

# Análisis de arquitecturas tecnológicas para el nuevo paradigma de la Industria 4.0

*Analysis of technological architectures for the new paradigm of the Industry 4.0*



Felix Larrinaga-Barrenechea<sup>1</sup>, Iñigo Aldalur-Ceberio<sup>1</sup>, Miren Illarramendi-Rezabal<sup>1</sup>, Mikel Iturbe-Urretxa<sup>1</sup>, Txema Pérez-Lazare<sup>1</sup>, Gorka Unamuno-Eguren<sup>2</sup>, Jon Salvidea-Campuzano<sup>3</sup> e Inaxio Lazkanoiturburu<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Mondragon Unibertsitatea (España)

<sup>2</sup> IK-4 Ideko S.Coop (España)

<sup>3</sup> Savvy (España)

<sup>4</sup> ULMA Embedded Solutions (España)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8837>

## 1. INTRODUCCIÓN

Los avances en computación y comunicación están propiciando la digitalización de la industria. Cada vez son más los dispositivos empotrados que se integran en maquinaria industrial. Mediante la adquisición de datos en línea y la aplicación de técnicas de analítica avanzada se pueden realizar análisis y predicciones sobre muchos aspectos de la condición o estado de una máquina industrial.

El proceso de digitalización e Internet se ha convertido en la columna vertebral de muchos tipos de funciones cercanas a los procesos, ofreciendo integración, interoperabilidad, operaciones remotas, servicios en la nube, etc. Esto, está impulsando

la creación de nuevas arquitecturas de referencia que permitan la interoperabilidad y la ampliación de la gestión del producto que ya no termina en el proceso de fabricación, sino en la gestión de su ciclo de vida completo, como se muestra en la Figura 1. Comparando ambas arquitecturas, se aprecia que se pasa de gestionar los productos en fabricación a una gestión donde los productos se consideran durante todo su ciclo de vida.

La presente publicación tiene como objetivo mostrar una arquitectura de referencia interoperable y escalable que facilite la evolución de proveedores de producto a proveedores de producto/servicio. Esta arquitectura se ha definido en el marco del proyecto Productive 4.0 [2]. La solución dota de gran versatilidad a la máquina herramienta ya que permite integrar fácilmente componentes externos en su dinámica de control y monitorización, así como asociarle servicios de valor añadido como mantenimiento predictivo o la optimización de los procesos.

La sección 2 presenta el estado del arte sobre las tecnologías y soluciones existentes en el ámbito de industria digital. La sección 3 se centra en describir la tecnología

base de la solución que se presenta en el artículo y la sección 4 define su arquitectura. En la sección 5 se presenta el caso de uso concreto que se ha desarrollado. Para finalizar, la sección 6 termina el artículo definiendo conclusiones y líneas futuras.

## 2. ESTADO DEL ARTE

Industry 4.0 tiene como eje la digitalización del mundo físico y la aparición de nuevos conceptos de computación como las redes inalámbricas de sensores (WSN, *Wireless Sensor Networks*), los sistemas ciber-físicos (CPS, *Cyber Physical Systems*) o la Internet de las Cosas (IoT, *Internet of Things*).

En las siguientes subsecciones se expone el estado actual de algunos de los conceptos tecnológicos más relevantes como la interoperabilidad, servitización y plataformas digitales.

### 2.1. INTEROPERABILIDAD

Analizando la agenda estratégica de investigación e innovación de European Research Cluster on the Internet of Things (IERC) [3], podemos decir que uno de los retos principales de IoT es la interoperabilidad. El Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE) define interoperabilidad como la habilidad de dos o más sistemas o componentes para intercambiar información y utilizar la información intercambiada.

La interoperabilidad sintáctica se refiere a la capacidad de dos sistemas para comunicarse entre sí e intercambiar información mediante el empleo de formatos de datos y protocolos de comunicación específicos (ej. JSON, XML o SQL).

La interoperabilidad semántica se refiere a la capacidad de interpretar automáticamente la información intercambiada de forma significativa y precisa para producir resultados útiles, definidos por los usuarios finales de los sistemas interconectados, acordando un modelo común (ej. ontología) que proporcione la base para dotar a los sistemas de una capacidad automática de interpretación e inferencia [4].

En IoT se identifican distintos protocolos, arquitecturas de comunicación y ontologías que facilitan la interoperabilidad. En [5] y en [6] describen algunas de estas tecnologías como Constraint Application Protocol (CoAP), Message Queue Server

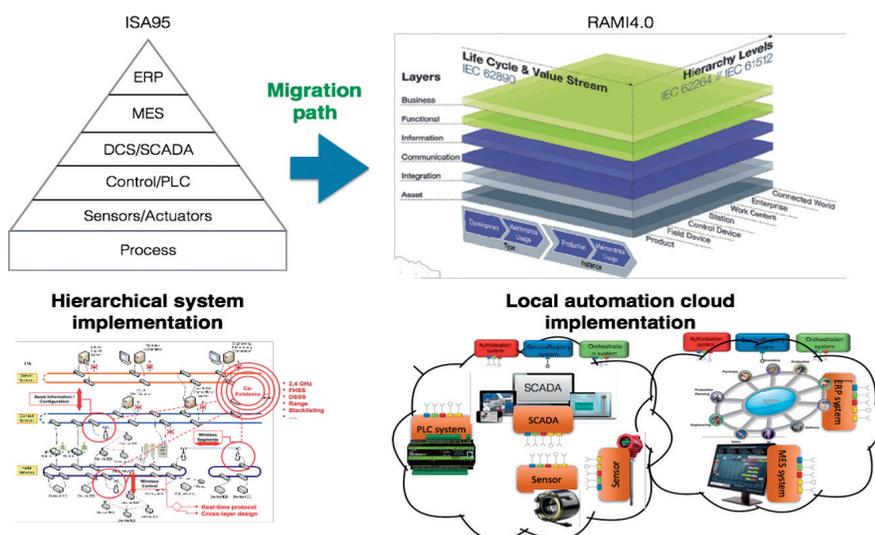


Figura 1: Arquitectura ISA95 y su migración hacia una arquitectura RAMI4.0 [1]. Fuente: EFFRA KeyNote "Building Automation Systems from Internet of Things" by Jerker Delsing

Telemetry Transport (MQTT), diferentes ontologías para el dominio IoT, etc. Es por tanto posible encontrar múltiples protocolos dentro de este ámbito: algunos propietarios y otros que son estándares abiertos.

El Industrial Internet of Things (IIoT) hace referencia a la idea de interconectar en planta a través de la red de redes las diferentes "cosas". En particular en IIoT deben cubrirse tres principales premisas: i) posibilitar la conexión entre sensores y actuadores con el proceso local y a Internet; ii) dotar de conectividad a otras redes industriales que independientemente pueden generar un valor añadido permitiendo a las empresas una fabricación avanzada más eficiente y productiva iii) garantizar la calidad de servicio en cuanto a la transmisión de datos de manera transparente y segura.

**2.2. SERVITIZACIÓN BASADA EN CPSoSs**

La combinación de las TIC y los Cyber Physical Systems-of-Systems (CPSoS) está desencadenando la transformación de los patrones de la cadena de valor de la fabricación, pasando de la pura fabricación y venta de productos físicos al suministro de soluciones integradas en las que los productos físicos se ven mejorados por funciones y servicios. Como se explica en [7], esta tendencia de negocio se puede entender como "servitización", es decir, el proceso de creación de valor en productos mediante la adición de servicios.

Esa servitización se puede "entregar" a dos niveles; a nivel de planta o en la nube. A nivel de planta, el concepto tiene como objetivo extender el paradigma de computación de datos y la entrega de servicios al entorno local o de máquina para aquellas aplicaciones que tienen estrictos requisitos de retardo. Recientemente se ha introducido un concepto arquitectó-

nico llamado "fog/edge computing". Este concepto consiste en llevar la inteligencia, la analítica de datos y la generación de conocimiento hacia nubes más pequeñas, cerca de los dispositivos físicos.

La combinación de los paradigmas de nube y de planta (fog/edge computing) a través de los CPSoS está permitiendo a las empresas evolucionar su configuración jerárquica y estática hacia una nueva arquitectura caracterizada por la agilidad y las interacciones entre sistemas. Durante la fase de producción, los CPSoS facilitan la integración de los datos dentro de la empresa. En las etapas de preproducción y post-producción, CPSoS basados en la nube pueden proporcionar datos relevantes que pueden ser utilizados para soportar tanto la Gestión del Ciclo de Vida del Producto como la Gestión del Ciclo de Vida del Servicio.

**2.3. PLATAFORMAS INDUSTRY 4.0**

Mediante plataformas IoT es posible acceder a dispositivos y máquinas de forma transparente haciendo posible la digitalización de los sistemas de fabricación. Hay muchas iniciativas en torno a las Plataformas de Fabricación Digital y de IoT que se han desarrollado en diferentes acciones de Investigación e Innovación en la Comunidad Europea (MANTIS, C2Net, CREMA, FIWARE for Industry FITMAN, ...). Sin embargo, estas plataformas todavía no han conducido a una digitalización satisfactoria y eficaz de todos los aspectos y recursos de la industria manufacturera. También existen plataformas IoT comerciales que se están utilizando en la industria como AWS IoT de Amazon, Azure IoT Suite de Microsoft, Watson IoT de IBM o ThingSpeak de MathWorks. Estas soluciones son soluciones cerradas basadas en tecnologías concretas haciendo difícil la

interoperabilidad entre las diferentes soluciones.

En ese sentido, el Industrial Internet Consortium ha definido el concepto de Framework de Conectividad: Industrial Internet Connectivity Framework (IICF). Esta plataforma provee una interoperabilidad sintáctica de comunicación entre diferentes sistemas de Industrial Internet of Things (IIoT) y componentes desarrollados por diferentes participantes del ecosistema.

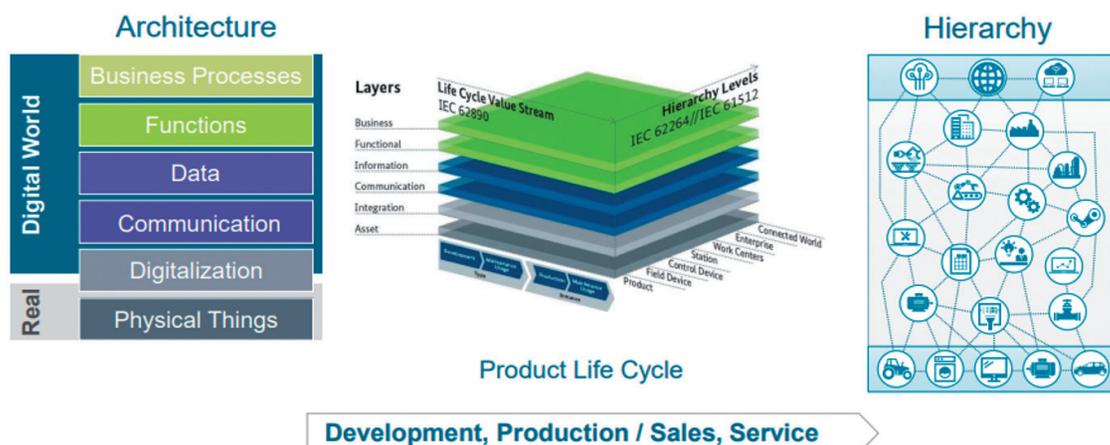
Otra de las iniciativas de interoperabilidad es la conocida como RAMI 4.0 (Reference Architectural Model for Industrie 4.0) [1]. Uno de los objetivos de RAMI 4.0 es asegurar que los diferentes participantes involucrados en la Fabricación Avanzada se puedan entender entre ellos. En la Figura 2 se puede observar esta arquitectura de referencia.

**3. BACKGROUND**

En esta sección, se describen las dos principales tecnologías sobre las que se sustenta la arquitectura propuesta en la siguiente sección. Por un lado, el framework Arrowhead, que facilita la interoperabilidad entre diversos agentes IoT, y por otro lado los contenedores, una tecnología de virtualización que permite escalar servicios de forma eficiente.

**3.1. PROYECTO ARROWHEAD**

El proyecto Arrowhead aborda la eficiencia y la flexibilidad a escala global mediante la automatización colaborativa. Así, los grandes desafíos de Arrowhead son permitir: 1) la interoperabilidad de los servicios proporcionados por casi cualquier dispositivo. 2) la integridad de los servicios proporcionados por cualquier dispositivo.



**A Solution Space with a Coordinate System for Industrie 4.0**

Figura 2: Arquitectura RAMI 4.0 [1]. Fuente: RAMI 4.0

Como respuesta a estos desafíos se creó el framework de Arrowhead [8]. El framework pretende normalizar la interacción entre aplicaciones industriales de IoT mediante arquitecturas orientadas a servicios (SOA). Los servicios son expuestos y consumidos por sistemas, que se ejecutan en dispositivos. Los dispositivos se agrupan en nubes de automatización locales, que son autónomas, geográficamente compartidas, independientes entre sí y protegidas del acceso externo mediante medidas de seguridad.

Los servicios se clasifican en servicios de aplicación, cuando implementan la lógica del negocio, o servicios centrales, cuando proporcionan acciones de soporte como descubrimiento de servicios, autorización, orquestación, etc. La Figura 3 muestra los diferentes tipos de servicios dentro del framework de Arrowhead.

### 3.2. CONTENEDORES

Un contenedor [9] es un paquete de software que contiene el entorno necesario para su ejecución, como librerías, código o ajustes. Estos contenedores se pueden instanciar múltiples veces (en un único nodo o en un conjunto de ellos) partiendo de una imagen base que contiene la información necesaria para su despliegue. Su objetivo es proporcionar un entorno reproducible y portátil en el que ejecutar una aplicación. Así, éstos se pueden considerar una unidad estándar de software, ya que independientemente del entorno sobre el que se ejecuten, la aplicación que se ejecuta dentro del contenedor dispone del entorno especificado en la imagen, que se repetirá en todas las instancias del contenedor.

Desde una única imagen se pueden

orquestrar contenedores bajo demanda por lo que son una tecnología útil para el despliegue de servicios en entornos interconectados donde es necesario adecuar recursos en base a una demanda variable.

Además, los contenedores proporcionan mayores niveles de seguridad ya que cada contenedor se ejecuta en un entorno aislado donde los procesos en ejecución no tienen acceso a los recursos de otros contenedores ni a los del sistema, por lo que, si un servicio en un contenedor es comprometido, el resto del sistema no se vería afectado.

Dada su facilidad de despliegue, la escalabilidad y la seguridad de los contenedores han propagado su uso en el campo de la industria [10] y la computación en la nube. Por lo tanto, su utilización es una elección natural para el despliegue de servicios en entornos industriales.

cliente-proveedor que van desde la venta de un producto de altas prestaciones hasta la venta de servicios relacionados con el producto que se ha adquirido. Además, es fácilmente adaptable, permite integrar nuevos componentes (sensores/actuadores) y facilita la interoperabilidad con otros sistemas (para la integración de componentes y/o para su propia integración en los sistemas de gestión de la empresa).

Esta arquitectura se soporta en el framework Arrowhead y su capacidad de articularse en nubes locales (local-clouds). Una nube local, como puede verse en la Figura 4, es una arquitectura orientada a servicios en un ámbito delimitado y que es autónomo: no necesita recursos externos para constituirse y contiene y gestiona sus propios servicios.

La utilización de nubes locales permite:

- Disminuir los tiempos de latencia y dar respuesta a problemas de tiempo real.
- Facilitar la escalabilidad posibilitando la integración de sistemas muy grandes.

### 4. ARQUITECTURA PROPUESTA

La arquitectura del sistema propuesta posibilita distintos modos de relación

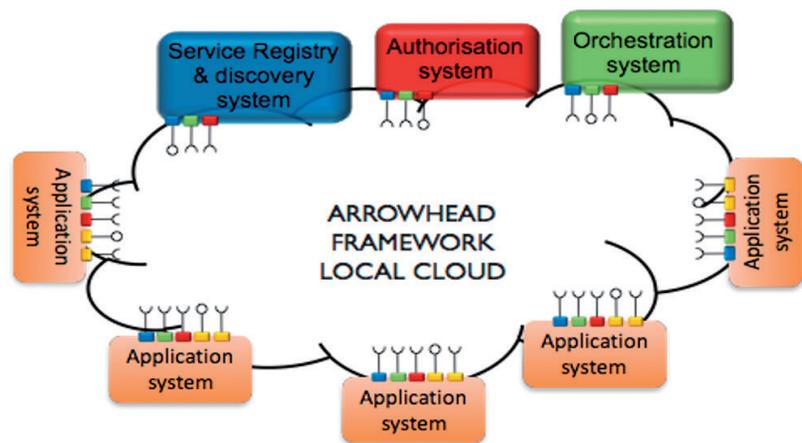


Figura 4: Nube local en la Plataforma Arrowhead. Fuente: Proyecto Arrowhead

## ArrowheadFramework

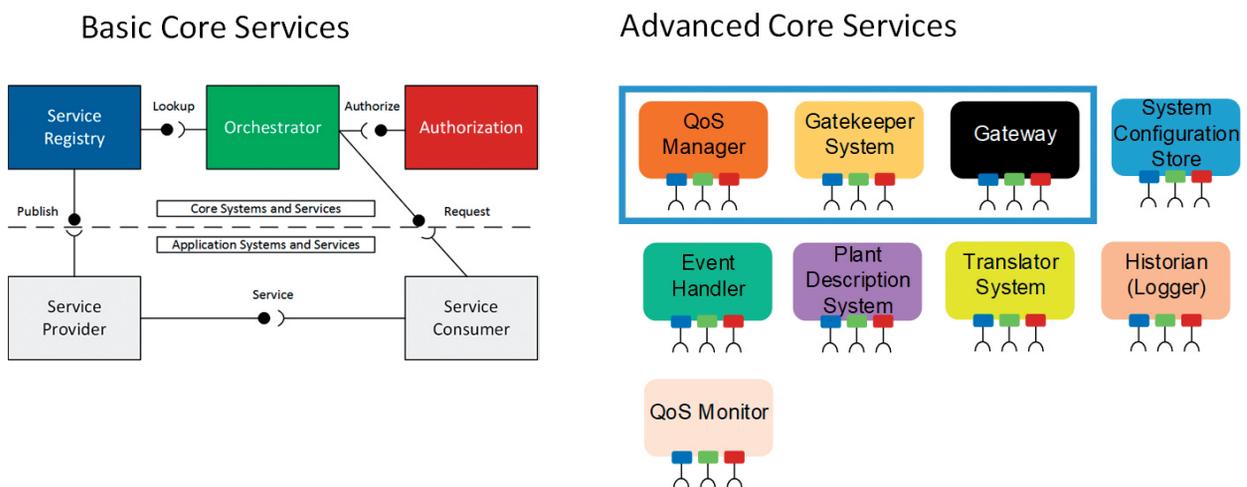


Figura 3: Servicios Base y Avanzados de la plataforma Arrowhead. Fuente: Proyecto Productive 4.0

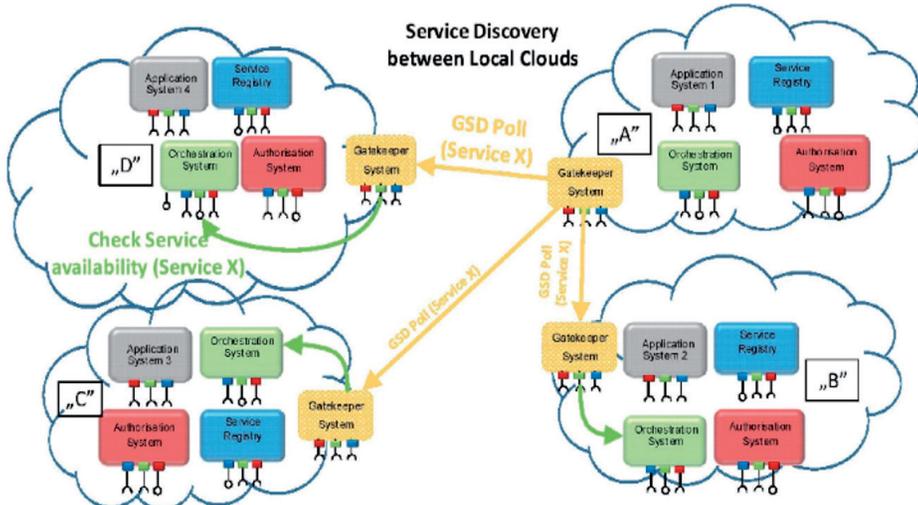


Figura 5: Arquitectura Arrowhead para interconectar diferentes nubes locales. Fuente: Proyecto Productive 4.0

- Facilitar la integración de nuevos componentes.
- Incrementar la seguridad y fiabilidad de los sistemas.
- Facilitar la labor de ingeniería.

Un requerimiento esencial entre las nubes locales es la capacidad de intercomunicarse de una forma segura. Para ello, el framework Arrowhead ofrece un servicio de soporte denominado Gatekeeper, que permite establecer comunicaciones seguras entre distintas nubes locales, como se muestra en la Figura 5.

El Gatekeeper ofrece dos funcionalidades esenciales:

- **Localización Global de servicios:** capacidad de localizar en el conjunto de nubes locales el proveedor de

servicio más adecuado.

- **Negociación entre nubes:** valoran y gestionan aspectos como el protocolo a utilizar, el chequeo de identidades y autenticaciones, la autorización y el establecimiento de un canal seguro para el acceso al Proveedor de Servicios de la nube que gestiona el Gatekeeper.

Esta conectividad entre nubes locales permite desarrollar una arquitectura por capas como se propone en el modelo de referencia RAMI 4.0. Así, como puede verse en la Figura 6, podemos disponer de nubes locales destinadas a la monitorización y control de una determinada máquina o nubes locales asociadas a la gestión de un proceso o incluso integradas en una arqui-

tectura de gestión empresarial basada en servicios, resolviendo fácilmente los problemas de interoperabilidad inherentes.

Uno de los objetivos de RAMI 4.0 es extender la gestión del proceso de fabricación a todo el ciclo de vida del producto. Esto debe posibilitar la monitorización del comportamiento de éste en su utilización por el cliente y también posibilita la servitización del producto proporcionando servicios de alto valor añadido por el fabricante del producto.

Esta arquitectura basada en nubes locales interconectadas permite establecer una relación controlada y segura entre el fabricante del producto y el usuario de producto constituyéndose en una plataforma IoT escalable.

Además, la utilización de contenedores para el despliegue de los servicios de Arrowhead facilita la escalabilidad de forma simple y efectiva, ya que partiendo de una imagen de contenedor base, es trivial lanzar más instancias de servicios. La utilización de contenedores permite, además, proveer de aislamiento a los servicios de Arrowhead, separándolos de otros servicios que pudieran estar ejecutándose en la máquina, proporcionando mayores niveles de seguridad.

Esta arquitectura tiene las siguientes características:

- **Versatilidad:** permite ofrecer al cliente un producto que tiene una nube local autónoma con servicios de valor añadido.
- **Escalabilidad:** tanto desde el punto de vista de la automatización de

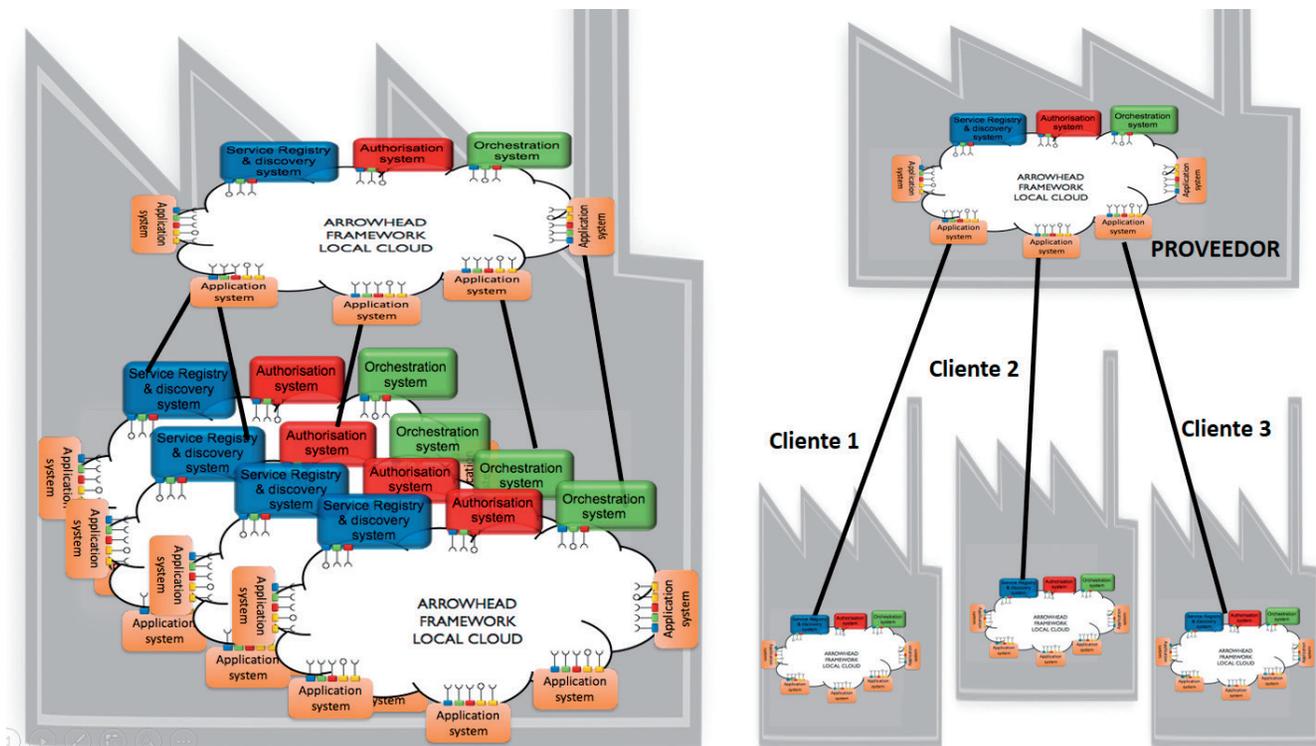


Figura 6: Gestión empresarial e interempresarial basada en interconexión de nubes locales. Fuente: Elaboración propia

sistemas de gestión empresariales como de servitización de productos.

- **Interoperabilidad:** conseguida con los servicios centrales del Framework de Arrowhead que facilitan la localización de servicios con el protocolo requerido y su capacidad de realizar la conversión automática entre protocolos.
- **Adaptabilidad:** facilidad de integrar nuevos sistemas a cualquiera de los niveles.

## 5. CASO DE USO

El objetivo principal del caso de uso es pasar de un modelo de negocio basado solo en producto (Rectificadora LG de Danobat), a un modelo basado en el concepto PRODUCTO-SERVICIO donde la máquina herramienta ofrece información y servicios de valor añadido como soporte al mantenimiento, la producción o la calidad. Este intercambio de información se hace mediante el framework de Arrowhead que ofrece una arquitectura de sistemas/servicios que facilita la digitalización y automatización de la producción. Este objetivo general se divide en el proyecto Productive 4.0 en dos objetivos específicos:

- 1) Diseño y desarrollo de un servicio de mantenimiento avanzado a nivel de máquina para mejorar la disponibilidad. La máquina herramienta es transformada en un sistema ciberfísico que proporciona una capa de servicios compatibles con Arrowhead y muestra su estado y condición en tiempo real. Además, la máquina es capaz de integrar / cooperar con cualquier otro sistema compatible con Arrowhead para ofrecer servicios de valor añadido. Si el sistema de producción donde se integra la máquina herramienta carece del framework Arrowhead, la máquina herramienta se encargará de desplegar los servicios "core" de Arrowhead mediante el empleo de contenedores Docker.
- 2) Diseño y desarrollo de un servicio de eficiencia para aumentar la productividad y garantizar la calidad. El sistema de producción asociado a la máquina herramienta proporciona información completa sobre el estado de la máquina y el proceso de fabricación. Este servicio combina servicios a nivel de máquina y a nivel de plataforma.

En el caso de uso, la rectificadora de Danobat proporciona información de sus componentes, de la producción y del con-

texto (temperatura, vibración, velocidad, tiempos de parada...). La empresa Savvy se encarga de activar estas funciones utilizando un gateway SAVVYBOX, el cual posibilita el intercambio de datos y comandos con la plataforma en la nube. Además, utilizando tecnología Docker se despliega el framework de Arrowhead en el gateway posibilitando la interoperabilidad de servicios en la planta. Así se pueden presentar nuevas funcionalidades a nivel de planta como son la incorporación de interfaces de visualización que consuman los datos proporcionados por la rectificadora o la integración de la rectificadora en procesos de planta controlados por sistemas MES, PLM o ERP. Para demostrar la conexión de otros sistemas/servicios en planta, se integra un CPS proporcionado por ULMA en la solución mediante el framework de Arrowhead. Este CPS integra sensores en los husillos que proporcionan información de presión y temperatura.

Los datos de la máquina de Danobat y los del CPS de ULMA, así como los de terceros, se pueden subir a la plataforma. En esta plataforma en la nube se recolectan y generan los datos necesarios para proveer información a los interesados y crear nuevas herramientas y servicios. Toda esta información puede ser consultada por terceras personas o entidades mediante aplicaciones y servicios disponibles en la nube aumentando la capacidad de ofertar modelos de negocio innovadores (mantenimiento preventivo, gestión ciclo de vida, etc).

## 6. CONCLUSIONES

En el presente trabajo, se ha mostrado la arquitectura de referencia interoperable y escalable que se ha diseñado en el marco del proyecto Productive 4.0. La solución basada en el framework Arrowhead permite cambiar de paradigma en el modelo de negocio de la máquina herramienta pasando a ofrecer servicios de alto valor añadido sobre el producto.

La servitización de la rectificadora posibilita extender el negocio a todo el ciclo de vida. Danobat visualiza la utilización de los datos y su análisis como soporte al mantenimiento predictivo en base a la monitorización del funcionamiento de la máquina después de su venta. Las arquitecturas propuestas y los datos recopilados en la plataforma tienen también aplicación en las etapas de preproducción, por ejemplo, para diseñar nuevos productos/sistemas basados en la simulación o gemelos digitales, así como soporte al cliente en la mejora del proceso de producción (reducción de tiempos de fabricación u optimización consumo energético).

Los contenedores (Dockers) además de facilitar la configuración y el despliegue de servicios en los dispositivos que conforman la arquitectura, posibilitan la recogida y tratamiento de datos en sistemas embebidos conectados directamente a las máquinas. Esto permite la interpretación de los datos y la toma de decisiones a nivel de máquina llevando así parte de la inteligencia a los sistemas ciberfísicos que la gobiernan y reduciendo los tiempos de respuesta ante eventos que requieren atención inmediata.

Es conveniente resaltar que uno de los objetivos del proyecto Productive 4.0 es incrementar el nivel de madurez (TRL: technology readiness level) del framework Arrowhead. El objetivo marcado es llevar la solución a una TRL 7-8 (sistema preparado para operar en un entorno industrial real). Para poder conseguir dicho objetivo, ha sido indispensable llevar a cabo la investigación y su desarrollo en colaboración con la industria que la va a explotar. Entre las lecciones aprendidas principales está que la investigación tiene que ir acompañada del interés industrial real para poder llegar a tener una solución madura.

## REFERENCIAS

- [1] Industry 4.0 Platform, «Reference Architectural Model Industrie 4.0 (RAMI4.0). Übersicht: Publikationen der Plattform Industrie 4.0.» 2016.
- [2] «Productive 4.0.» [En línea]. Available: <https://productive40.eu/>. [Último acceso: 4 4 2018].
- [3] IERC, «ERC European Research Cluster on the Internet of Things.» [En línea]. Available: <http://www.internet-of-things-research.eu/>. [Último acceso: 2018].
- [4] G. Bajaj, R. Agarwal, P. Singh y N. Georgantas, «A study of existing Ontologies in the IoT-domain.» CoRR Journal, n° <http://arxiv.org/abs/1707.00112>, 2017.
- [5] M. D. H. y D. M. L., «An Assessment of Internet of Things Protocols for Resource-Constrained Applications.» de IEEE 40th Annual Computer Software and Applications Conference (COMPSAC), 2016.
- [6] S. Kraijak y P. Tuwanut, «A survey on IoT architectures, protocols, applications, security, privacy, real-world implementation and future trends.» de 11th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM 2015), 2015.
- [7] G. Di Orio, O. Matei, S. Scholze, D. Stokic, J. Barata y C. Cenedese, «A Platform to Support the Product Servitization.» International Journal of Advanced Computer Science and Application. (IJACSA), vol. 7, n° 2, 2016.
- [8] Delsing J., «The Arrowhead Framework architecture IoT Automation: Arrowhead Framework.» pp. 45-91, 2017.
- [9] S. Soltész, H. Pötzl, M. Fiuczynski, A. Bavier y L. Peterson, «Container-based operating system virtualization: a scalable, high-performance alternative to hypervisors.» InACM SIGOPS Operating Systems Review, vol. 41, n° 3, pp. 275-287, 2007.
- [10] J. Rufino, M. Alam, J. Ferreira y et al., «Orchestration of containerized microservices for IIoT using Docker.» de IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), Toronto, 2017.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido parcialmente subvencionado por el proyecto PRODUCTIVE 4.0, TEKINTZE (Elkartek 2018) e Ikerketa Taldeak del Gobierno Vasco. PRODUCTIVE 4.0 ha recibido subvención de la empresa común ECSEL a través del acuerdo de subvención núm. 737459. Esta empresa común recibe apoyo del programa de investigación e innovación de la Unión Europea Horizon 2020, y los ministerios españoles de economía, industria y competitividad (MINECO) y de energía, turismo y agenda digital (MINETAD).