxsurf	Si	Si	Si
Hexagon	Si	Si	Si
Nasgro	Si	Si	Si
Nx Diseño	Si	Si	-
Odeon	-	-	Si
Oros	-	-	Si
Profis	Si	Si	-
PoweMILL	Si	Si	-
PowerShape	Si	Si	-
Simencer S	Si	Si	Si
Solid Edge	Si	Si	Si
OrcaFlex	Si	Si	Si
Rhino	SI	Si	-
SolidWorks	Si	Si	-
VEDA	-	-	Si
FlexSim	Si	Si	Si

Tabla 1. Estudio de los programas de simulación para modelar la entidad virtual.

Se escoge trabajar con el software FlexSim debido a que es un software que esta creado para trabajar con gemelos digitales permitiendo realizar simulaciones en él y que cuenta con una amplia librería y objetos con los que interactuar. También se ha tomado esta decisión ya que es un software con el que se la Universidad de Zaragoza está familiarizado y se tiene nociones básicas de su uso lo cual ayudara a la hora de modelar los diferentes escenarios de simulación e interactuar con el programa.

3. Análisis de la herramienta FlexSim para la integración de datos en tiempo real en procesos con máquina-herramienta

Como se ha mencionado anteriormente se decide trabajar en este proyecto con el software FlexSim y a continuación se procede a explicar en qué consiste este programa y determinar su alcance. FlexSim es un software para la simulación de eventos discretos, que permite modelar, analizar, visualizar y optimizar cualquier proceso industrial, desde procesos de manufactura hasta cadenas de suministro. Además, FlexSim es un programa que permite construir y ejecutar el modelo desarrollado en una simulación dentro de un entorno 3D desde el comienzo. Actualmente, El software de simulación FlexSim es usado por empresas líderes en la industria para simular sus procesos productivos antes de llevarlo a ejecución real []. Este software nos permite simular una variedad de elementos gracias a la extensa librería que ofrece y que permite simular procesos industriales en general los cuales se han dividido en diez grupos y se detallan a continuación:

Recursos Fijos:

- Fuente o Source (Simula la entrada de datos, crea el flujo de los elementos).
- Cola o Queue (Almacén intermedio).
- Procesador o Processor (Máquina-herramienta, procesa los elementos).
- Sumidero o Sink (Destruye el flujo del elemento, representa el final).
- Combinador o Combiner (Combina o junta el flujo de elementos).
- Separador o Separator (Separa el flujo de elementos).
- Multiprocesador o Multiprocessor (Procesa los elementos en múltiples pasos secuenciales).
- Forma básica o BasicFR (Permite personalizar un objeto).

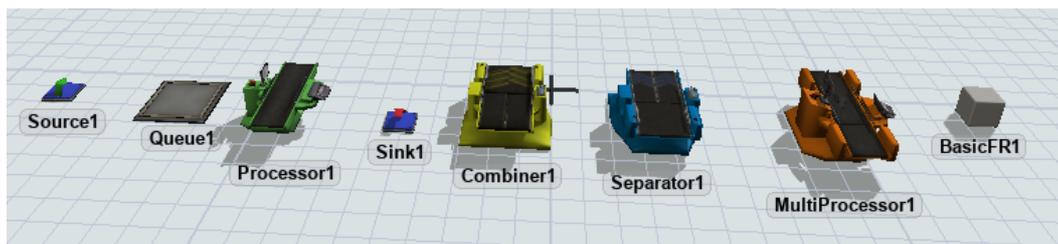


Figura 8: Recursos fijos de FlexSim.

En el proceso de fabricación a partir de la fuente se pueden modelar los siguientes elementos, caja, cilindro, esfera, planos, círculo, pallet, cubos, personas, camiones, tubos de ensayo, bote de pastillas, aunque también se pueden importar diseños concretos de otras aplicaciones o descargarlos de la página web si fuese necesario.

Ejecutor de tareas:

- Dispatcher (Objeto que controla un grupo de ejecutores de tareas).
- Ejecutor de tareas o Taskexecutor (Automated Guided Vehicle).
- Operario o Operator.
- Carretilla elevadora o Transporter.
- Elevador vertical o Elevator (Simula transporte vertical).
- Brazo robótico o Robot (robot ejecutor de tareas que simula movimiento 6 ejes).
- Puente grúa o Crane.
- Transelevador o ASRSvehicle (Representa la simulación de desplazamiento tanto vertical y horizontal).

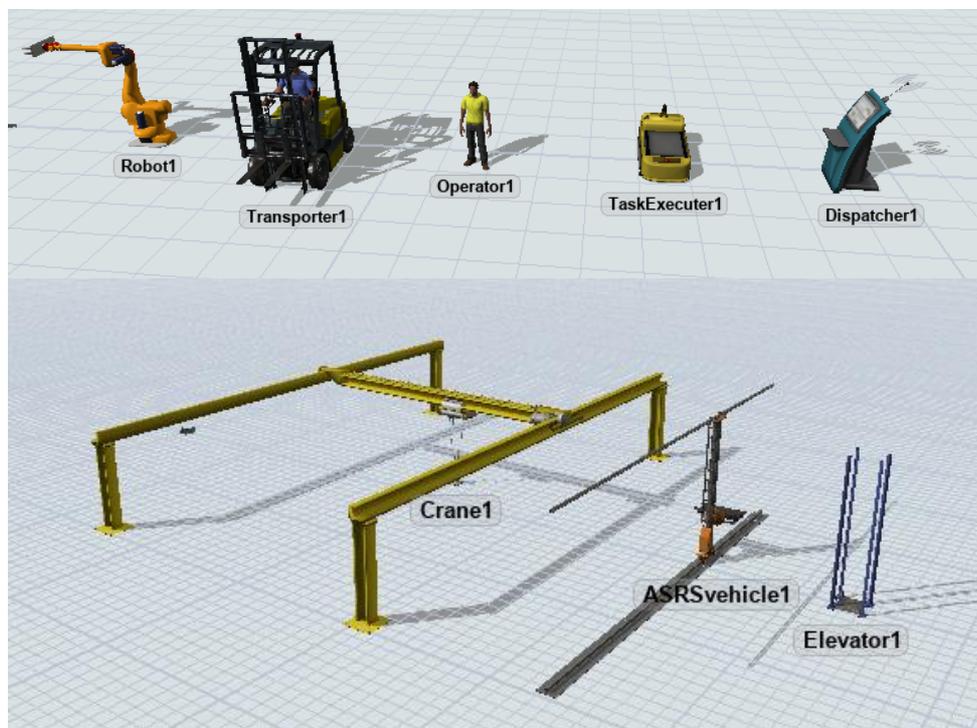


Figura 9: Ejecutores de tareas de FlexSim.

Red de viajes:

- Nodo de conexión (Permite realizar controles en las líneas de transporte).
- Semáforo o TrafficControl.



Figura 10: Red de viajes de FlexSim.

Transportadores:

- Cinta transportadora de rodillos.
- Cinta transportadora.
- Punto de decisión o DP (Para poder tomar una decisión a la hora de enviar un artículo a una cinta u otra).
- Estación o Station (Para realizar labores dentro de la cinta).
- Sensor fotovoltáico.
- Motor.
- Fusionador de cintas o MergeController (Para unificar el flujo de varias cintas).

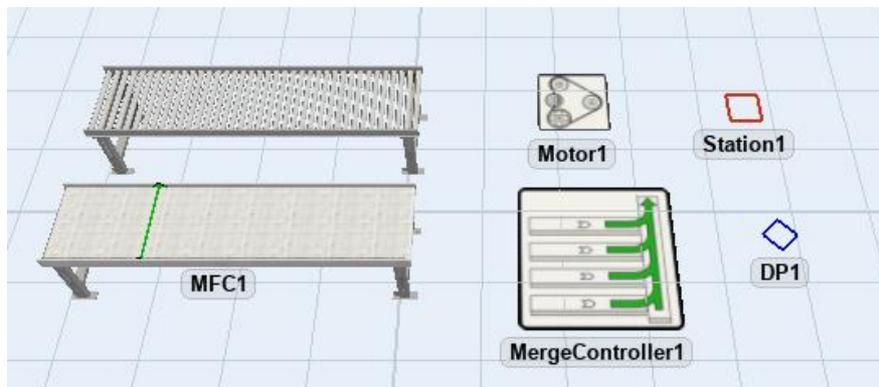


Figura 11: Transportadores de FlexSim.

Almacenamiento:

- Estanterías o Rack.
- Almacenamiento en el suelo o FloorStorage.

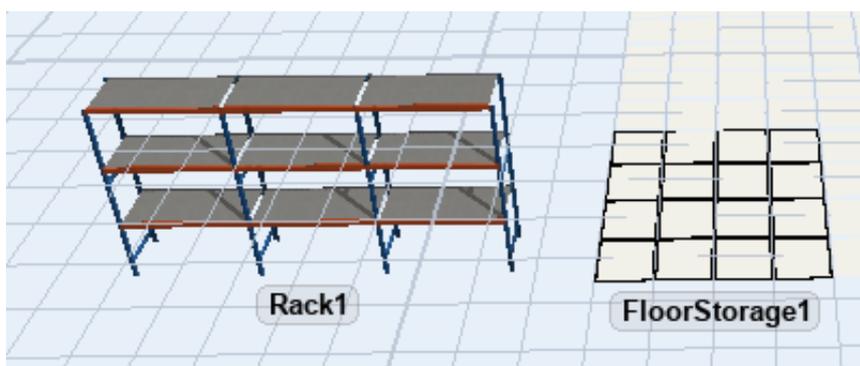


Figura 12: Diferentes tipos de almacenamiento de FlexSim.

Fluidos:

- Procesadores de fluidos (Varios modelos).

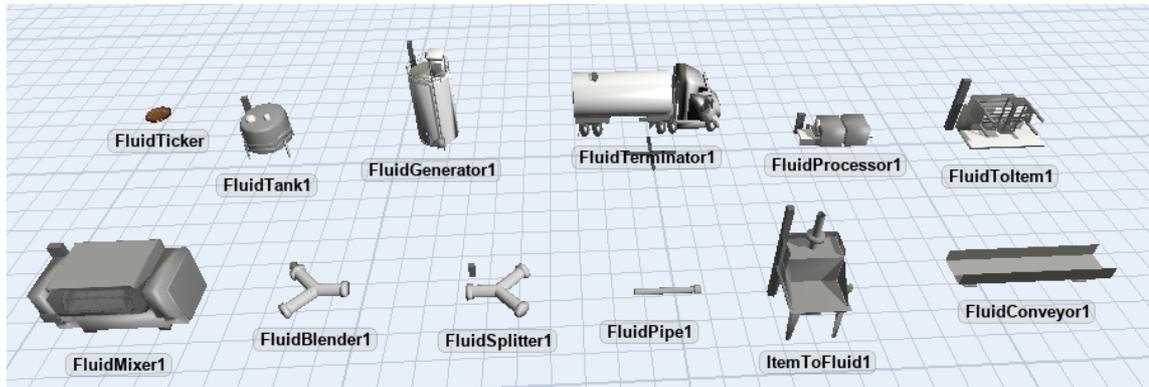


Figura 13: Procesadores de fluidos de FlexSim.

Personas:

- Localización.



Figura 14: Diferentes localizaciones de FlexSim.

- Personal



Figura 15: Personal de FlexSim.

- Transporte:



Figura 16: Diferentes medios de transporte de FlexSim.

- Equipamiento



Figura 17: Diferentes equipamientos de FlexSim.

Tras ver la variedad de objetos que permite modelar FlexSim gracias a su amplia librería se procede con el estudio de la integración de datos en tiempo real en el software debido a que FlexSim permite conectar directamente el programa con un PLC (Programmable logic Controller) o PC industrial el cual recibe información de los sensores o dispositivos de entrada que estén colocados en la entidad física, procesa los datos y activa las salidas basándose en parámetros programados. Dependiendo de las entradas y salidas del PLC puede monitorear y registrar datos en tiempo real, iniciar y detener procesos automáticamente y generar alarmas si detecta un mal funcionamiento de alguna máquina.



Figura 18: PC industrial o PLC.

Esto es posible gracias a la función de emulación que contiene el software el cual permite realizar esa conexión. Esta función se encuentra en el panel de herramientas de FlexSim dentro del apartado de conectividad.

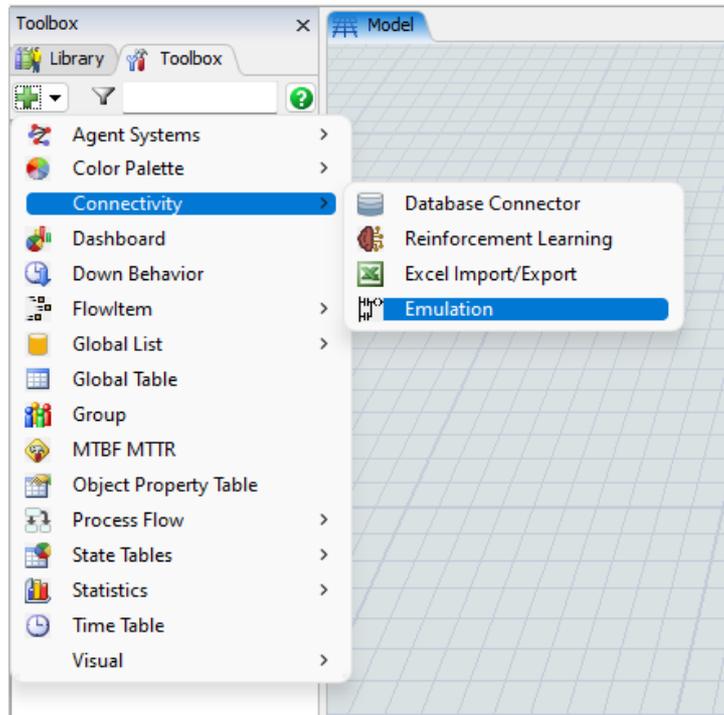


Figura 19: Apartado de emulación de FlexSim.

Dentro del apartado de emulación, en la pestaña de conexiones, se puede seleccionar que tipo de PC industrial que se está utilizando en la entidad física para poder realizar la conexión pudiendo elegir entre una conexión Modbus RTU o TCP, OPC DA o UA, Allen-Bradley, Siemens S7 o PLCSIM y Beckhoff estas serían las posibilidades de conexión que admitiría el software. En nuestro caso la conexión se realiza mediante Beckhoff que es el tipo de PC industrial que se ha utilizado en las máquinas del laboratorio 4.0 (Torno Pinacho y fresadora HASS).

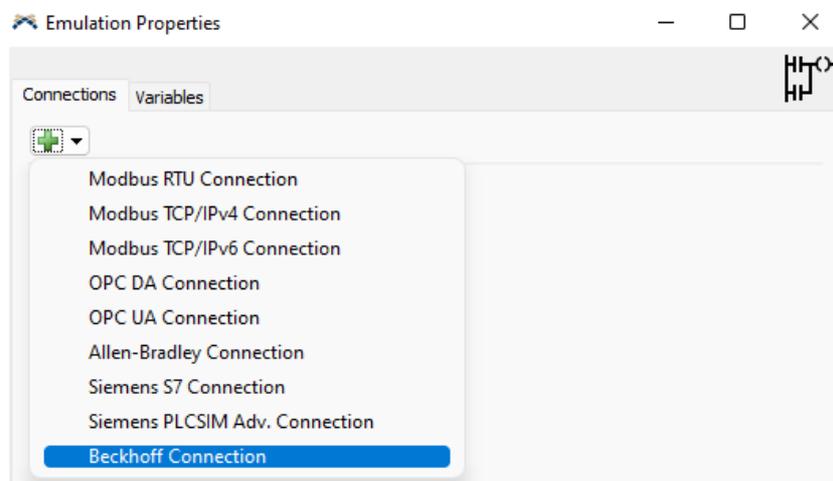


Figura 20: Diferentes tipos de conexión de PLC en FlexSim.

Una vez seleccionado el tipo de PC industrial con el que se está trabajando el siguiente paso es el de realizar la conexión del programa con el PC industrial mediante la dirección IP y el número de puerto al que está conectado el PC industrial. La dirección IP de un PLC Beckhoff tiene un formato como el siguiente x.x.x.x.x. seis números entre puntos. Tras colocar los datos de la dirección IP y el número de puerto se debe de seleccionar el botón de probar conexión para comprobar si los datos introducidos son correctos, si estos datos son correctos se conectará con el sensor.

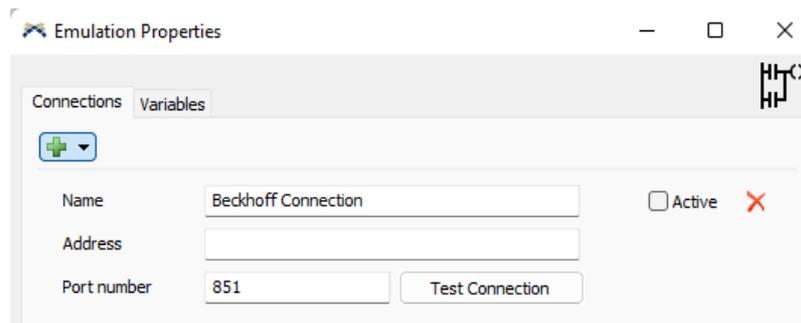


Figura 21: Conexión a un PLC tipo Beckhoff mediante FlexSim.

Una vez realizada la conexión dentro de la pestaña de variables se debe de seleccionar con qué tipo de variable se va a trabajar en nuestro caso Beckhoff de sensor pudiendo elegir entre control o sensor o ambas. Las variables de control son utilizadas como outputs o de salida y las variables de sensor son utilizadas como inputs o entrada.

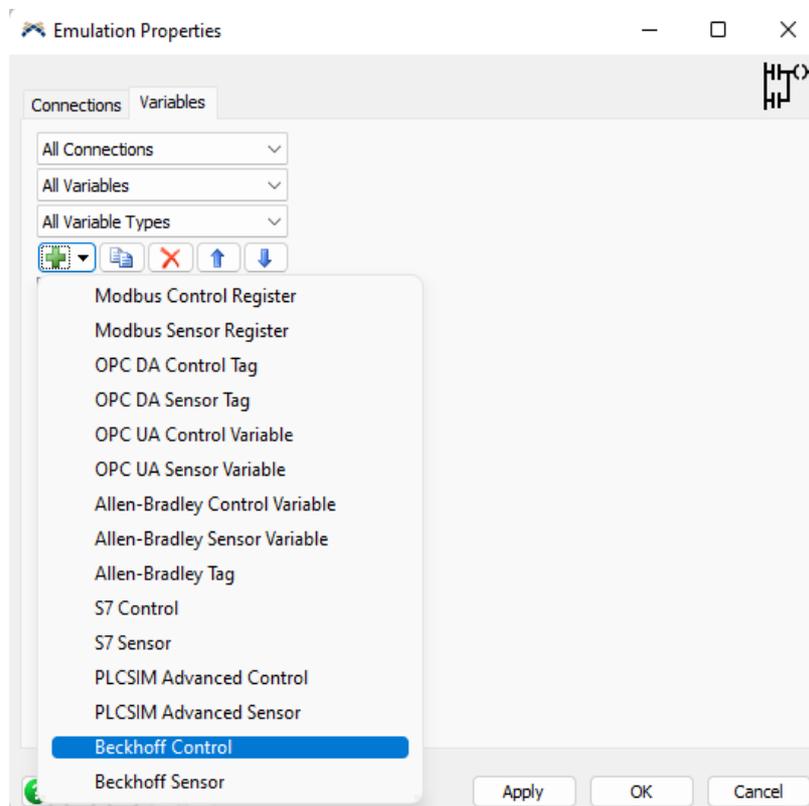


Figura 22: Variables de un PLC tipo Beckhoff en FlexSim.

El último paso por realizar es seleccionar que tipo de variable va a devolver el sistema pudiendo elegir entre un booleano, un numero entero, imaginario, o una variable de tipo texto son unas de las posibles variables que puede devolver el sistema.

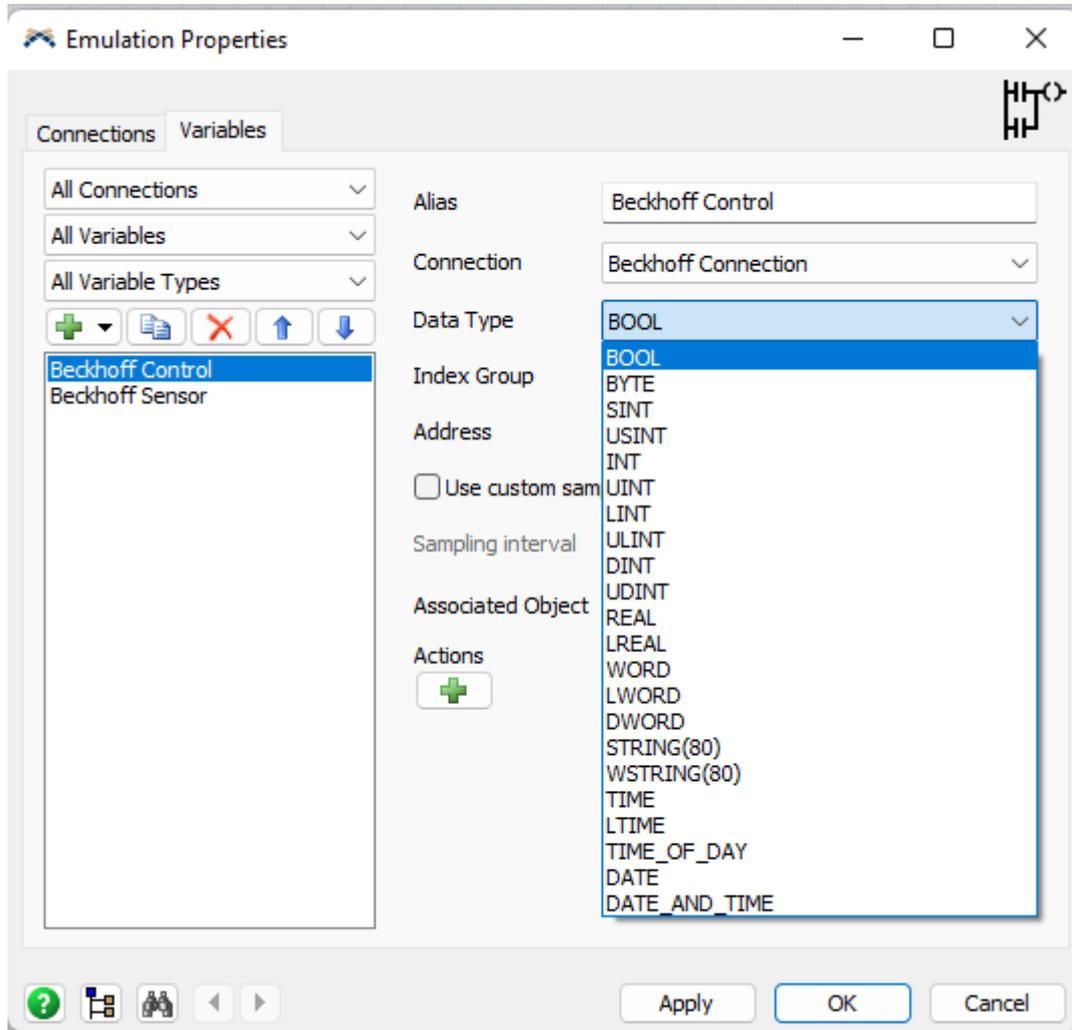


Figura 23: Selección de variables de un PLC tipo Beckhoff mediante FlexSim.

Como se comentó al inicio de este proyecto tras realizar el análisis del software para la integración de datos en tiempo real se encontraron limitaciones a la hora de conectar el software FlexSim con el PC industrial debido a que para la realización de este trabajo se cuenta con una licencia de estudiante la cual no permite utilizar todas las funcionalidades del software FlexSim entre ellas la de emulación por tanto no ha sido posible implantar los datos en tiempo real sino que se ha creado un programa en Python para simular la recogida de datos. Por temas de confidencialidad habrá que tapar parte del programa.

3.1. Análisis INPUTS FlexSim

Tras la primera toma de contacto con el software observando el alcance de los objetos que se pueden modelar dentro de FlexSim, así como el estudio para la implementación de datos en tiempo real se procede a analizar cuáles son los inputs o entradas que admite el software para poder simular el entorno productivo del laboratorio 4.0.

Para ello se va a analizar las entradas o inputs de los tres elementos más importantes a la hora de realizar una simulación el objeto a producir o ítem en nuestro caso se parte de barras de acero las cuales tras pasar por las maquinas-herramientas cambian de tamaño y forma, el segundo elemento a analizar es la fuente o source la cual es la encargada de simular la llegada de material o de ítems en el software y por último el procesador o la máquina-herramienta la cual se encarga de simular las diferentes operaciones que vaya a sufrir el objeto o ítem. Estas entradas o inputs se recogen en la tabla 2.

INPUTS		
Procesador	Fuente	Ítem
Contenido máximo	Ítem a producir	Dimensión
Requiere operario	Llegada en tiempo 0	Tipo
Tiempo del primer fallo	Dimensiones	Forma
Tiempo de la reparación	Programación de secuencia	Material
Tiempo entre fallos	Necesidad de transporte	Descripción
Ubicación de envío	Ubicación de envío	Textura
Tiempo de preparación	Unitario o Lotes	Color
Tiempo de procesado	Tiempo de llegada	Peso

Tabla 2: Inputs o entradas del software FlexSim.

En primer lugar, se comienza por el **procesador** o la **máquina-herramienta** la cual se debe de indicar en el programa la cantidad máxima de ítems u objetos que puede procesar a la vez en nuestro caso este valor es de uno, ya que nuestras dos máquinas-herramienta (el torno Pinacho y la fresadora HAAS) solo pueden procesar un ítem o producto a la vez, también se le debe de indicar si requerirá de operario o un medio de transporte para trasladar el ítem u objeto una vez finalizado el proceso, así como la ubicación donde se enviará este objeto, pudiendo elegir entre el primer hueco disponible o una ubicación fija. El software también ofrece la posibilidad de simular fallos técnicos, paldas para realizar mantenimiento (preventivo o correctivo) por lo que los parámetros como tiempo del primer fallo y tiempo de reparación son posibles datos de entrada o inputs si fuese necesario introducirlo en el modelo, en nuestro caso no lo es. Los dos parámetros más importantes del procesador son el tiempo de preparación, el tiempo que le costaría a la máquina estar lista para empezar a producir, en nuestro caso es de cero ya que las dos máquinas una vez se encienden ya están preparadas para producir, y el tiempo de procesado, el cual se corresponde con el tiempo que le cuesta a la máquina realizar las operaciones sobre el ítem u objeto. Estos dos tiempos el de preparación y el procesado se pueden representar de diferentes maneras abarcando un gran abanico de posibilidades para adaptarse a los diferentes tipos producción. En nuestro caso el tiempo de procesado se representa con una distribución estadística con los datos obtenidos mediante los sensores, pero pueden representarse mediante estos métodos:

Procesador

- Tiempo de preparación y procesado:
 - Parámetro (Dependiendo del artículo).
 - Valor fijo.
 - Distribución Estadística (Con valores de media y desviación).
 - Valores por caso (Diferentes tiempos dependiendo del artículo o etiqueta).
 - Tabla global (Tabla con diferentes tiempos para diferentes artículos).
 - Porcentajes.
 - Ratios periódicas (Define la cantidad exacta que quiere producir en una hora determinada).
 - Hora del día (Define el tiempo de procesado por horas de día).
 - Lotes (Tamaño de lote y tiempo de ciclo).
 - Numero de artículos.

El siguiente elemento es la **fente** o **source** el cual tiene como entradas o inputs el tipo de ítem u objeto que va a simular su llegada, en nuestro caso serán barras cilíndricas de acero, a su vez se debe indicar si en el instante cero de la simulación, nada más empezar, habrá una llegada del material o este llegara una vez iniciada la simulación, las dimensiones que tiene la fuente se pueden introducir también como entrada. Si el entorno productivo a modelar cuenta con una llegada de material secuencial otra entrada será la programación de la secuencia de este material indicando cada cuantas veces llegara el material con su intervalo de tiempo y cantidad en cada llegada, también habrá que indicar a la hora de configurar la fuente o source si la llegada de material se realizara en un formato de lotes o en un formato unitario, en caso de ser la llegada de material por lotes se deberá de especificar el tamaño de este, así como si requerirá transporte para trasladar a este y su ubicación y por último el tiempo de llegadas, cada cuanto tiempo llega el material, este tiempo se puede modelar de varias maneras:

Fuente

- Tiempo de llegada
 - Distribución estadística.
 - Ratios periódicas (Cantidad de productos que van a llegar en ese espacio de tiempo/ horas, días, semanas).
 - Hora del día (Se repite todos los días).
 - Número de lote.

Y por último el **ítem** u **objeto** con el que se va a trabajar, este elemento se puede personalizar ajustándose a las necesidades de la simulación pudiendo introducir las dimensiones, tipo de objeto, la forma, el material de que este hecho, así como una pequeña descripción si fuese necesario en el cual se puede introducir por ejemplo el número de serie, o tipo de producto. FlexSim también permite importar modelos 3DS o VRML que hayan sido creados previamente en un software de modelado 3D.

3.2. Relación INPUTS- Variables MHs

Una vez identificadas las entradas o inputs que se pueden introducir en el software se va a analizar las variables que devuelven las máquinas-herramientas sensorizadas y ver la relación entre estas variables y las entradas o inputs que se han identificado en el apartado anterior 3.1, para poder así alimentar el modelo con los datos reales del funcionamiento de ambas máquinas. Para ello se recogen las variables, que pueden servir como entradas en FlexSim, en dos tablas la primera (la tabla 3) con las variables de la fresadora HAAS y la segunda (la tabla 4) con las variables del torno PINACHO.

Nombre variable	Descripción	Unidades
#3024 LAST COMPLETE PART TIME	Mide mediante un cronometro el tiempo que le requiere realizar una pieza completa, actualizándose este valor cuando tras su finalización.	S
Q402 M30 PARTS 1 Q403 M30 PARTS 2	Ambas variables corresponden al mismo contador de piezas, cuando el programa llega a M30 el contador incrementa su valor en 1 unidad.	-
#3023 PRESENT PART TIME	Cronómetro el cual una vez activado acumula el tiempo que requieren las piezas desde la pieza anterior.	-
#3027 RPM SPINDLE	Muestra la velocidad del husillo en cada momento mientras la máquina este encendida.	Rpm
#3031 DRY RUN	Es el modo de ejecución en seco, indica 0 si está inactivo y 1 si se encuentra activo.	-
#3901 M30	Es un contador de piezas, cada vez que el programa llega a M30, el contador incrementa en 1. M30 es fin de programa y reinicio.	-

Tabla 3: Variables que devuelve la fresadora sensorizada HAAS.

Nombre variable	Descripción	Unidades
PART COUNTER	Cuenta las piezas fabricadas de cada programa y este se reinicia cuando se cambia de programa o se vuelve a utilizar el mismo programa.	-
RPM_SPINDLE	Muestra la velocidad de giro del husillo o eje.	rpm
EXECUTIOM_MODE	Variable que indica el estado de la máquina cambiando su valor cuando la máquina sufre una avería.	-
PROGRAM_STATUS	Muestra el estado del programa que varía entre RESET, RUNNING y STOPPED.	-

Tabla 4: Variables que devuelve el torno sensorizado PINACHO.

De la tabla 3 la cual corresponde con las variables de la máquina HAAS, las variables se relacionan con el objeto procesador, la variable #3024 LAST COMPLETE PART TIME se relaciona con el input de tiempo de procesado debido a que mide el tiempo que le requiere realizar una pieza, la variable #3023 PRESENT PART TIME se relaciona con el input de tiempo de preparación ya que al acumular el tiempo desde la pieza anterior con la diferencia de tiempos de las variables #3024 y #3023 se obtiene este valor. La tabla 4 se corresponde con las variables de la máquina PINACHO, la variable EXECUTIOM_MODE se relaciona con el input de tiempo de primer fallo y tiempo entre fallos ya que se pueden obtener estos tiempos mientras la maquina marque que este averiada y la variable PROGRAM_STATUS se relaciona con el tiempo de preparación cuando marque que está parada y con el tiempo de procesado cuando marque en funcionamiento.

Máquina-Herramienta	Nombre Variable	Input relacionado
HAAS	#3024 LAST COMPLETE PART TIME	Tiempo de procesado
HAAS	#3023 PRESENT PART TIME	Tiempo de preparación
PINACHO	EXECUTIOM_MODE	Tiempo primer fallo Tiempo entre fallos
PINACHO	PROGRAM_STATUS	Tiempo de preparación Tiempo de procesado

Tabla 5: Relación inputs y variables máquina-herramienta.

A parte de las variables mencionadas anteriormente se debe de identificar cual es la metodología de la producción que se utiliza en ese entorno productivo pudiendo ser discreta, continua o por lotes. La producción se denomina discreta cuando el producto final se consigue a partir del ensamblaje de diferentes piezas que la componen mientras que se considera producción continua, cuando el producto final se obtiene a partir de un flujo continuo de materiales sin interrupción y por último se denomina producción por lotes cuando se fabrican productos con unas características idénticas en tandas de una cantidad determinada.

3.3. Relación OUTPUTS – KPI's

Los outputs o salidas que permite el software FlexSim están ya predeterminados y se debe de seleccionar el objeto que se quiera analizar en cuestión y fijar cual o cuales de los cuatro grupos (state o estado, throughput o producción, content o contenido y Staytime o tiempo de espera) se quiere mostrar. El estado como bien su nombre indica es el estado en el que se encuentra el objeto variando entre ocupado, vacío, procesando etc. La producción muestra la cantidad de artículos que se han procesado, el contenido indica la cantidad de artículos que se han procesado a la vez y el tiempo de espera el tiempo que dicho artículo ha permanecido parado hasta ser procesado mostrando un valor mínimo, máximo y su media.

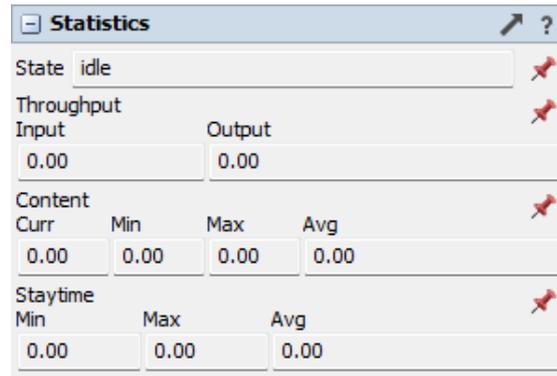


Figura 24: Outputs del software FlexSim.

Los outputs o salidas mencionados anteriormente se pueden representar con diferentes gráficas dependiendo de las necesidades pudiendo utilizar gráficos de barras, tablas, gráficos lineales e histogramas en función de la variable.

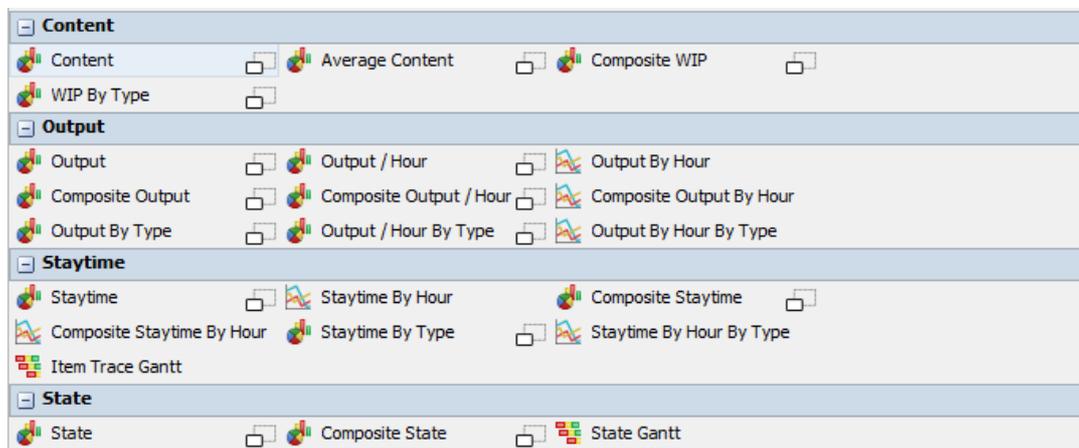


Figura 25: Representación de outputs del software FlexSim.

Además, se muestra también la posibilidad de obtener datos de costes o análisis financieros, así como realizar el rastreo de una variable en concreto.

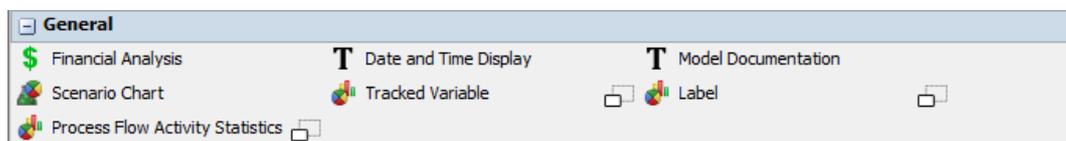


Figura 26: Gráficos del software FlexSim.

Gracias a la amplia variedad de posibilidades que ofrece el software FlexSim a la hora de obtener outputs o salidas se pueden calcular KPI's o indicadores como el tiempo de procesado, tasa de calidad, eficiencia del proceso, inventarios, tasa de producción, costes y el OEE (Overall Equipment Effectiveness), este último mide la eficiencia de la maquinaria industrial, es decir, del tiempo total que la máquina está trabajando cual es el tiempo que está realizando piezas buenas.

El tiempo de procesado se puede obtener mostrando el output de staytime de la máquina-herramienta, para obtener la tasa de calidad se deberá de mostrar el output de content o contenido tanto del almacén de piezas buenas como el de piezas defectuosas y compararlo con la producción, la eficiencia del proceso se obtiene con el output de state o estado de todos los elementos que componen el entorno productivo y ver qué porcentaje del tiempo están produciendo o están parados, el inventario se obtiene con el output de contenido del almacén, la tasa de producción se obtiene con el output de throughput o producción de la máquina-herramienta, los costes se pueden obtener mediante el output de análisis financiero en el cual habrá que indicar los precios de lo que se quiera calcular y por último el OEE este indicador se obtiene juntando varias salidas del programa debido a que tiene en cuenta la tasa de calidad, el rendimiento y la disponibilidad por lo que habrá que combinar los outputs de tasa de calidad que se obtiene con el contenido o content de los almacenes, la disponibilidad con el output de state o estado de la máquina-herramienta y el rendimiento con el output de producción.

Se muestra en la tabla el output que se requiere mostrar y de que objeto del programa para mostrar los KPI's mencionados anteriormente.

KPI	Output	Objeto
Tiempo de procesado	Staytime	Máquina-herramienta
Tasa de calidad	Content	Almacén
Eficiencia	State	Todos
Inventario	Content	Almacén
Producción	Throughput	Máquina-herramienta
Costes	Análisis financiero	
OEE	Content State Throughput	Máquina-herramienta

Tabla 6: Relación Outputs y KPI's.

4. Escenarios de investigación

Para finalizar con este trabajo de fin de grado se van a estudiar diferentes escenarios de investigación de las dos máquinas sensorizadas que componen el laboratorio 4.0. Estas dos máquinas que se van a estudiar son la fresadora HAAS y el torno PINACHO que se modelaran en tres escenarios diferentes para simular su comportamiento, el primero de los escenarios simulara únicamente el funcionamiento de la fresadora HAAS, el segundo de los escenarios el funcionamiento de ambas maquinas tanto la fresadora HAAS como el torno PINACHO y por último se simulara nuevamente ambas maquinas, pero esta vez apoyadas por un AGV un vehículo autónomo guiado.

4.1. Conceptualización de los escenarios

Pero antes de pasar a los escenarios de investigación se va a hablar brevemente de las dos máquinas a modelar. La primera de ellas es la fresadora vertical de cinco ejes de la marca HAAS el modelo VF-3. Esta máquina puede moverse en cinco direcciones gracias a que en su interior cuenta con un plato giratorio Trunnion TR 160 el cual aporta a los tres ejes lineales (X, Y, Z), dos ejes adicionales de rotación (A y C). Ambos se muestran en la Figura 24.

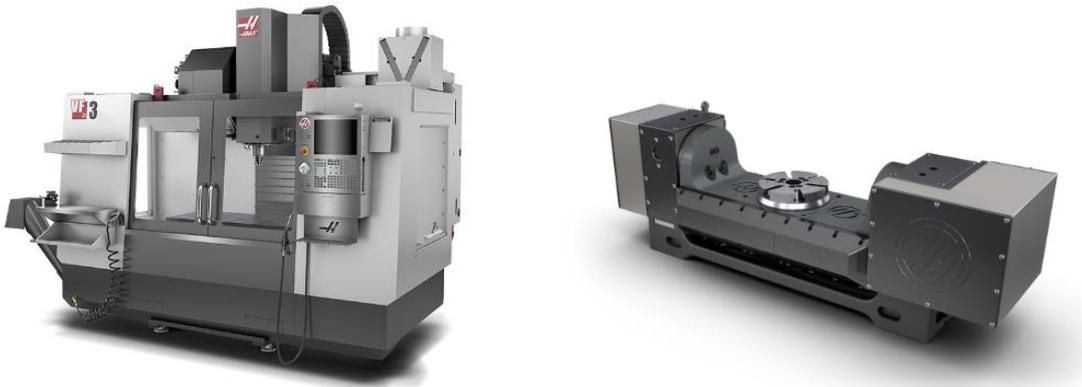


Figura 27: Fresadora HAAS y plato giratorio Trunnion TR 160.

La segunda máquina que se va a modelar es el torno PINACHO que a diferencia de la fresadora HAAS que contaba con cinco ejes el torno solo cuenta con tres ejes (X, Y, Z) y se muestra en la Figura 25.



Figura 28: Torno PINACHO.

4.2. E1. HAAS

En el primero de los escenarios se simulará el funcionamiento de la fresadora HAAS a la cual se le alimenta con barras de acero y tras realizar las diferentes operaciones que le correspondan obtiene la pieza final. Tras finalizar el proceso el operario realiza un control de calidad visual para identificar la calidad de la pieza terminada y la transporta dependiendo de su aspecto al almacén de piezas buenas o piezas defectuosas simulando así la forma de operar en el laboratorio 4.0, a su vez el operario se encarga de alimentar a esta máquina.

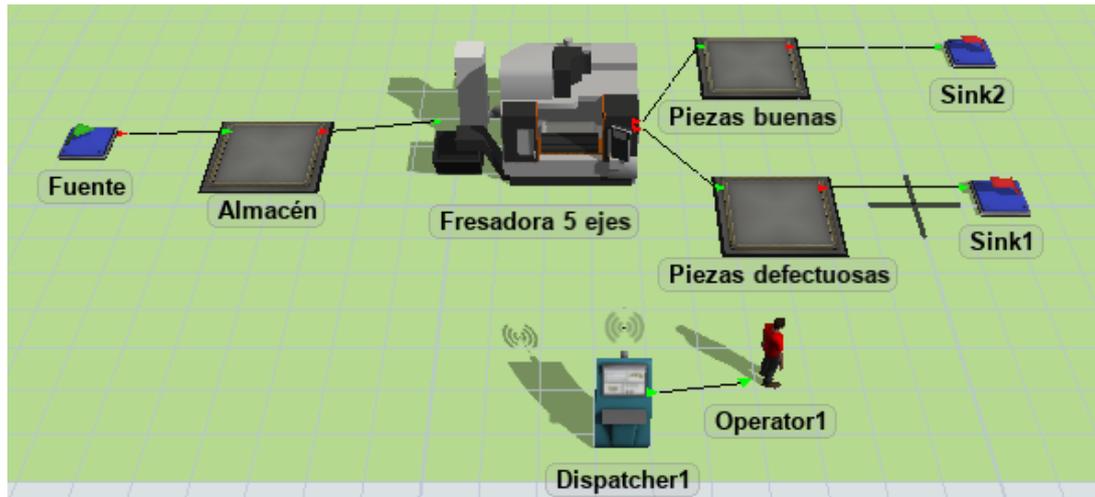


Figura 29: Escenario de investigación 1.

Para ello se crea un nuevo modelo en el software FlexSim y se indican los parámetros con los que se van a trabajar, en nuestro caso la unidad de tiempo con la que se trabajara es en segundos (s), la unidad de longitud es en metros (m) y la unidad de los fluidos en litros (l).

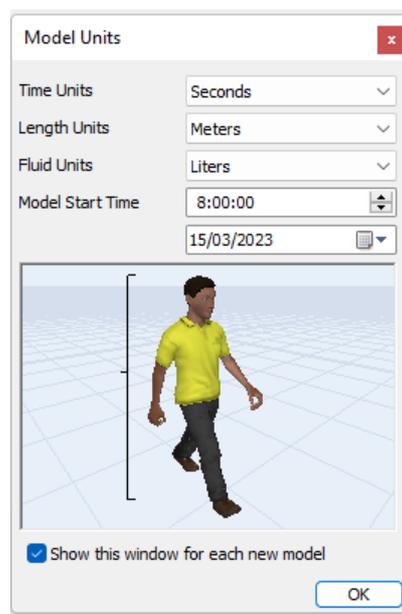


Figura 30: Unidades de medida con las que se va a trabajar.

El primer paso tras elegir las unidades de medida es el de configurar la fuente o source que será el que nos suministre el material en nuestro caso simula la entrada de barras de acero para ello se selecciona el icono de la fuente o source que se encuentra en el panel de la librería general del programa. En nuestro caso simula estas barras de acero mediante un intervalo de llegadas que sigue una distribución lognormal2 100 y desviación 0.2 este dato es hipótesis y se utiliza para que el sistema siga un flujo tenso y no se acumule mucho producto sin procesar y a su vez se marca la llegada de material en tiempo cero para que nada más empezar la simulación el material esté listo para ser procesado.

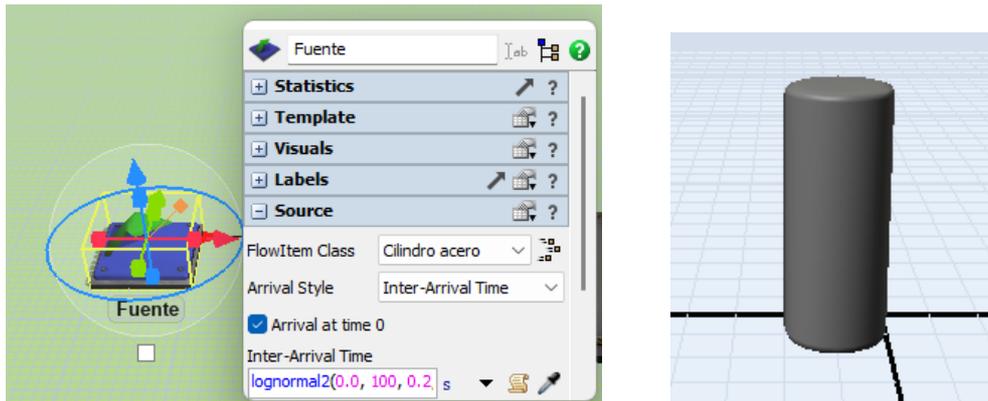


Figura 31: Configuración de la fuente o source y cilindro de acero que simula.

Tras definir la fuente el siguiente paso es el de definir el tamaño del almacén intermedio donde se almacena el material que llega desde la fuente o source sin procesar (cilindro de acero) a la espera de ser recogido por el operario pasa después transportarlo hasta la fresadora HAAS. La capacidad máxima de este almacén es de 50 cilindros de acero, debido a que es la capacidad del almacén del laboratorio 4.0. Se selecciona la casilla de que se almacenen en el interior de las dimensiones del almacén y se deja sin marcar la casilla LIFO (Last In First Out) el cual es un sistema de prioridad que quiere decir que el ultimo producto que entra en el almacén es el primero en salir, pero en nuestro caso es al revés el primer producto que entra es el primero en salir, es decir, sigue un modelo FIFO (First In First Out).

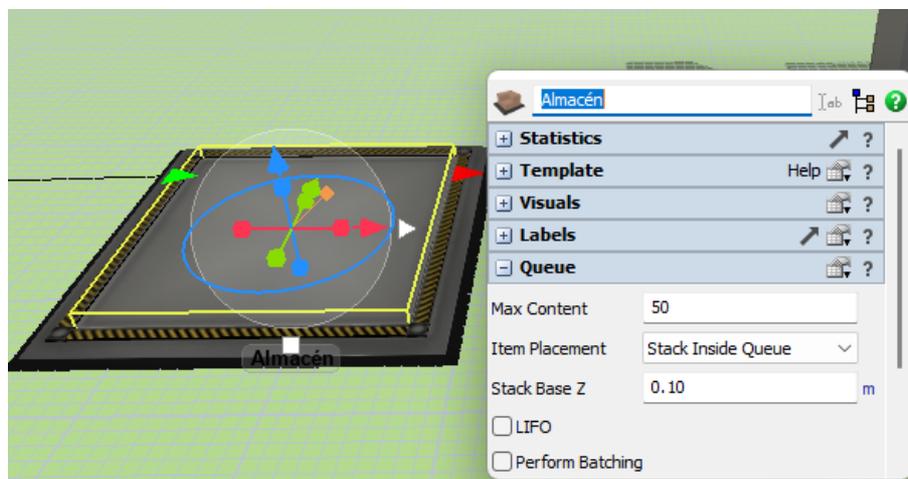


Figura 32: Configuración de almacén intermedio.

Para que la simulación sea lo más parecida a la realidad se ha importado un modelo 3d de la fresadora HAAS. Para configurar la máquina-herramienta la cual será la encargada de procesar el producto, se ha de introducir el tiempo de procesado que se obtiene mediante una distribución normal 236 con una desviación de 13.31 que es la que mejor se ajusta a los datos obtenidos por los sensores. Este dato es muy importante debido a que a con el podemos simular con gran precisión el comportamiento que sigue la máquina pudiendo servir este modelo como prototipo para futuras pruebas o mejoras permitiendo que se implementen primero las nuevas ideas o cambios en este modelo y ver su funcionamiento evitando costes y riesgos para después poder pasarlo a la realidad sabiendo exactamente como debería de comportarse el sistema productivo frente a esas nuevas implementaciones, todo esto gracias a alimentar el modelo con datos reales del funcionamiento de la maquina esto lo diferencia completamente de un modelo realizado con datos teóricos o sin saber correctamente como es el funcionamiento de la máquina debido a que al no coincidir los datos con los teóricos no puedes saber cómo reaccionará tu sistema real frente a las modificaciones que hayas implantado en tu modelo con datos teóricos. Se marca que para realizar la operación la fresadora HAAS no requiere de ningún operario de ahí que el número de operarios sea cero.

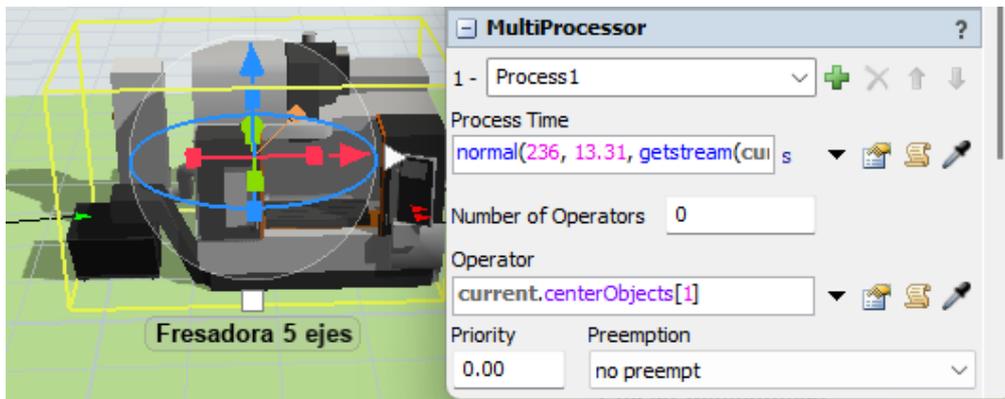


Figura 33: Configuración del tiempo de procesado de la fresadora HAAS.

Como se ha mencionado anteriormente se realiza un control de calidad a la salida de la fresadora, este control de calidad se simula gracias a la pestaña Output o salida en el apartado de send to port o enviar al puerto donde se le ha asignado dos porcentajes uno de 98% el cual corresponde con el porcentaje de piezas buenas, las cuales el operario al recogerlas las mandara al almacén de piezas buenas y el 2% restante corresponde con las piezas defectuosas las cuales se transportaran al almacén de piezas defectuosas. El operario es el encargado de transportar las piezas debido a que se ha marcado la opción de usar transporte y se le ha asignado esta tarea al dispatcher o controlador del que se hablara un poco más adelante y es el encargado de mandar al operario a realizar las tareas.

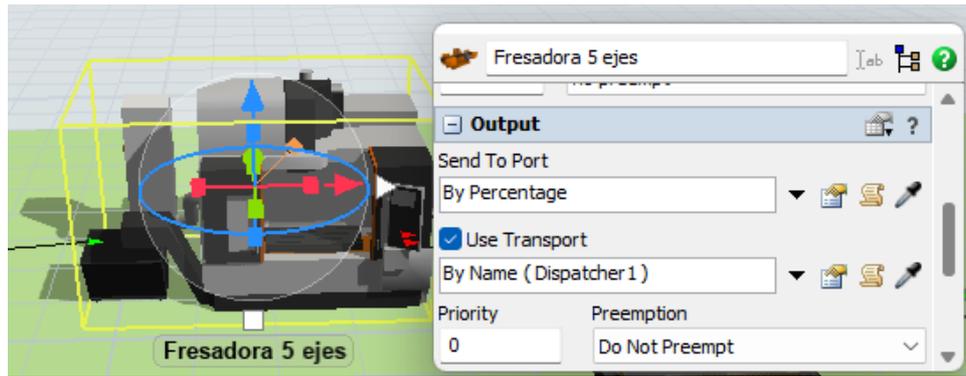


Figura 34: Configuración del output o salida de la fresadora HAAS.

Además, para darle un mayor nivel a la simulación en el apartado de triggers o activadores se ha configurado a la fresadora HAAS para que cuando termine el tiempo de procesado cambie el aspecto de la pieza inicial que era una barra de acero en bruto y le dé el aspecto de la pieza final que es la que se fabrica se muestran en la figura 33 simulando así las operaciones de trabajo.

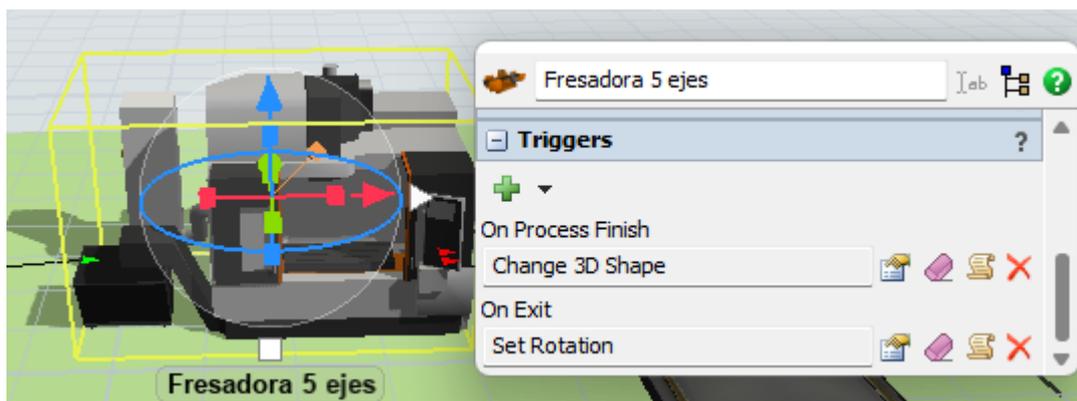


Figura 35: Configuración de los triggers o activadores de la fresadora HAAS.

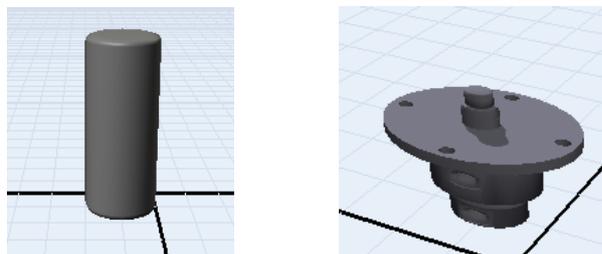


Figura 36: Cambio de aspecto del producto tras las operaciones.

Con esto finalizaría la configuración de la fresadora HAAS y se añadiría los dos almacenes intermedios que ya se han mencionado anteriormente donde se depositarán las piezas buenas y defectuosas. Estos dos almacenes tienen las mismas características que el primer almacén intermedio, pero se diferencia en que tanto para las piezas buenas como para las piezas defectuosas se almacenan en lotes de 5 unidades antes de ser recogidos por el operario y llevados a la salida o sink.



Figura 37: Almacenes de piezas defectuosas y piezas buenas.

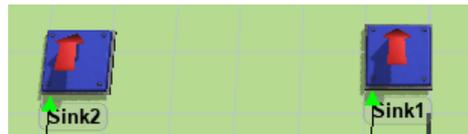


Figura 38: Salida de las piezas o sink.

Y para finalizar con el primer escenario de investigación se configura el operario y el dispatcher o controlador el cual sirve como punto de decisión para cuando el operario tiene dos o más tareas simultaneas que realizar ahí es cuando entra el controlador. Al controlado se le configura que realice las tareas por orden de prioridad priorizando así las tareas más importantes. Esto se hace para que el operario sea más eficiente a la hora de realizar las tareas o de transportar el producto de un lado a otro priorizando así atender a la máquina herramienta antes que todo lo demás.

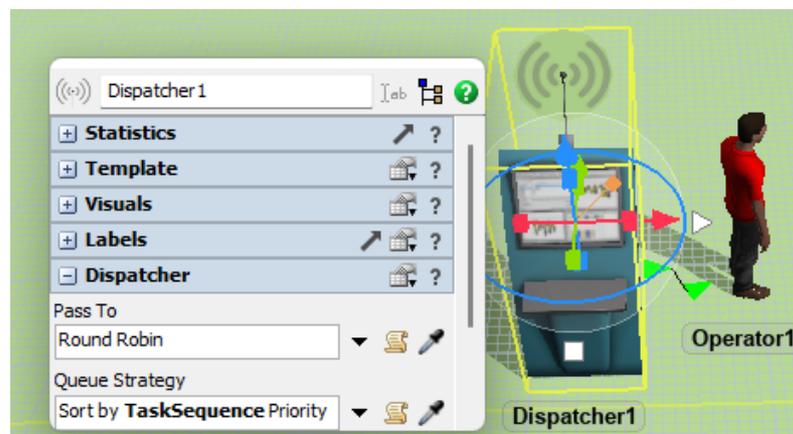


Figura 39: Configuración del dispatcher o controlador y del operario.

Tras terminar de configurar todos los elementos necesarios se debe de establecer la conexión entre ellos para que se pueda realizar el flujo de información o de los materiales entre sí. Para poder realizar esta conexión se debe de seleccionar la opción de conectar objetos (tipo A) cuando se quieran unir por ejemplo la fuente o source con el almacén intermedio o con la fresadora HAAS, es decir, todas las conexiones entre objetos se realizaran con este tipo de conexión sin embargo cuando la conexión sea entre un medio de transporte o persona, es decir, entre centros se deberá de utilizar la conexión (tipo S) en nuestro caso se ha utilizado esta conexión para unir el operario con el controlador o dispatcher. Estos tipos de conexiones se encuentran en el menú principal de FlexSim tal y como se muestra en la figura 40.

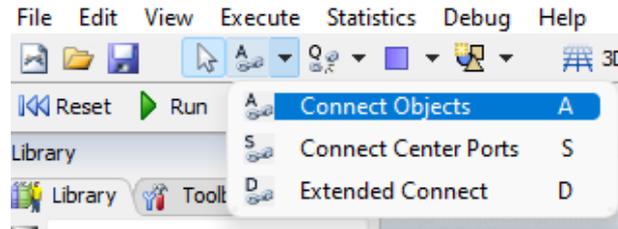


Figura 40: Conexión entre objetos.

Con todos los elementos configurados se puede poner en marcha la simulación para obtener los resultados se va a simular la producción durante 1 hora o 3600 segundos.

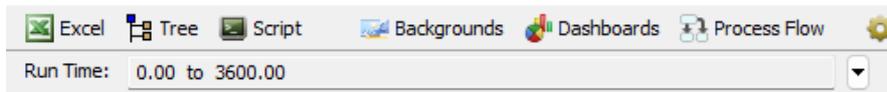


Figura 41: Duración de la simulación.

Como se puede ver en los resultados tras simular la producción del entorno productivo durante 1 hora se obtiene que en el almacén intermedio sin procesar se encuentran 20 piezas, que la producción de la fresadora HAAS durante esa hora ha sido de 14 piezas de las cuales 13 de ellas son buenas y 1 pieza ha salido defectuosa. El tiempo de procesado medio de la fresadora HAAS ha sido de 239 segundos la cual ha estado trabajando un 91,07% del tiempo a diferencia del operario que ha estado tan solo un 12.48 % de tiempo ocupado.

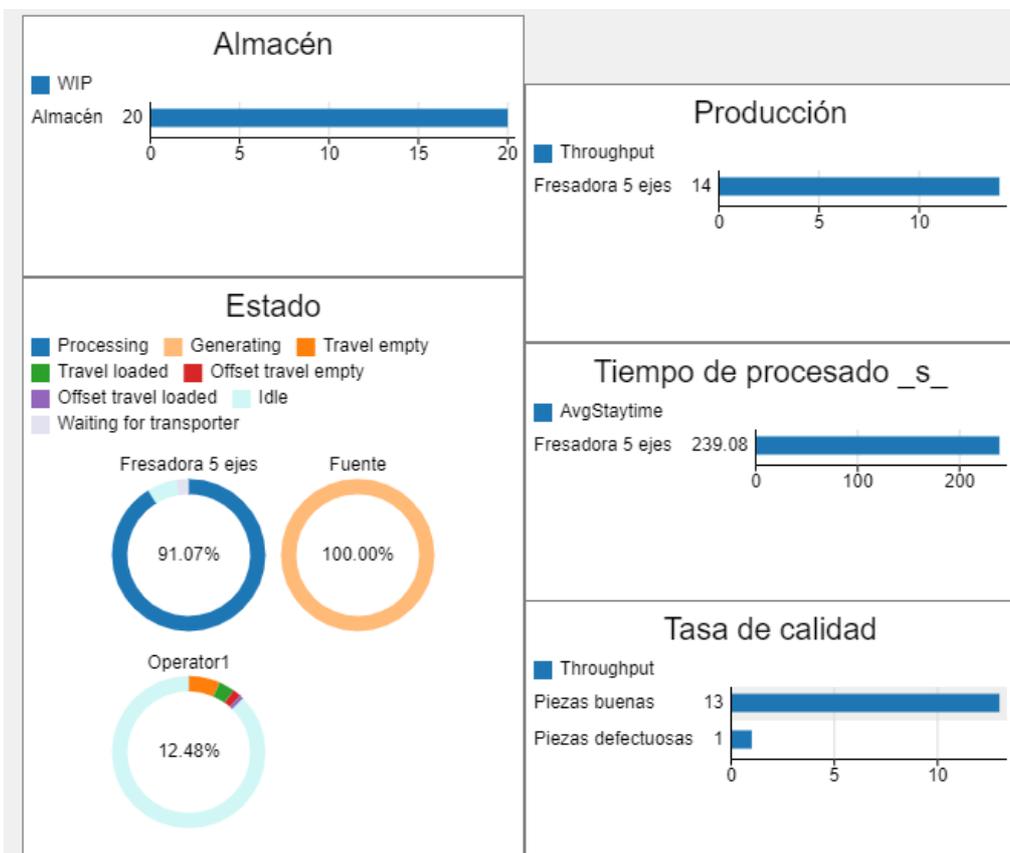


Figura 42: Resultados del escenario de investigación 1.

4.3. E2. HAAS + TORNO

El segundo escenario de investigación se realiza con la base del primero y se le añade el torno PINACHO que también se parametriza con los datos reales de la máquina gracias a que también se encuentra sensorizada. En este segundo escenario se va a estudiar el comportamiento del entorno productivo si se colocan las dos máquinas en serie para que las piezas que tengan que ser primero torneadas y después fresadas una vez salgan del torno continuación pase por la fresadora cambiando así la manera de trabajar de tornear primero todas las piezas y cuando estas hayan terminado que pasen todas las piezas por la fresadora. Como el modelo está alimentado con datos reales que se han obtenido mediante los sensores esta simulación podrá simular con exactitud los resultados que se pueden obtener en la realidad si se realizase este cambio lo cual puede ahorrar mucho tiempo en caso de que se quiera implementar esta idea o evitar costes siendo que no fuese viable.



Figura 43: Escenario de investigación 2.

A diferencia de la fresadora HAAS la cual se modelaba con una distribución normal 236 con una desviación 13.31 el torno PINACHO sigue una distribución normal 269 con una desviación 16.97, su tiempo de procesado es un poco mayor al de la fresadora HAAS.

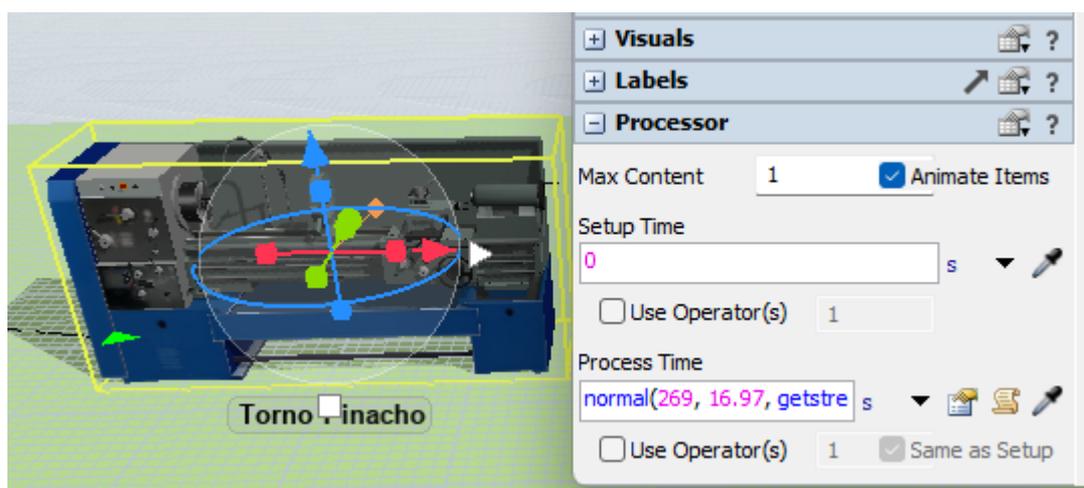


Figura 44: Configuración torno PINACHO.

El torno se conecta directamente con la fresadora y se le indica que en momento que la fresadora HAAS esté disponible le envíe el material y este material será transportado por el operario debido a que se marca la casilla de usar transporte.

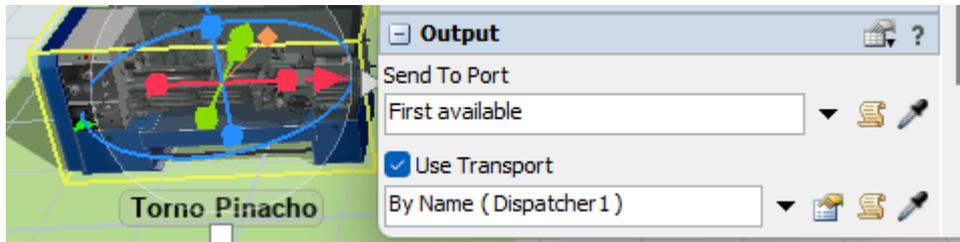


Figura 44: Configuración del output del torno PINACHO.

Tras configurar el torno se simula el programa también durante 1 hora y se obtiene que se encuentran 22 artículos en el almacén sin ser procesados, la producción total sería de 11 piezas porque son las que han pasado por las dos máquinas hay una pieza que se ha quedado sin terminar porque el torno PINACHO tiene una producción de 12 piezas y la fresadora HAAS de 11, el tiempo de procesamiento medio de la fresadora HAAS es de 236,90 segundos y el torno PINACHO de 272,79 segundos con una tasa de calidad durante la hora de simulación de 11 piezas buenas. Por otro lado, se puede ver que el torno PINACHO ha estado trabajando un 93,44% de tiempo frente al 76,43% del tiempo que ha estado trabajando la fresadora HAAS. Los operarios uno y dos han estado ocupados solo un 7 y 5 % del tiempo.

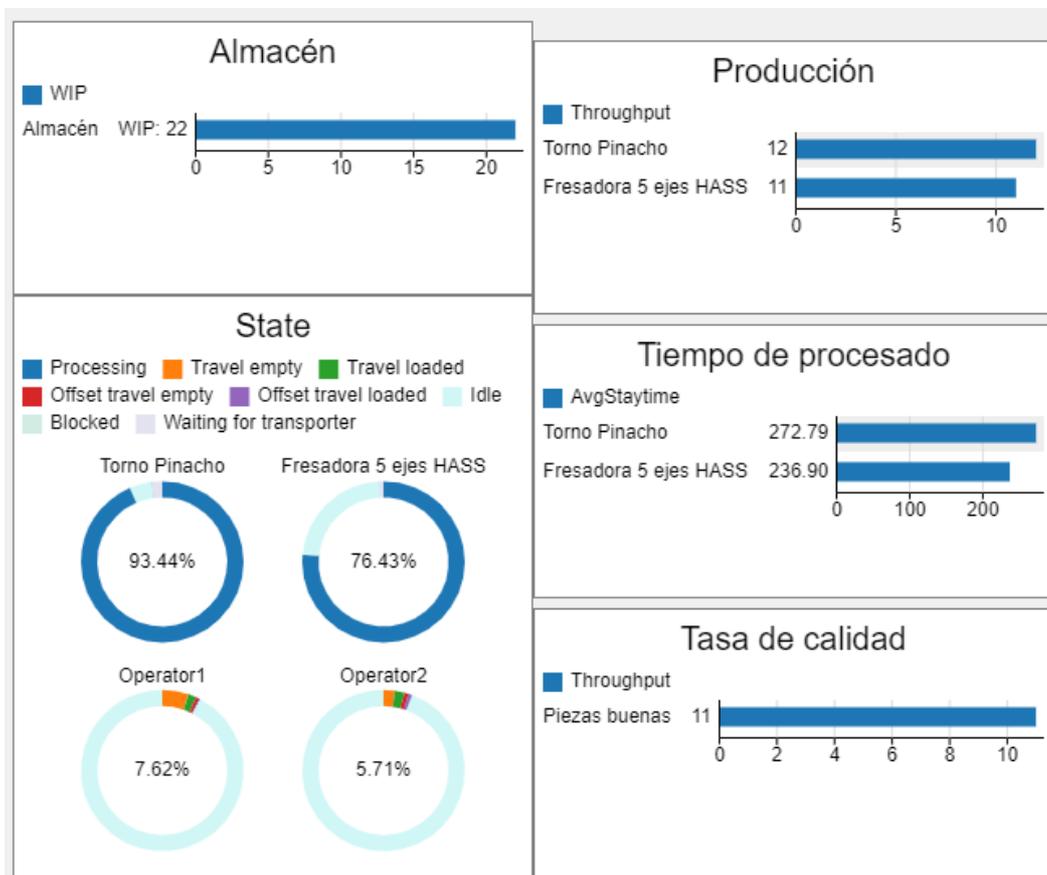


Figura 44: Resultados del escenario de investigación 2.

4.4. E3. HAAS+ TORNO + AGV

Y el ultimo escenario de investigación se modela a partir del segundo, pero la diferencia es que se eliminan los operarios al ver el bajo porcentaje de ocupación que se tenía y ver si es viable introducir un AGV que realizara las funciones que antes realizaban estos operarios. Al estar el modelo realizado con datos reales este modelo puede servir como prototipo para experimentar e introducir mejoras. Se han introducido el recorrido que debe de llevar el AGV para atender a las diferentes máquinas y poder así ir recogiendo el producto y depositarlo donde sea necesario.

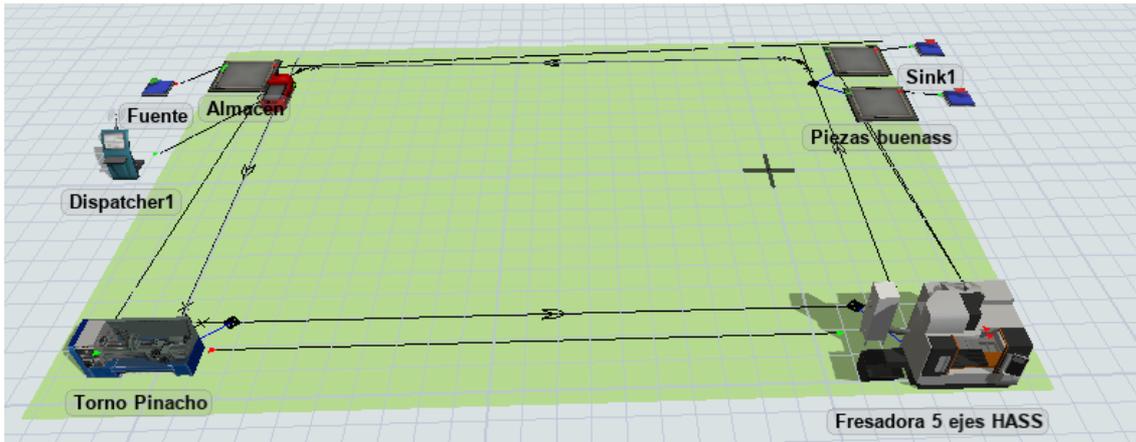


Figura 45: Escenario de investigación 3.

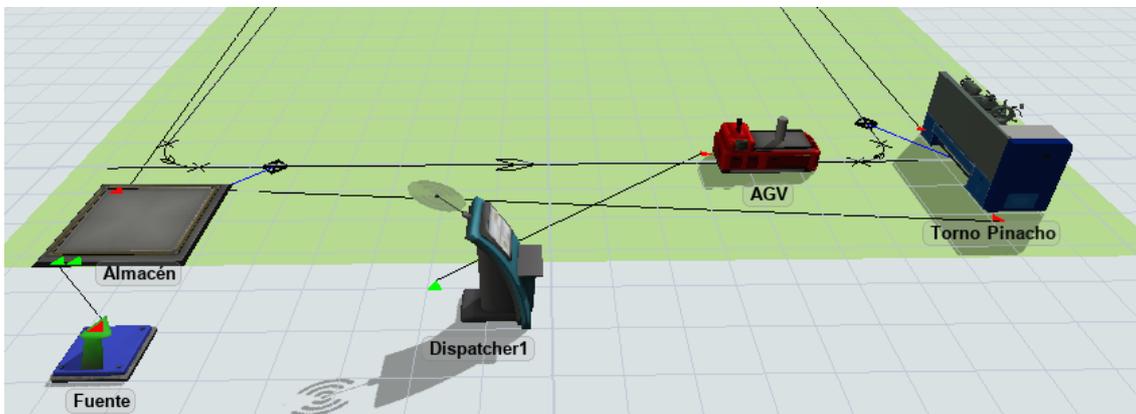


Figura 46: AGV transportando producto.

Tras correr la simulación durante 1 hora se obtiene que en el almacén intermedio se han quedado 26 piezas sin procesar se ha tenido una producción de 8 piezas de las cuales las 8 piezas son buenas, el torno ha tenido un tiempo de procesado medio de 313,08 segundos y la fresadora HAS 248, 99 segundos y se puede ver que el AGV ha estado ocupado un 37% del tiempo frente al 70,88% del torno PINACHO y el 54% de la fresadora HAAS. Se puede ver que las dos máquinas han tenido una disminución de su tiempo de procesado debido a que hay un pequeño porcentaje del tiempo que han estado esperando al AGV para transportar el producto.

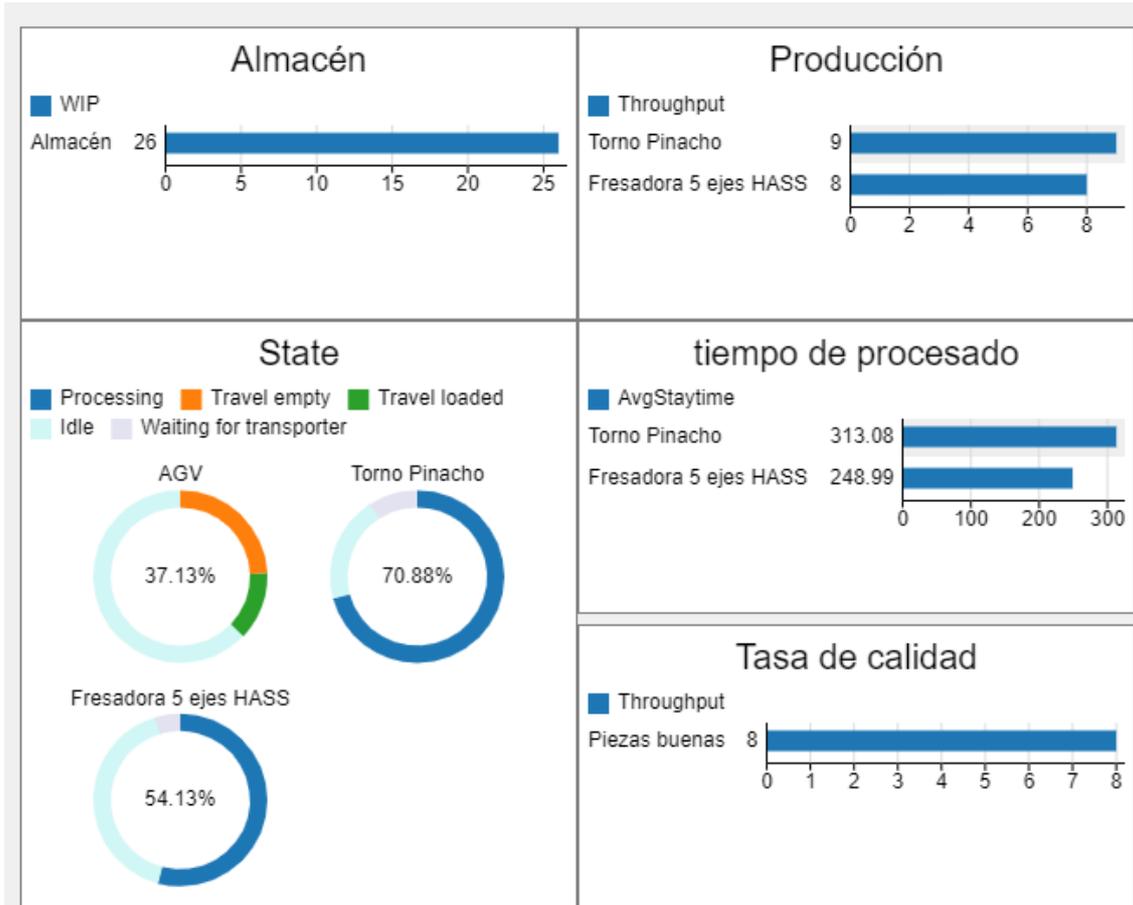


Figura 47: Resultados del escenario de investigación 3.

5. COCLUSIONES

Se ha conseguido definir en este proyecto unas pautas o directrices a seguir para poder estandarizar el modelado no solo de este gemelo digital sino de todo gemelo digital aplicado a cualquier proceso productivo gracias a la investigación previa que se ha llevado a cabo de como definir de forma teórica un gemelo digital, también se ha analizado y determinado cuales de los softwares en propiedad de la cátedra TECNALIA son capaces de modelar un gemelo digital pudiendo representar las tres dimensiones que la componen (dimensión geométrica, dimensión física y dimensión de comportamiento). Tras seleccionar el software con el que modelar el gemelo digital y los escenarios de investigación se ha analizado el programa identificando los diferentes elementos que este puede simular, a su vez se han identificado las diferentes variables de entrada o inputs que admite el software para caracterizar los elementos que componen el laboratorio 4.0 (fresadora HAAS y torno PINACHO) y las variables de salida u outputs que devuelve el programa y relacionándolos con los posibles KPI's o indicadores que se pueden obtener con estas salidas. También se ha realizado un estudio en el software para poder implementar los datos tomados por los sensores en tiempo real directamente en el software, acabando con la simulación y análisis de tres escenarios distintos del laboratorio 4.0 con datos reales del funcionamiento de las máquinas lo cual permite que estos escenarios de investigación sean asemejen a la realidad lo máximo posible sirviendo, así como posibles prototipos para implementar mejoras, o cambios.

Gracias al estado del arte y análisis previo realizado sobre como definir de forma teórica el gemelo digital se ha podido crear unas directrices que permitan modelar el gemelo digital debido a que no hay standard de como modelar un gemelo digital, aunque hay grupos de trabajo como el de ISO/IEC JTC 1 y organizaciones que están trabajando en desarrollar la primera normativa internacional la cual contendrá las descripciones de los conceptos más importantes, casos de uso y modelos de referencia para el gemelo digital, con el objetivo de ofrecer una base sólida y estructurada a la hora de diseñar gemelos digitales. Se ha definido el gemelo digital dividiéndolo en cinco elementos: entidad física que es el objeto real que se simular, entidad virtual que es la réplica virtual de la entidad física, los datos los encargados de alimentar a la entidad virtual, la conexión el encargado de mantener a las dos entidades en contacto (real y virtual) y los servicios que son las prestaciones que puede ofrecer el gemelo digital.

Los tres escenarios e investigación que se han llevado a cabo se han realizado con datos reales del funcionamiento de las máquinas del laboratorio 4.0 lo que esto aporta valor al laboratorio 4.0 debido a que cuenta con un gemelo digital creado con sus datos y con el cual puede realizar simulaciones y diferentes ensayos así como poder implementar cambios e ideas de mejora previamente en el gemelo digital y ver sus resultados y poder seguir trabajando en el resto de los cuatro elementos que componen el gemelo digital.

Durante la realización del trabajo se han afrontado varias limitaciones tales como: escasez de directrices para la definición e integración de un gemelo digital o digital twin, falta de estandarización para la modelización con datos en tiempo real en el modelado de un gemelo digital, limitaciones con el software de modelado FlexSim debido a que para la realización de este trabajo se contaba con una licencia de estudiante

y esta no suministra acceso a todas las funcionalidades que permite usar este potente software de modelado 3D.

Como líneas futuras de este proyecto quedara usar una licencia que permita la conexión directa de los datos de las máquinas al simulador, emplear un AGV en el entorno física que permita trabajar en el estudio de la adquisición de datos reales como se ha hecho con las Máquinas-Herramientas y trabajar en el resto de los aspectos del gemelo digital.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Lis data solutions, “¿Qué es la Industria 4.0?,” *Lis data solutions*, 2023. <https://www.lisdatasolutions.com/es/blog/que-es-la-industria-4-0/> (accessed Aug. 31, 2023).
- [2] Blog Toyota, “¿Qué es la Industria 4.0 y en qué consiste?,” *Jaime Mira Galiana*, 2023. <https://blog.toyota-forklifts.es/industria-4.0-que-es-caracteristicas#:~:text=Se%20trata%20de%20la%20evoluci%C3%B3n,vez%20m%C3%A1s%20la%20Inteligencia%20artificial> (accessed Aug. 31, 2023).
- [3] Deloitte, “¿Qué es la Industria 4.0? | Deloitte España,” *Deloitte*, 2020.
- [4] Xataka, “Digital twins: qué son, para qué sirven y cuáles son los beneficios y problemas de los gemelos digitales,” *ARANTXA HERRANZ*, 2021. <https://www.xataka.com/pro/digital-twins-que-sirven-cuales-beneficios-problemas-gemelos-digitales#:~:text=Qui%C3%A9n%20invent%C3%B3%20los%20gemelos%20digitales,concepto%20de%20fabricaci%C3%B3n%20en%202002> (accessed Aug. 31, 2023).
- [5] “The digital twin in battery cell production Potential for efficient and sustainable production 2 3 Content.” [Online]. Available: www.ffb.fraunhofer.de
- [6] K. Wang, Y. Wang, Y. Li, X. Fan, S. Xiao, and L. Hu, “A review of the technology standards for enabling digital twin,” *Digital Twin*, vol. 2, 2022, doi: 10.12688/digitaltwin.17549.2.
- [7] Xataka, “Digital twins: qué son, para qué sirven y cuáles son los beneficios y problemas de los gemelos digitales,” *ARANTXA HERRANZ*, 2021. <https://www.xataka.com/pro/digital-twins-que-sirven-cuales-beneficios-problemas-gemelos-digitales#:~:text=Qui%C3%A9n%20invent%C3%B3%20los%20gemelos%20digitales,concepto%20de%20fabricaci%C3%B3n%20en%202002> (accessed Aug. 31, 2023).
- [8] SYDLE, “Tecnologías de la Industria 4.0: ¿Qué son y cómo funcionan?,” *SYDLE*, 2022. <https://www.sydle.com/es/blog/tecnologias-de-la-industria-4-0-60e486e2b2503757978621a0> (accessed Aug. 31, 2023).
- [9] Advanced Factories, “Calidad 4.0: Procesado de Big Data,” *Advanced Factories*, 2019. <https://www.advancedfactories.com/calidad-4-0-procesado-de-big-data/> (accessed Aug. 31, 2023).
- [10] Lis data solutions, “¿Qué es la Industria 4.0?,” *Lis data solutions*, 2023. <https://www.lisdatasolutions.com/es/blog/que-es-la-industria-4-0/> (accessed Aug. 31, 2023).
- [11] IEBS, “Industria 4.0: Qué es, beneficios y ejemplos,” *JUAN LUIS DE LOS RÍOS SÁNCHEZ*, 2023. <https://www.iebschool.com/blog/industria-cuarta-revolucion-industrial-business-tech-logistica/> (accessed Aug. 31, 2023).

- [12] GitHub, “Glossary of Digital Twins,” *caseymullen*, 2021.
<https://github.com/digitaltwinconsortium/dtc-glossary/blob/main/glossary.md#glossary-of-digital-twins> (accessed Aug. 31, 2023).
- [13] *economipedia*, “Producción por lotes,” *Myriam Quiroa*, 2021.
<https://economipedia.com/definiciones/produccion-por-lotes.html> (accessed Aug. 31, 2023).
- [14] IBM, “Cómo las tecnologías de la Industria 4.0 están cambiando la manufactura,” *Industria 4.0*, no. 8, 2021.
- [15] C. R. F. B. Flores, “Uso del OEE y Lean para el incremento de la eficiencia en operaciones productivas,” *Procedia CIRP*, no. May, 2020.
- [16] H. Yamamoto, “Technical trends in ISO/IEC joint Technical Committee 1,” *NTT Technical Review*, vol. 17, no. 7, 2019.
- [17] L. Vargas, “Simulación de un proceso industrial mediante el software FlexSim.,” *Universidad de Alicante*, 2012.



Universidad
Zaragoza



Escuela de
Ingeniería y Arquitectura
Universidad Zaragoza