

## Colaboración entre agentes industriales de componentes de control encapsulados

Rubén Sierra, Isabel Sarachaga, Arantazu Burgos, Nagore Iriondo, María Luz Álvarez\*

*Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Escuela de Ingeniería de Bilbao, UPV/EHU, Plaza Ingeniero Torres Quevedo, nº 1, 48013, Bilbao, España.*

**To cite this article:** Sierra, R., Sarachaga, I., Burgos, A., Iriondo, N. Álvarez, M.L., 2025. Collaboration between industrial agents of encapsulated control components. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial 22, 81-91. <https://doi.org/10.4995/riai.2024.21953>

### Resumen

Los retos tecnológicos de la Industry 4.0 en el ámbito de la fabricación inteligente requieren abordar la creciente complejidad de los sistemas de producción automatizados para optimizar la producción. Con tal fin, en este trabajo se presenta una estrategia de control distribuida y colaborativa basada en agentes industriales. Así, se propone un agente industrial que dota de inteligencia a unidades de control encapsuladas proporcionándoles la capacidad de llevar a cabo la negociación y coordinación tanto con otros agentes, como con otras aplicaciones relacionadas con el control y la supervisión de planta. Estas capacidades se describen mediante su integración en una arquitectura de control distribuida para cumplir los objetivos de producción. Su aplicabilidad se muestra en la prueba de concepto que forma parte de una célula flexible de ensamblaje. Este enfoque de agente industrial permite adoptar una tecnología facilitadora de Industry 4.0 sin costos elevados.

*Palabras clave:* Control de planta de fabricación; Sistemas de fabricación inteligentes; Control de actividades de producción; Control descentralizado y distribuido; Sistemas multiagente aplicados a sistemas industriales.

### Collaboration between industrial agents of encapsulated control components

#### Abstract

The technological challenges of Industry 4.0 in the field of smart manufacturing require addressing the increasing complexity of automated production systems to optimize production. To this end, this work presents a distributed and collaborative control strategy based on industrial agents. Thus, an industrial agent is proposed, which endows encapsulated control units with intelligence, providing them with the ability to negotiate and coordinate with other agents as well as with other applications related to plant control and supervision. These capabilities are described through their integration into a distributed control architecture to meet production objectives. Its applicability is demonstrated in the proof of concept that is part of a flexible assembly cell. This industrial agent approach allows the adoption of an Industry 4.0 enabling technology without high costs.

*Keywords:* Manufacturing plant control; Intelligent manufacturing systems; Production activity control; Decentralized and distributed control; Multi-agent systems applied to industrial systems.

### 1. Introducción

Los retos actuales de la fabricación en el ámbito de Industry 4.0 (I4.0) precisan sistemas de producción automatizados (aPS - automated Production Systems) flexibles y adaptables para afrontar una producción personalizada de productos de alta calidad. Pero la extendida estrategia de control centralizada proporciona una visión global del aPS que conlleva una

complejidad creciente incapaz de afrontar los requisitos actuales de fabricación. (Estrada Jiménez et al., 2022).

Sin embargo, una estrategia de control distribuida divide la complejidad entre un número de entidades que abordan objetivos de control parciales más asumibles. Si a dichas entidades se les añade inteligencia con toma de decisiones en un entorno dinámico se hace referencia a agentes distribuidos y la arquitectura de control se configura como un conjunto de agentes que recopilan información, toman decisiones y

solicitan operaciones a los equipos de planta. Si bien estos agentes aportan un comportamiento más robusto y mejoran la flexibilidad respecto a la estrategia de control centralizada, también es cierto que precisan algoritmos de toma de decisiones que estén alineados con los objetivos y restricciones de producción, así como mecanismos para la resolución de conflictos (Kovalenko et al., 2022).

No obstante, la transición hacia este enfoque no es ni trivial ni barata, en especial para las PYMES (Haben et al., 2021), (Najjari et al., 2021), (Belman-López et al., 2023). La compatibilidad e interoperabilidad son aspectos clave que precisan estándares con buenas prácticas para guiar a los equipos de desarrollo, tal y como abordan las especificaciones FIPA (Foundation for Intelligent Physical Agents) (FIPA, 2024). Pero en el caso de los aPS, también es necesario tener en cuenta el condicionante del ámbito industrial en el que se van a usar. Así, la norma IEEE 2660.1 (IEEE, 2020) define el agente industrial como una entidad que integra un agente software con un activo físico que ejecuta operaciones de automatización de bajo nivel. Esta norma también proporciona un procedimiento para recomendar el mejor interfaz para dicha integración sin ceñirse a un interfaz concreto.

La norma no se ha desarrollado para una arquitectura de referencia específica. En (Leitão et al., 2023) se analiza su encaje en las arquitecturas RAMI 4.0 (Reference Architecture Model Industry 4.0), IIRA (Industrial Internet Reference Architecture) y SGAM (Smart Grid Architecture Model SGAM) para identificar su aplicabilidad, aspectos comunes y variantes, así como limitaciones y retos. Los autores concluyen que es viable su adopción en dichas arquitecturas, aunque se precisa investigar nuevos escenarios de aplicación para detectar posibles limitaciones.

Con esta premisa y dado que la tecnología de los agentes industriales se considera una tecnología facilitadora de I4.0 (Fay et al., 2019), (Vogel-Heuser et al., 2020), este trabajo propone el agente industrial MeiA que integra el software de control de una unidad de trabajo encapsulado en un componente MeiA (MeiAC) (Iriando et al., 2022) con una entidad software que aporta la inteligencia para realizar el proceso de negociación con los restantes agentes que constituyen la arquitectura de control del aPS. Estos agentes pueden suponer el primer paso para que las PYMES introduzcan esta tecnología en los sistemas de control de sus aPS.

La estructura del artículo es la siguiente: el apartado 2 presenta una revisión bibliográfica de trabajos relacionados con los agentes industriales. El apartado 3 expone la estructura del agente MeiA describiendo la integración de las dos entidades que lo constituyen, mientras que el apartado 4 presenta una estrategia de control colaborativo entre los agentes que componen la arquitectura de control de un aPS. El apartado 5 presenta una prueba de concepto que forma parte de la célula flexible de ensamblaje DISA FMS-200. El último apartado destaca las conclusiones del trabajo.

## 2. Trabajos relacionados

La implementación de escenarios apropiados en el contexto de I4.0 requiere unos principios de diseño (Belman-Lopez et al., 2020) a tener en cuenta en propuestas que contribuyan al

impulso de la I4.0 (Dintén et al., 2021), (Belman-Lopez et al., 2023), las cuales precisan tecnologías que faciliten la implementación de dichos principios. En (Tallat et al., 2024) se realiza una revisión exhaustiva de la bibliografía sobre la evolución de las más prometedoras tecnologías facilitadoras, catalogando los sistemas multi-agentes (Multi-Agent System - MAS) como un acelerador tecnológico muy adecuado para la implementación de los CPS (Cyber-Physical System) en los dominios industriales.

También en (Dai et al., 2024) consideran que los agentes industriales constituyen una de las tecnologías clave en los ámbitos de operación, información y comunicación para sustentar la transición digital y ecológica de los sistemas de automatización industrial con ICPS (Industrial CPS), ya que heredan los principios de inteligencia, autonomía y cooperación de los agentes software al tiempo que satisfacen los requisitos y normas de los entornos industriales. Así, los agentes industriales proporcionan capacidades de control e inteligencia distribuida para apoyar la toma de decisiones que combinadas con las características autónomas y cooperativas transforman las máquinas tradicionales en máquinas inteligentes para control, supervisión, optimización y diagnóstico.

Los trabajos relacionados con sistemas multi-agente para el control de los aPS proponen distintos tipos de agentes y utilizan diferente nomenclatura para referirse a agentes con la misma funcionalidad (Najjari et al., 2021), (Haben et al., 2021), (Estrada Jiménez et al., 2022), (Bennulf et al., 2020), (López, A., et al, 2023). No obstante, en producción, una gran mayoría de las arquitecturas se basan en la cooperación y la toma de decisiones de dos tipos de agentes: agentes de producto y agentes de recurso (Kovalenko et al., 2023). Este agente recurso es el que se corresponde con el agente industrial, el cual engloba al agente máquina y al agente transporte (López, A., et al, 2023).

Teniendo en cuenta todo el conocimiento adquirido sobre CPS predecesores, en (Karnouskos et al., 2019) definen los requisitos de los CPPS (Cyber-Physical Production Systems) basados en agentes industriales e identifican cuatro ámbitos de investigación: (1) patrones de diseño para agentes y CPPS, precisando mayor atención la consolidación de patrones de comportamiento frente a los patrones estructurales más abordados en la literatura; (2) interfaces para agentes y CPPS, con mayor atención en la interacción entre la parte cibernética (el agente) y la parte física (el dispositivo hardware de control de automatización), ya que la interacción entre agentes está regulada por las especificaciones FIPA (Fay et al., 2019); (3) nuevas métricas o adaptaciones de las métricas estándares existentes, con especial interés en la interacción entre agentes y CPPS, para evaluar las soluciones propuestas; y (4) la incorporación de la inteligencia artificial para trasladar algunos aspectos de inferencia o aprendizaje automático a los CPPS.

En un trabajo posterior (Karnouskos et al., 2020), los autores definen una nueva generación de IPCS que operan en un ecosistema más amplio, con gran cantidad de servicios, interacciones tanto reactivas como proactivas, y comunicación entre los participantes inteligentes. Esta visión conlleva algunos retos relacionados con su gestión, ingeniería, capacidades, infraestructuras, ecosistemas y sistemas de información. Para acometer estos retos se precisan estándares,

metodologías con recomendaciones prácticas y herramientas que ayuden a emplear con éxito los agentes industriales.

Precisamente, el estándar IEEE 2660.1 (IEEE, 2020) define el agente industrial como un agente software especializado en la gestión inteligente de la funcionalidad de un dispositivo de planta, diferenciando dos entidades asociadas con dos niveles de control: HLC (High-Level Control) que proporciona la inteligencia para la toma de decisiones estratégicas y LLC (Low-Level Control) que aborda el control del funcionamiento del aPS en tiempo real (Figura 1). Asimismo, dicha norma describe patrones genéricos para los interfaces de interconexión entre el agente software y el activo físico. Aplicables en distintos dominios e independientes de la tecnología subyacente, estos patrones se definen en base al modo de interacción y ubicación. El modo de interacción hace referencia a la forma en que se realiza la interacción entre el agente y el activo físico: fuertemente acoplada o débilmente acoplada. La ubicación indica dónde se ejecuta el agente software: en el mismo equipo informático que el activo físico o en un equipo remoto. Por tanto, según sea la combinación de estos dos aspectos se dispone de diferentes soluciones tecnológicas. Por ejemplo, en un enfoque cliente-servidor se podría usar OPC UA (OPC Unified Architecture), REST (Representational State Transfer), Modbus, etc., mientras en un enfoque de publicación/suscripción se podría usar MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) u OPC UA (Leitão et al., 2023).

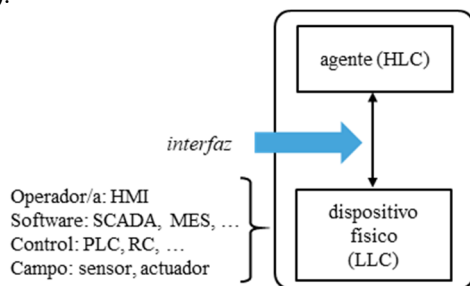


Figura 1: Agente industrial (traducido del estándar IEEE 2660.1-2020)

También el estándar VDI/VDE 2653-4 (VDI/VDE, 2022) ofrece patrones y arquitecturas con las correspondientes recomendaciones que ayudan en el desarrollo de aplicaciones basadas en agentes para la automatización industrial. Esta parte se acompaña de versiones actualizadas de otras tres partes: VDI/VDE 2653-1 (VDI/VDE, 2018) aborda los conceptos básicos y terminología de los agentes y MAS en la automatización industrial; VDI/VDE 2653-2 (VDI/VDE, 2018) aporta criterios para la selección de métodos y plataformas de agentes; y VDI/VDE 2653-3 (VDI/VDE, 2020) presenta casos prácticos en diversos campos de aplicación.

Las soluciones MAS para producción inteligente no adoptan las metodologías de Ingeniería de Software Orientada a Agentes y usan enfoques alternativos centrados en soluciones CPS basadas en agentes (Sakurada et al, 2023a). Estos autores proponen un enfoque para la digitalización de los aPS no conformes con I4.0 a través de una evolución de las representaciones digitales de los activos (AAS - Asset Administration Shell). Comienzan por crear AAS pasivos que consisten en archivos estáticos que se intercambian digitalmente en el sistema, para evolucionar a AAS reactivos

que actúan como un API respondiendo a solicitudes externas, y finalmente evolucionar a AAS proactivos que toman decisiones e interactúan con otros AAS de forma autónoma adoptando la tecnología de agentes que siguen los principios de la arquitectura orientada a servicios (SOA). En (Sakurada et al, 2023b) se propone una metodología de integración de AAS pasivos/reactivos y MAS para desarrollar estos AAS proactivos, teniendo en cuenta un trabajo previo (Sakurada et al, 2020) que se centra en cómo se asignan las características MAS para implementar las funcionalidades de los AAS basándose en las descripciones de RAMI 4.0. No obstante, esta metodología define los principales aspectos a tener en cuenta en la integración, pero precisa ser extendida para abordar diferentes escenarios y estrategias de interacción.

En (Baumgärtel and Verbeet, 2020) abordan los agentes técnicos conducidos por objetivos de la primera versión de la norma VDI/VDE 2653 (VDI/VDE, 2010) mediante agentes BDI (Belief, Desire, Intention) capaces de comportarse de forma proactiva, ya que su modelo interno les permite evaluar los efectos de sus decisiones. Estos agentes BDI permiten implementar un AAS como un componente activo (Active Component Shell - ACS) que interactúa con otros ACS mediante servicios, pero la compatibilidad con los dispositivos hardware resulta un problema.

(López et al., 2021) proponen una arquitectura de cuatro capas (inteligencia, gestión, operativa y funcional) para la implementación de componentes I4.0 (Aragón et al., 2022), así como una metodología de integración que detalla los pasos a seguir para aplicar dicha arquitectura. Las capas encapsulan funcionalidades en lugar de entidades para reducir la complejidad de las tareas gestionadas por cada capa. Dos capas (inteligencia y gestión) son responsabilidad del AAS basado en agentes y las otras dos capas (operativa y funcional) son responsabilidad del activo físico. La arquitectura propuesta es complementaria a la norma IEEE 2660.1 y puede aplicarse a las cuatro prácticas de integración consideradas en dicha norma, pero se focaliza más en la integración entre el AAS basado en agentes y el activo físico que en las partes que constituyen el componente I4.0.

En un trabajo posterior de los autores (López et al., 2023a) se analizan las soluciones de integración de activos físicos desde la perspectiva de los componentes I4.0 y CPS para identificar los requisitos que debe cumplir un enfoque que aborde dicha integración. Su propuesta se reduce a tres capas (servicio, operativa y funcional) independiente de la tecnología que se utilice y del tipo de activo que se integre. Dicho enfoque se complementa con una metodología de integración en cuatro etapas que proporciona indicaciones y recomendaciones prácticas para aplicar dicha propuesta multicapa, que además es complementaria a otras propuestas quedando pendiente la interoperabilidad entre los AAS.

En (Cruz Salazar and Vogel-Heuser, 2022a) conciben los CPPS mediante patrones de diseño de agentes industriales (Cruz Salazar et al., 2019) alineados con las normas VDI/VDE 2653-4 e IEEE 2660.1. Concretamente, su agente de acceso físico se basa en el agente recurso normalizado en VDI/VDE 2653-4, mientras que su agente interfaz se corresponde con el agente comunicación de dicha guía. Este último permite interconectar los agentes industriales con las funciones de automatización usando la recomendación IEEE 2660.1, para lo

cual proponen un AAS proactivo como medio normalizado de intercambio de información entre el HLC y el LLC. No obstante, pese a la existencia de herramientas abiertas disponibles, hay que tener en cuenta el esfuerzo para crear dichos AAS. También proponen incorporar la inteligencia artificial para crear agentes predictivos (Cruz Salazar and Vogel-Heuser, 2022b) y agentes con capacidad de aprendizaje que operen en entornos desconocidos.

Otros trabajos sobre agentes industriales prueban distintas tecnologías y/o persiguen diversos objetivos, pero no referencian los estándares de agentes industriales. En (Luchian et al., 2021) proponen una solución para integrar los agentes industriales con equipos de automatización propietarios empleando los dos protocolos de comunicación IIoT fundamentales (MQTT y OPC UA) en cada agente. En (Martyshkin, 2021) desarrollan un agente inteligente basado en tecnologías Node.js gestionado por una aplicación web para permitir la interacción entre dispositivos a través de Internet. En (Mustafa Yalcin et al., 2021) miniaturizan el sistema industrial manteniendo su funcionalidad, precisión y objetivos, usando tecnología Lego, para abordar la integración de CPS y agentes en el entorno educativo. En (Pérez Hernández et al., 2021) emplean virtualización basada en contenedores para relajar las dependencias en las plataformas MAS. En (Zhang et al., 2022) buscan paliar el efecto adverso de los agentes industriales poco fiables usando aprendizaje federado y cifrado homomórfico Cheon-Kim-Kim-Song (CKKS) para proteger la información privada de los agentes.

Pese a todos estos esfuerzos, un estudio reciente (Maldonado et al., 2024) afirma que todavía el diseño, desarrollo y coordinación de estos sistemas MAS es un reto pendiente. Por ello, proponen un modelo jerárquico de cinco niveles para organizar la integración de los agentes utilizados en las aplicaciones en función de sus características y una metodología con tres fases que pueden ser ejecutadas por un agente maestro en un esquema centralizado o por agentes autónomos en un esquema distribuido. Tanto el modelo como la metodología son genéricos para cubrir todas las posibles aplicaciones y configuraciones MAS, siendo necesaria su particularización para cada aplicación sin guías para ello. Además, el agente industrial que se correspondería con un tipo de “Node” no usa los estándares de agentes industriales.

Sin duda las normas IEEE 2660.1 y VDI/VDE 2653 han impulsado el paradigma de los agentes industriales, creando nuevas oportunidades de investigación para responder a los retos industriales. Sin embargo, la integración de activos físicos sigue siendo objeto de investigación, ya que se trata de una tarea compleja debido a la heterogeneidad en cuanto a las capacidades funcionales y de comunicación de los activos de las plantas industriales y las tecnologías propietarias asociadas que pueden ser un contratiempo si el activo no es compatible con las tecnologías utilizadas en el enfoque elegido.

Por otra parte, aunque se ha demostrado el potencial de los agentes industriales en distintos trabajos y dominios para optimizar el proceso de producción teniendo en cuenta situaciones conflictivas, exigencias de flexibilidad de la producción impuestas por el mercado y eficiencia de recursos, la realidad es que la aceptación industrial es muy limitada. Al coste asociado a la transformación digital, hay que añadir la falta de personal cualificado en estas tecnologías.

Este trabajo aspira a dar solución a estos dos aspectos utilizando dos modelos de información para realizar la integración de la unidad de trabajo física y su representación digital con acceso restringido y seguro, y utilizando las especificaciones FIPA para la interacción entre las entidades inteligentes con toma de decisión para alcanzar los objetivos de producción. Además, las tecnologías propuestas para su implementación son las utilizadas en el ámbito de la automatización industrial y se han seguido las recomendaciones del estándar IEEE 2660.1.

### 3. Agente industrial MeIA

El agente MeIA (Figura 2), al igual que todos los agentes industriales conformes al estándar IEEE 2660.1, está formado por el HLC y el LLC.

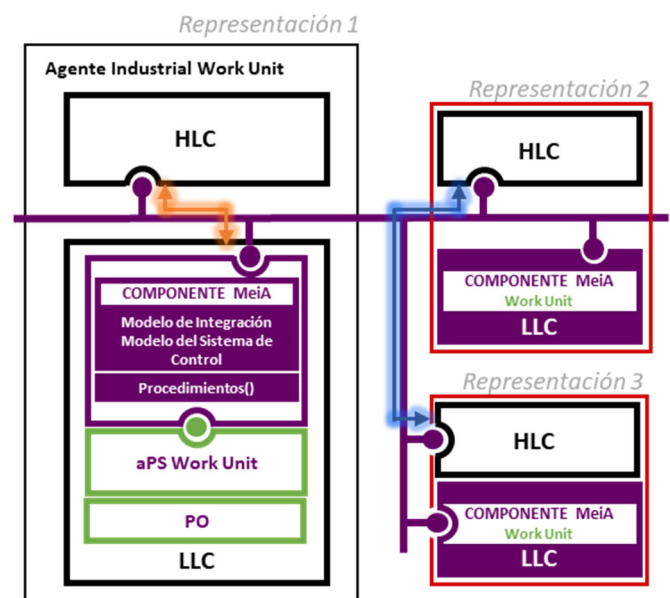


Figura 2: Tres representaciones del agente MeIA: representación 1 en formato detallado, y representaciones 2 y 3 en formato simplificado.

El LLC se corresponde con un MeIA que encapsula el software de control de una unidad de trabajo de un aPS, ofreciendo su funcionalidad a través de una interfaz que oculta todos los aspectos de implementación y le permite operar con otros componentes (Iriando et al., 2022).

La arquitectura del MeIA organiza los datos de entrada/salida en dos modelos de información manipulados por los procedimientos que realizan las operaciones de control. Concretamente, el Modelo de Integración (MI) organiza el estado de la unidad de trabajo y sus conexiones con el entorno, mientras el Modelo del Sistema de Control (MSC) recoge el estado de su software de control.

El MeIA está preparado para trabajar con diferentes estrategias de control: (1) Control Local para un funcionamiento en modo individual en el que se conecta a otros componentes, ofreciendo información y recibiendo comandos básicos de mando, pero sin permitir acceso a sus servicios de operación; (2) Control Jerárquico en el que el MeIA pone a disposición del control general la ejecución de las operaciones de mando, producción y auxiliares mediante sus servicios; y (3) Control Colaborativo, en el que el MeIA realiza el control

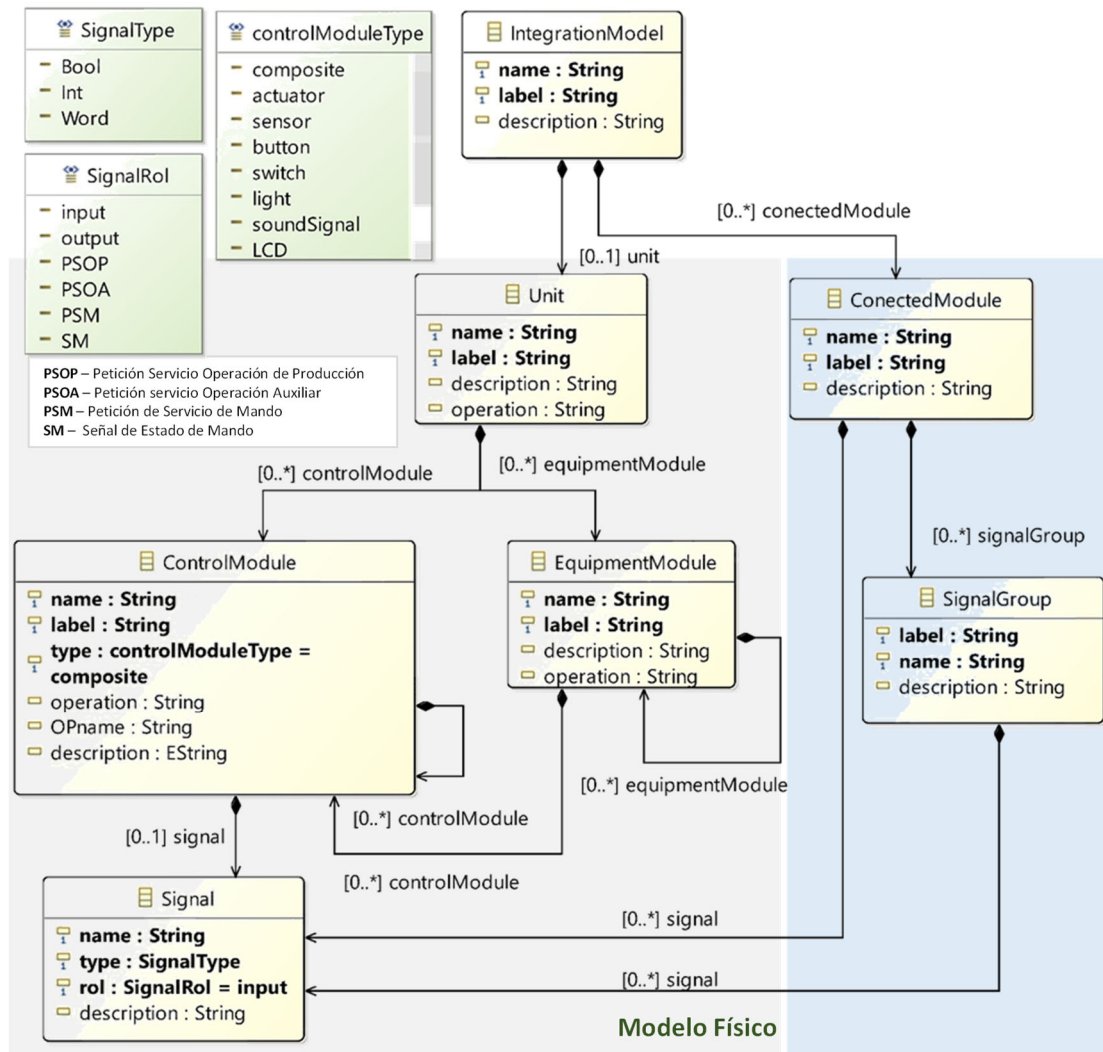


Figura 3: Metamodelo del modelo de integración (MI)

directo de la unidad de trabajo, así como la coordinación y ejecución de todas las operaciones a su cargo, poniendo sus servicios a disposición de su HLC.

El HLC proporciona la inteligencia necesaria al MeiAC para realizar el proceso de negociación de las operaciones con el resto de agentes que conforman el sistema.

La comunicación entre el HLC y el LLC se realiza a través de los modelos MI y MSC del MeiAC (flecha naranja en la Figura 2).

En la Figura 3 se muestra el diagrama de clases del metamodelo del modelo MI, formado por el modelo físico y por un conjunto de módulos conectados. El modelo físico está organizado de manera jerárquica, según el estándar IEC 61512 (IEC, 2002), en unidades, módulos de control y módulos de equipo, con las señales asociadas a las entradas y salidas del sistema de control. Los tipos de módulos de control que se contemplan van desde elementos primarios que se relacionan directamente con el aPS (un sensor o un actuador) o con los paneles de operación (un pulsador de marcha, un selector o un indicador luminoso), hasta módulos de control compuestos que agrupan a los primarios según sus funcionalidades (un cilindro, un variador de velocidad o un lazo de regulación). Por otro

lado, los módulos conectados representan las conexiones del componente con el entorno y contienen las señales o los grupos de señales con las peticiones de servicio (PS) y los comandos que pueden solicitar al MeiAC. Todas las señales se caracterizan por su tipo de dato y por su rol dentro del sistema. Los roles entrada y salida están relacionados con las señales físicas que conectan el aPS con el software de control, mientras que los roles de peticiones de servicio y mando realizan la conexión con los módulos conectados. Se distinguen tres tipos de peticiones de servicio según se solicite la realización de una operación de producción, una operación auxiliar o una operación de mando.

A su vez, el metamodelo del modelo MSC de la Figura 4 está formado por elementos de control organizados de forma jerárquica que pueden tener asociados procedimientos y sus señales de solicitud, repuesta y estado.

Concretamente, el MSC se crea a partir del modelo de proceso del estándar IEC 61512 que representa las operaciones agrupadas según las formas de mando del sistema (opciones *modeType*) acorde a las fases y tipo de operaciones (opciones *operationType*) de la metodología MeiA. (Álvarez et al., 2018). Dicho modelo se completa al asociar a estas

operaciones los procedimientos definidos en el modelo de control de procedimientos (también del estándar IEC 61512), así como las señales de control asociadas a cada procedimiento y a las operaciones identificadas.

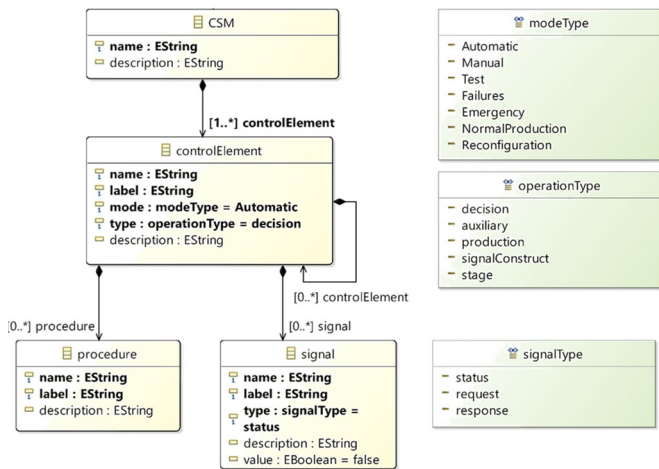


Figura 4: Metamodelo del modelo del sistema de control (MSC)

Ambos meta-modelos son utilizados en el desarrollo de una herramienta en el entorno Sirius (Sirius, 2024), la cual se ha utilizado para realizar la representación gráfica de los modelos de este trabajo.

En este contexto, cada MeiAC cuenta con la capacidad de realizar una serie de operaciones que se pueden solicitar a través de su MI. Este modelo incluye un módulo conectado donde están definidos los servicios que pueden ser solicitados por el HLC.

La comunicación del agente MeiA con otros agentes o aplicaciones se realiza a través de su HLC (flecha azul en la Figura 2). Para representar este intercambio de información en los procesos de negociación se utilizan diagramas de secuencia de acuerdo con la nomenclatura del protocolo Contract Net Protocol (CNP) de FIPA (FIPA, 2002a). La estructura de los mensajes conforme a ACL (Agent Communication Language) (FIPA, 2002b) sigue el protocolo de mensajería de FIPA, donde las performativas definen la intención del mensaje y las expectativas sobre cómo debe interpretarlo el receptor.

#### 4. Control colaborativo con agentes MeiA

Teniendo en cuenta el modelo de Actividad de Control del estándar IEC 61512 y las funcionalidades requeridas por el control colaborativo entre agentes MeiA se propone la arquitectura software de la Figura 5, cuyos módulos se describen a continuación:

- Planificador: genera el plan de producción.
- Gestor de Recetas: obtiene el plan de producción y genera la receta de control específica para cada montaje.
- Gestor de Arranque: coordina y controla el arranque y la parada de los agentes MeiA.
- Supervisor y HMI: visualiza en tiempo real el estado del proceso y gestiona los datos de estado y peticiones de mando.
- Producto: gestiona el ciclo de vida del producto. En la fase de producción dispone de la receta de control actualizada.

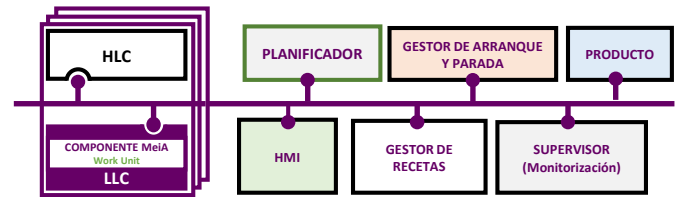


Figura 5: Arquitectura software para el control de un aPS

Conforme a esta arquitectura, se proponen dos estrategias de colaboración entre los agentes MeiA. En el primer escenario, el Gestor de Recetas comparte las recetas de control con todos los agentes implicados, los cuales ven la evolución de la receta de control y toman la iniciativa durante el proceso productivo. En el segundo escenario, el Gestor de Recetas proporciona la receta de control al producto encargado de solicitar los recursos necesarios.

##### 4.1 El agente MeiA toma la iniciativa

En este escenario, todos los agentes MeiA tienen acceso al conjunto de recetas de control, lo que les permite tomar decisiones sobre las tareas a realizar según las necesidades de producción y sus capacidades. Los agentes negocian entre sí para asignar responsabilidades y ejecutar operaciones de forma eficiente.

Este método permite adaptarse a cambios en las condiciones de producción y optimizar el uso de recursos, aunque la complejidad en la coordinación y comunicación puede afectar en el desarrollo del proceso.

##### 4.2 El producto solicita recursos

En este escenario, el producto es el que recibe y ejecuta la receta de control, solicitando a los agentes MeiA los recursos necesarios para realizar las operaciones de la receta. Para cada operación en la que haya más de un recurso que pueda ejecutarla, los respectivos agentes negocian y el que gana la negociación informa al producto que su recurso ha sido asignado para cumplir con dicha operación.

## 5. Caso de estudio

La prueba de concepto forma parte de la célula flexible de ensamblaje DISA FMS-200, la cual consta de un conjunto de unidades de trabajo (denominadas estaciones por simplicidad) conectadas por un sistema de transporte independiente, cuya finalidad es realizar montajes sobre palets. El proceso de montaje consiste en montar una base, colocar un rodamiento y un eje mediante un robot, montar una tapa y almacenar el conjunto terminado o semiterminado, utilizando una estrategia de control distribuida y colaborativa siendo el agente MeiA el que toma la iniciativa.

### 5.1. Arquitectura

La arquitectura del caso de estudio se compone de un conjunto de agentes MeiA con roles específicos para llevar a cabo el proceso de ensamblaje (Figura 6). A continuación, se muestra la distribución y función de cada agente:

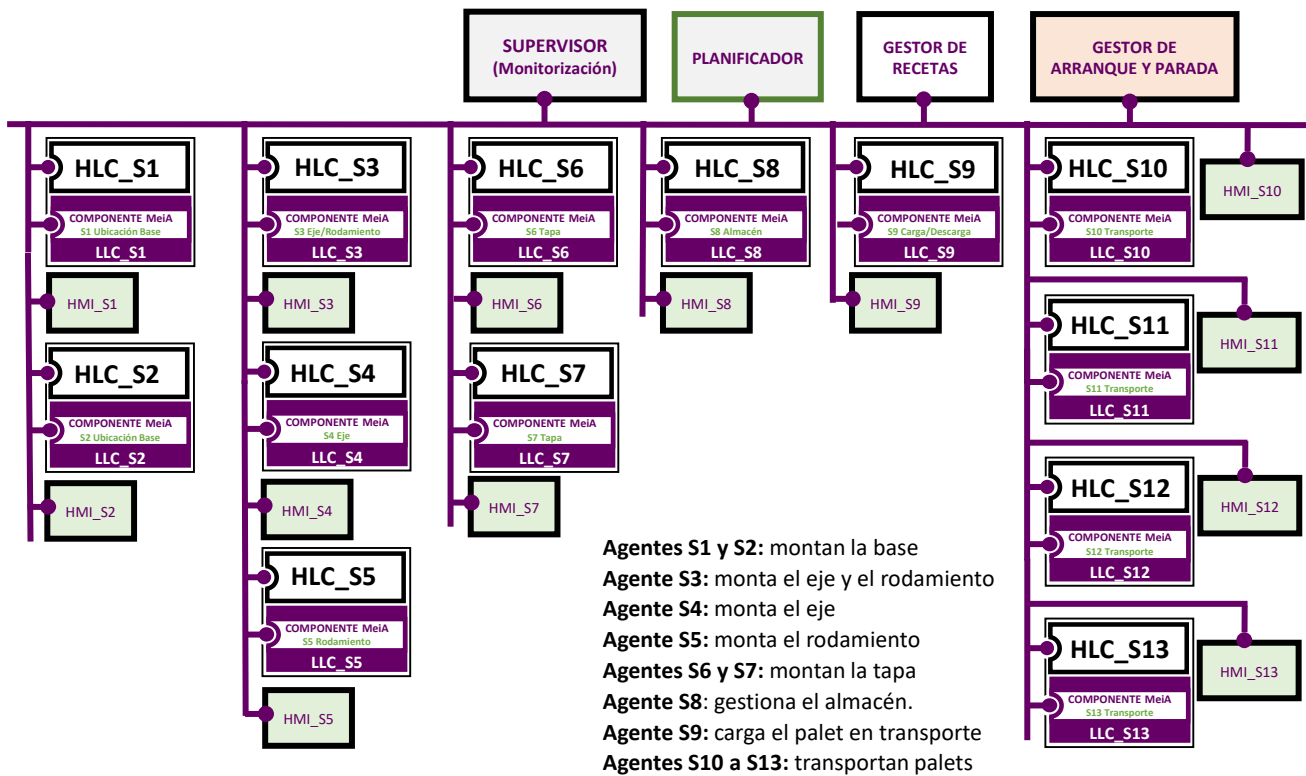


Figura 6: Arquitectura de control para el caso de estudio, en la que se ha utilizado una representación simplificada de los agentes.

- Agentes S1 y S2: montan la base sobre un palet.
- Agente S3: monta el eje y el rodamiento.
- Agente S4: monta el eje.
- Agente S5: monta el rodamiento.
- Agentes S6 y S7: montan la tapa.
- Agente S8: gestiona el almacén.
- Agente S9: carga el palet sobre el sistema de transporte.
- Agentes S10 a S13: transportan palets con los montajes.

Todos estos agentes se han implementado a partir de los MeiAC existentes. Estos últimos han sido validados usando sus gemelos funcionales, los cuales simulan el comportamiento de la unidad de trabajo que controlan (Álvarez et al., 2024).

La Figura 7 es una representación del MeiAC de la S1-Ubicación Base que, como se ha mencionado anteriormente equivale al LLC del agente. En la parte central se muestra una versión reducida de sus modelos MI y MSC. El HLC aparece como un módulo conectado (destacado en azul) en el modelo MI del MeiAC, el cual contiene los servicios que puede solicitar a su LLC. El modelo MSC recoge los procedimientos asociados tanto a los modos de funcionamiento (Automático, Manual, Fallos y Emergencias), como a las operaciones de Producción Normal (Alimentar Base, Montar Base y Gestionar Almacén con Cargar Bases y Contar Bases), junto con las señales asociadas que permiten conocer el estado del sistema de control. Por lo tanto, el HLC solicita los servicios modificando el MI y recoge las respuestas del LLC a través del modelo MSC.

En la parte derecha de la figura se puede observar el interfaz implementado con los servicios que el HLC puede solicitar al LLC (recuadro superior) y las señales que le informan del estado de ejecución del servicio solicitado (recuadro inferior). Por ejemplo, cuando el HLC solicita el servicio montar base, lo hace activando el servicio *PSOP\_SI\_MontarBase* en el modelo MI. Cuando el LLC ha realizado la operación, actualiza la señal *BaseMontada* en el modelo MSC.

En este caso de estudio, la interacción entre el HLC y el LLC se ha realizado utilizando el protocolo OPC-UA. El MeiAC se ejecuta en un PLC configurado como servidor OPC-UA que interactúa con su HLC implementado en un PLC configurado como cliente OPC-UA.

## 5.2 Comunicación entre agentes y aplicaciones

Los agentes se comunican para la realización de las distintas operaciones definidas en el sistema. Los mensajes que se intercambian los agentes MeiA constan de performativas que describen cómo se relacionan. En el caso de estudio se han utilizado: *Inform* para informar; *Request* para solicitar la realización de alguna acción; y *Accept* para aceptar una propuesta. Como ejemplo de esta comunicación se muestra la secuencia de arranque, el reparto de recetas de control y la negociación entre agentes para la asignación de un recurso.

Para el primer ejemplo, la (Figura 8) muestra la *secuencia de arranque* de las estaciones S1 y S2 que realizan la operación de montar una base sobre un palet. Esta secuencia será igual para todos los agentes MeiA.

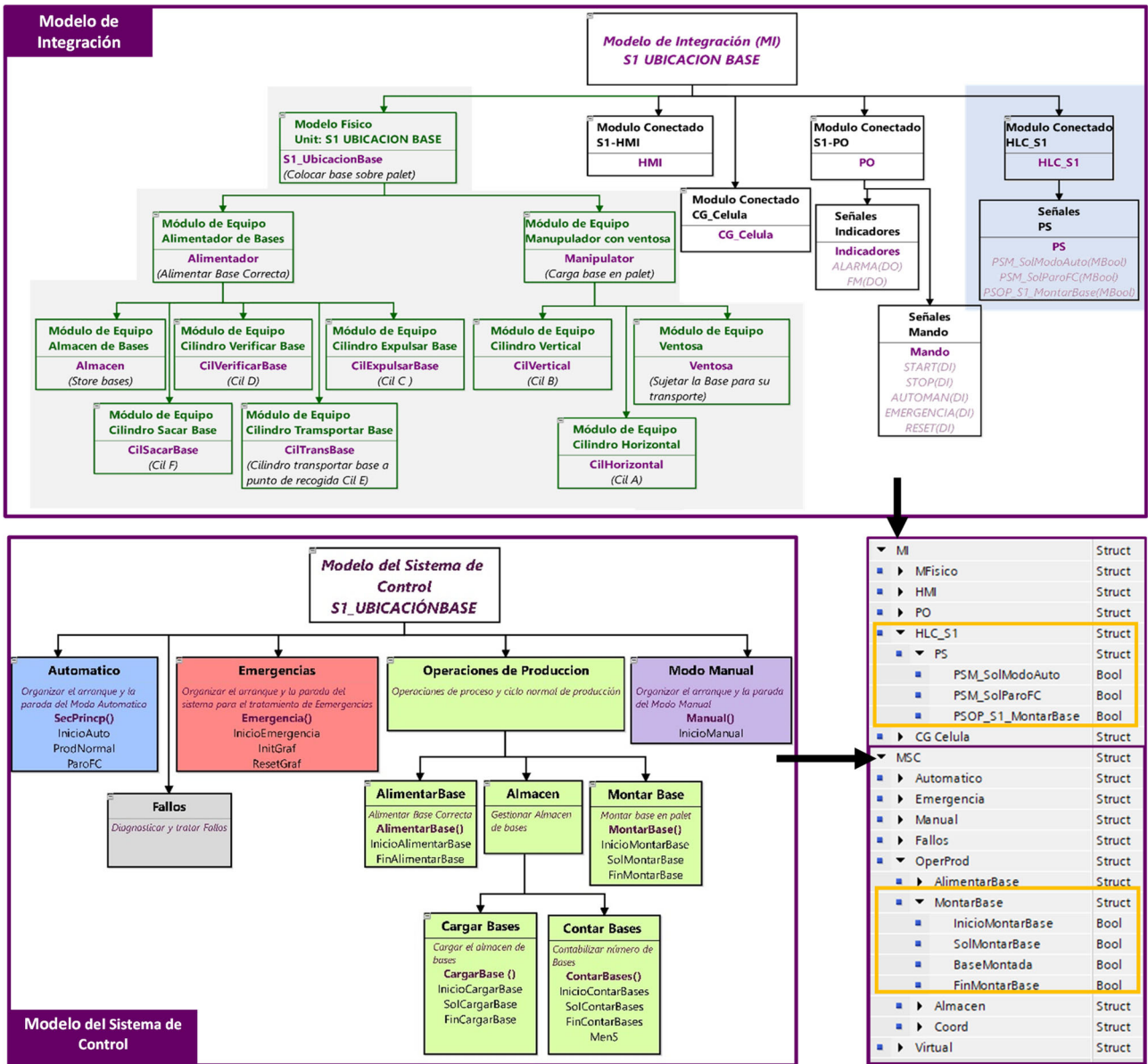


Figura 7: Modelos del componente MeIA de la unidad de trabajo S1 Ubicacion Base

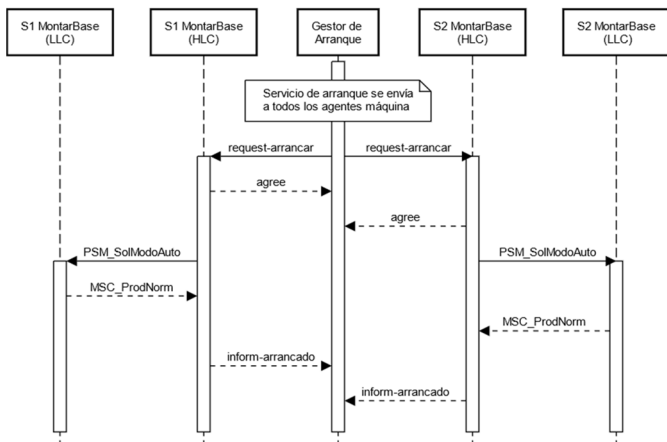


Figura 8: Secuencia de arranque de los agentes MeIA

El Gestor de Arranque, responsable de iniciar el sistema de producción, envía solicitudes de arranque (*request-arrancar*) a los HLC de los agentes, que confirman haber recibido esta solicitud (*agree*). A continuación, solicitan a los LLC que arranquen las estaciones utilizando el servicio (*PSM\_SolModoAuto*) que pone a disposición el MeIA. Una vez que las estaciones están arrancadas y en funcionamiento, los LLC actualizan las señales de producción normal (*MSC\_ProdNorm*) informando a los HLC. Estos, a su vez, informarán (*inform-arrancado*) al Gestor de Arranque de su estado.

En lo que respecta al segundo ejemplo, la secuencia para el *envío de las recetas de control* implica la colaboración entre el Planificador, el Gestor de Recetas, el Gestor de Arranque y los HLC de los agentes (Figura 9).

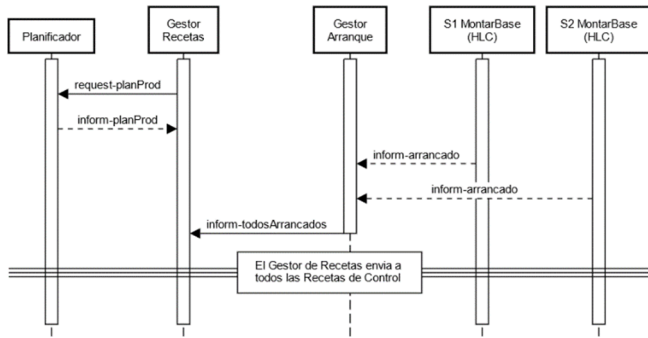


Figura 9: Envío de las recetas de control

Además del arranque de las estaciones, el Gestor de Arranque solicita el plan de producción (*request-planProd*) al Planificador. El plan de producción consta del número de conjuntos a ensamblar y de las recetas magistrales (“master recipe” del estándar IEC 61512-1) de cada una de los conjuntos. Estas recetas disponen de información específica sobre las operaciones para realizar el montaje de cada tipo de producto con los requisitos del equipamiento para tal fin.

Cuando el Gestor de Recetas dispone del plan de producción (*inform-planProd*) y el Gestor de Arranque le confirma que las estaciones implicadas están arrancadas (*inform-todosArrancados*), envía las recetas de control a todos los agentes. Cada receta de control (“control recipe” del estándar IEC 61512-1) se obtiene a partir de la receta magistral asociada, ampliada con los campos que se irán actualizando con los datos de las operaciones que se van realizando, su duración y los equipos encargados de su ejecución.

La Figura 10 muestra una versión simplificada del metamodelo de la receta de control utilizada en este caso de estudio. Dicha receta consta de una cabecera, con la información de la instancia del producto, y su fórmula, que comprende un conjunto de operaciones que se realizan en un equipo a negociar mediante los procedimientos correspondientes. Cada operación tiene asociados unos tiempos de producción, tanto el planificado como el real.

En relación con el tercer ejemplo de *negociación entre dos agentes*, las estaciones encargadas de realizar las mismas tareas deben negociar cuál de ellas realiza la operación teniendo en cuenta las recetas de control.

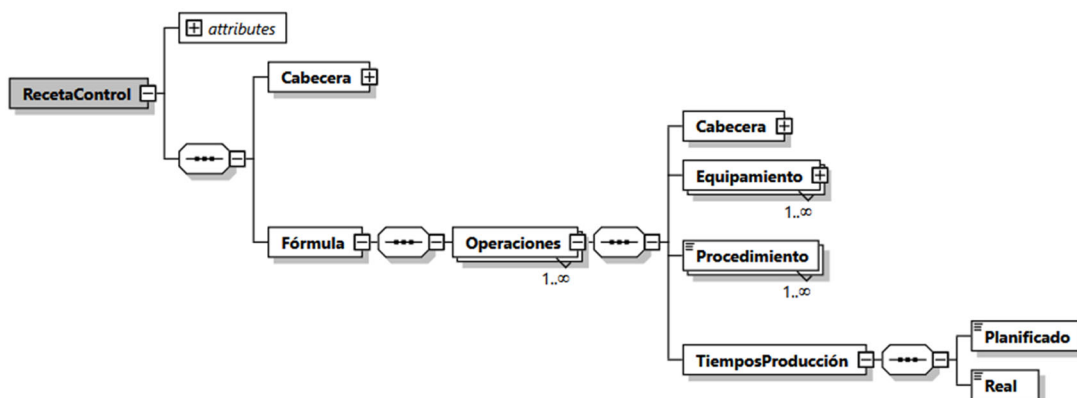


Figura 10: Metamodelo simplificado de la receta de control

Toda negociación se basa en una serie de reglas. En el caso de las dos estaciones encargadas de montar base (S1 y S2), el proceso de negociación, que se muestra en el diagrama de secuencia de la (Figura 11), consta de tres reglas:

R1 - la colocación de la base del primer montaje (P1) siempre la realiza la estación S1.

R2 - la colocación de la base del segundo montaje (P2) la realiza la estación S2.

R3 - en los montajes posteriores, la estación que termine antes será la que realice la operación. Si hay más de una estación en disposición de realizar el montaje, se ha establecido un orden de prioridad: primero S1 y después S2.

No obstante, se han establecido otras reglas en función de la calidad del producto final y el tiempo de operación que no se han descrito por simplicidad.

El HLC de la estación que se encarga de realizar la operación informa de ello al Gestor de Recetas y a los HLC de todos los agentes (*inform-montoBasePX*).

Cuando el HLC que gana la negociación reciba del LLC la señal que le informa que está preparado para montar la base (*MSC\_BasePosCarga*), le solicitará que realice la operación (*PSOP\_MontarBase*). Una vez finalizado el montaje, el LLC confirma al HLC que ha finalizado la operación (*MSC\_BaseMontada*) y el HLC informa de la finalización del montaje (*inform-baseMontada*) a todas las entidades implicadas, indicando que está libre para realizar un nuevo montaje.

## 6. Conclusiones

Este trabajo propone dotar de la capacidad de negociación a los componentes MeiAC con el fin de alcanzar los objetivos de producción mediante una estrategia de control colaborativa.

Para el desarrollo de estos componentes inteligentes, denominados agentes MeiA, se han seguido los estándares I4.0 del ámbito de la automatización industrial, aplicando tecnologías próximas a los profesionales de la industria. Así, los agentes MeiA proporcionan la posibilidad de realizar una transición hacia una aproximación I4.0 asumible tanto desde una perspectiva tecnológica como económica. Al incorporar capacidades de inteligencia, estos agentes industriales favorecen un proceso de adaptación a cambios más ágil para reaccionar ante situaciones conflictivas durante la producción

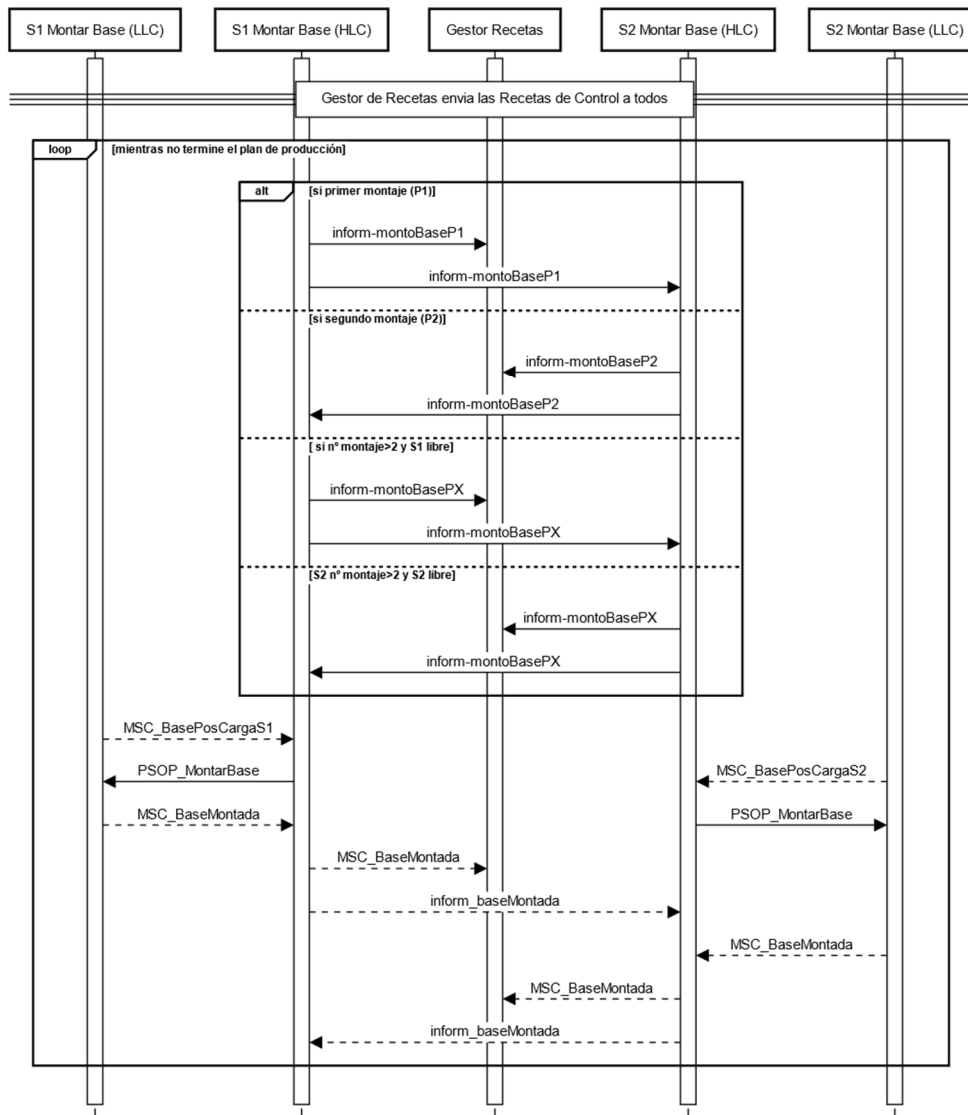


Figura 11: Negociación entre agentes para colocar la base encima del palet

o la incorporación de nuevos productos, optimizando el proceso de producción de modo eficiente.

Los trabajos futuros pretenden introducir esta tecnología en el ámbito de la Agrivoltaica, de forma que se dote con inteligencia a los MeIAC de activos industriales (planta fotovoltaica, gestión del agua, monitorización del clima, etc.) y de activos vivos (cultivos, animales, etc.) para la toma de decisiones.

## Agradecimientos

Este trabajo está financiado por FEDER bajo el proyecto Interreg POCTEFA 2021-2027 EFA030/01 AgriPower.

## Referencias

Álvarez, M.L., Sarachaga, I., Burgos, A., Estévez, E., Marcos, M., 2018. A methodological approach to model-driven design and development of automation systems. *IEEE Transactions on Automation Science Engineering* 15(1), 67-79. DOI: 10.1109/TASE.2016.2574644

Álvarez, M.L., Sarachaga, I., Burgos, A., Iriondo, N., 2024. Gemelo funcional para pruebas del software de sistemas de producción automatizados. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial* 21(2), 159-170. DOI: 10.4995/riai.2024.20830

Aragón, A., López, A., Sarachaga, I., Casquero, O., Orive, D., Armentia, A., Pérez, F., 2022. Componente I4.0 de una estación de ensamblado. *XLIII Jornadas de Automática: libro de actas*, 877-884. DOI: 10.17979/spudc.9788497498418.0877

Baumgärtel, H., Verbeet, R., 2020. Service and agent based system architectures for industrie 4.0 systems, *NOMS 2020 - IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium*, Budapest, Hungary, 1-6, DOI: 10.1109/NOMS47738.2020.9110406

Belman-Lopez, C.E., Jiménez-García, J.A., Hernández-González, S. 2020. Análisis exhaustivo de los principios de diseño en el contexto de Industria 4.0. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial* 17(4), 432-447. DOI: 10.4995/riai.2020.12579

Belman-López, C. E., Jiménez-García, J. A., Vázquez-Lopez, J. A., Camarillo-Gómez, K. A., 2023. Diseño de una arquitectura para sistemas y aplicaciones en Industria 4.0 basada en computación en la nube y análisis de datos. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, 20(2), 137-149. DOI: 10.4995/riai.2022.17791

Bennulf, M., Danielsson, F., Svensson, B., Lennartson, B., 2020. Goal-oriented process plans in a multi-agent system for Plug & Produce. *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 17(4), DOI: 10.1109/TII.2020.2994032

Cruz, L. A., Ryashentseva, D., Lüder, A., Vogel-Heuser, B., 2019. Cyber-physical production systems architecture based on multi-agent's design

- pattern—comparison of selected approaches mapping four agent patterns. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 105(9), 4005–4034, DOI: 10.1007/s00170-019-03800-4
- Cruz, L.A., Vogel-Heuser, B., 2022a. A CPPS-architecture and workflow for bringing agent-based technologies as a form of artificial intelligence into practice. *Automatisierungstechnik* 70(6), 580-598. DOI: 10.1515/auto-2022-0008
- Cruz Salazar, L.A., Vogel-Heuser, B., 2022b. Industrial artificial intelligence: a predictive agent concept for Industry 4.0. *IEEE 20th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, [DOI: 10.1109/INDI51773.2022.9976159
- Dai, W., Leitão, P., Tsang, K. F., Shi, Y., Hancke, G., Shu, L., Behnam, M., Haase, J., Vyatkin, V., 2024. Synergies of operation, information, and communication technology for solving new societal and industrial challenges: future directions. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 18(2), 6-16, DOI: 10.1109/MIE.2023.3321390
- Dintén, R., López Martínez, P., Zorrilla, M. 2021. Arquitectura de referencia para el diseño y desarrollo de aplicaciones para la Industria 4.0. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial* 18(3), 300-311. DOI: 10.4995/riai.2021.14532
- Estrada Jimenez, L. A., Højijati, S. N., Barata, J., 2022. Self-organization of a highly flexible shop floor – From multi-agent based interactions to an echolocation-inspired automation system. *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*, Prague (Czech Republic), 1109-1114. DOI: 10.1109/SMC53654.2022.9945187
- Fay, A., Gehlhoff, F., Seitz, M., Vogel-Heuser, B., Baumgaertel, H., Diedrich, C., Lüder, A., Schöler, T., Sutschet, G., Verbeet, R., 2019. Agents for the realisation of Industrie 4.0 - VDI Status Report. DOI: 10.13140/RG.2.2.23998.84805
- FIPA (Foundation for Intelligent Physical Agents) specifications, acceso en mayo de 2024. <http://www.fipa.org/repository/standardspecs.html>
- FIPA TC Communication, Contract Net Interaction Protocol Specification, 2002a. <http://www.fipa.org/specs/fipa00029/SC00029H.html>
- FIPA TC Communication, ACL Message Structure Specification, 2002b. <http://www.fipa.org/specs/fipa00061/index.html>
- Haben, F., Vogel-Heuser, B., Najjari, H., Seitz, M., Trunzer, E., Salazar, L. A. C., 2021. Low-entry barrier multi-agent system for small- and middle-sized enterprises in the sector of automated production systems. *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*, Singapore, 1351-1357. DOI: 10.1109/IEEM50564.2021.9672973
- Hernández, M. P., McFarlane, D., Parlikad, A. K., Herrera, M., Jain, A. K., 2021. Relaxing Platform Dependencies in Agent-Based Control Systems. *IEEE Access*, 9, 30511-30527, DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3059273
- IEC 61512-1, 2002. Batch Control-Part 1: Models and terminology.
- IEEE Standard 2660.1-2020, 2021. IEEE Recommended practice for industrial agents: integration of software agents and low-level automation functions. DOI: 10.1109/IEEESTD.2021.9340089
- Iriondo, N., Álvarez, M.L., Sarachaga, I., Burgos, A., 2022. Unidades de control encapsuladas para sistemas de automatización. *XLIII Jornadas de Automática*, 7-9 Sep., Logroño (España), 892-899. DOI: 10.17979/spudc.9788497498418.0892
- Karnouskos, S., Ribeiro, L., Leitão, P., Lüder, A., Vogel-Heuser, B., 2019. Key directions for industrial agent based cyber-physical production systems. *Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Cyber Physical Systems (ICPS'19)*, 17–22. DOI: 10.1109/ICPHYS.2019.8780360
- Karnouskos, S., Leitão, P., Ribeiro, L., Colombo, A. W., 2020. Industrial Agents as a Key Enabler for Realizing Industrial Cyber-Physical Systems: Multiagent Systems Entering Industry 4.0. *IEEE Industrial Electronics Magazine* 14(3), 18-32 Sept. DOI: 10.1109/MIE.2019.2962225
- Kovalenko, I., Moyne, J., Bi, M., Balta, E. C., Ma, W., Qamsane, Y., Zhu, X., Mao, Z. M., Tilbury, D. M., Barton, K., 2022. Toward an automated learning control architecture for cyber-physical manufacturing systems. *IEEE Access*, 10, 38755-38773. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3165551
- Kovalenko, I., Balta, E. C., Tilbury, D. M., Barton, K., 2023. Cooperative product agents to improve manufacturing system flexibility: A model-based decision framework. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering* 20(1), 440-457, Jan. DOI: 10.1109/TASE.2022.3156384
- Leitão, P., Karnouskos, S., Strasser, T. I., Jia, X., Lee, J., Colombo, A. W., 2023. Alignment of the IEEE industrial agents recommended practice standard with the reference architectures RAMI4.0, IIRA, and SGAM. *IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society*, 4, 98-111. DOI: 10.1109/OJIES.2023.3262549
- López, A., Casquero, O., Estévez, E., Leitão, P., Marcos, M., 2021. Towards the generic integration of agent-based AASs and physical assets: a four-layered architecture approach. *IEEE 19th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, Palma de Mallorca, Spain, 1-6, DOI: 10.1109/INDIN45523.2021.9557568
- López, A., Estévez, E., Casquero, O., Marcos, M., 2023a. A methodological approach for integrating physical assets in Industry 4.0, *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 19(9), 9546-9554, Sept. DOI: 10.1109/TII.2022.3230714
- López, A., Casquero, O., Estévez, E., Armentia, A., Orive, D., Marcos, M., 2023b. An industrial agent-based customizable platform for 14.0 manufacturing systems. *Computers in Industry* 146, 103859, DOI: 10.1016/j.compind.2023.103859
- Luchian, R. A., Rosioru, S., Stamatescu, I., Fagarasan, I., Stamatescu, G., 2021. Enabling Industrial Motion Control through IIoT Multi-Agent Communication. *IECON 2021 – 47th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Toronto, ON, Canada, 1-6, DOI: 10.1109/IECON48115.2021.9589262
- Maldonado, D., Cruz, E., Abad, J., Cruz, P. J., Gamboa, S. d. P., 2024. Multi-agent systems: A survey about its components, framework and workflow. *IEEE Access*, 12, 80950-80975. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3409051
- Martyshkin, A. I., 2021. Research and Development of an Intelligent Agent for Industrial Cyber-Physical Systems. *2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, Sochi, Russia, 903-907, DOI: 10.1109/ICIEAM51226.2021.9446447
- Mustafa Yalcin, M., Karaduman, B., Kardas, G., Challenger, M., 2021. An Agent-based Cyber-Physical Production System using Lego Technology. *2021 16th Conference on Computer Science and Intelligence Systems (FedCSIS)*, Sofia, Bulgaria, 521-531, DOI: 10.15439/2021F81
- Najjari, H., Seitz, M., Trunzer, E., Vogel-Heuser, B., 2021. Cyber-physical production systems for SMEs-A generic multi agent based architecture and case study. *4th IEEE International Conference on Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS)*, Victoria-BC (Canada), 625-630. DOI: 10.1109/ICPS49255.2021.9468232
- Sakurada, L., Leitão, P., 2020. Multi-agent systems to implement industry 4.0 components. *2020 IEEE Conference on Industrial Cyberphysical Systems (ICPS)*, 21–26. DOI: 10.1109/ICPS48405.2020.9274745
- Sakurada, L., De la Prieta, F., Leitao, P., 2023a. Digitization of industrial environments through an Industry 4.0 compliant approach. *IECON 2023-49th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Singapore, Singapore, 1-6, DOI: 10.1109/IECON51785.2023.10312428
- Sakurada, L., De la Prieta, F., Leitao, P., 2023b. A Methodology for Integrating Asset Administration Shells and Multi-agent Systems. *2023 IEEE 32nd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, Helsinki, Finland, 1-6, DOI: 10.1109/ISIE51358.2023.10227964
- Sirius, <https://eclipse.dev/sirius>. (Último acceso: 19/07/2024)
- Tallat, R., Hawbani, A., Wang, X., Al-Dubai, A., Zhao, L., Liu, Z., Min, G., Zomaya, A.Y., Alsamhi, S.H., 2024. Navigating Industry 5.0: A survey of key enabling technologies, trends, challenges, and opportunities. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 26(2), 1080-1126. DOI: 10.1109/COMST.2023.3329472
- VDI/VDE 2653-1:2018-05. Multi agent systems in industrial automation – Fundamentals. (This document replaces VDI/VDE 2653 Blatt 1:2010-06)
- VDI/VDE 2653-2:2018-02. Multi-agent systems in industrial automation – Development. (This document replaces VDI/VDE 2653 Blatt 2:2012-01)
- VDI/VDE 2653-3:2020-03. Multi-agent systems in industrial automation – Application. (This document replaces VDI/VDE 2653 Blatt 3:2012-03)
- VDI/VDE. 2653 Blatt 4: 2022-07. Multi-agent systems in industrial automation – Selected patterns for field level control and energy systems.
- Vogel-Heuser, B., Seitz, M., Cruz, L.A., Gehlhoff, F., Dogan, A. Fay, A., 2020. Multi-agent systems to enable Industry 4.0. *Automatisierungstechnik*, 68(6), 445-458. DOI: 10.1515/auto-2020-0004
- Zhang, Z., He, N., Li, Q., Wang, K., Gao, H., Gao, T., 2022. DetectPMFL: Privacy-Preserving Momentum Federated Learning Considering Unreliable Industrial Agents," in *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 18(11), 7696-7706, DOI: 10.1109/TII.2022.314080