

Proyecto Fin de Carrera Ingeniería de Tecnologías industriales

Elaboración de un modelo de digitalización de activos para el mantenimiento industrial 4.0

Autor: Pilar Jiménez Alonso

Tutor: Antonio Jesus Guillén López

**Dpto. Organización Industrial y Gestión de
Empresas I
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla**



Sevilla, 2022



Proyecto Fin de Carrera
Ingeniería de Tecnologías industriales

Elaboración de un modelo de digitalización de activos para el mantenimiento industrial 4.0

Autor:

Pilar Jiménez Alonso

Tutor:

Antonio Jesus Guillén López

Profesor Titular

Dpto. Organización Industrial y Gestión de Empresas I
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2022

Proyecto Fin de Carrera: Elaboración de un modelo de digitalización de activos para el mantenimiento industrial 4.0

Autor: Pilar Jiménez Alonso

Tutor: Antonio Jesus Guillén López

El tribunal nombrado para juzgar el trabajo arriba indicado, compuesto por los siguientes profesores:

Presidente:

Vocal/es:

Secretario:

acuerdan otorgarle la calificación de:

El Secretario del Tribunal

Fecha:

Agradecimientos

A mi familia, y en especial a mis padres por su paciencia y ayuda durante todo este proceso, y por enseñarme siempre con el ejemplo, como con trabajo y esfuerzo todo es posible.

A mi profesor, jefe y tutor Antonio Guillén, no solo por su ayuda y guía durante la realización de este trabajo, sino también por brindarme la gran oportunidad de trabajar a su lado en este proyecto, permitiéndome aprender y adquirir tantos nuevos conocimientos y experiencia, e impulsarme a conocer este ámbito de la ingeniería como es el mundo de la investigación; además de tener la ocasión de poder conocer a grandes profesiones del sector tanto dentro de esta universidad como de fuera de ella.

Sevilla, 2022

Resumen

Como consecuencia de la digitalización de procesos que se viene desarrollando en los últimos años, han ido apareciendo numerosas referencias que proponen metodologías de digitalización para las organizaciones industriales; sin embargo, destaca la ausencia de referencias generalizadas que faciliten la digitalización de nuevas empresas y permitan la interoperabilidad con el resto de sistemas.

Es por dicha razón que este trabajo propone un modelo de digitalización de activos, enfocado principalmente en la fase de mantenimiento industrial, que permita la conectividad y funcionalidad industrial 4.0 de los activos. Basada en la revisión realizada de la literatura científica, se describe el desarrollo de una referencia de visión global, con el fin de estandarizar y simplificar el proceso de digitalización de activos, y facilitar la gestión de su mantenimiento, dificultada en muchas ocasiones debido a la gran variedad de conceptos y metodologías, y la discrepancia entre ellos.

Para la validación y justificación de la solución propuesta se plantea además una prueba de conceptos mediante un caso práctico a modo de ejemplo.

Abstract

As a result of the digitisation of processes that has been developing in recent years, numerous references have been appearing that propose digitisation methodologies for industrial organisations; however, there is a notable lack of generalised references that facilitate the digitisation of new companies and allow interoperability with other systems.

It is for this reason that this work proposes an asset digitisation model, mainly focused on the industrial maintenance phase, which enables connectivity and industrial 4.0 functionality of assets. Based on the review of the scientific literature, the development of a global vision reference is described, with the aim of standardising and simplifying the asset digitisation process, and facilitating the management of their maintenance, which is often difficult due to the great variety of concepts and methodologies, and the discrepancy between them.

In order to validate and justify the proposed solution, a proof of concepts is also proposed by means of a practical case study as an example.

Índice

<i>Resumen</i>	III
<i>Abstract</i>	V
<i>Índice de Figuras</i>	XI
<i>Índice de Tablas</i>	XIII
1 Introducción	1
1.1 Objetivos e interés del TFG	1
1.2 Metodología	3
1.2.1 Estrategia de investigación del proyecto	3
1.2.2 Estrategia de investigación del Trabajo Fin de Grado dentro del Proyecto	7
Aportación en papers	10
1.3 Contexto de Gestión de activos y mantenimiento	10
Gestión de activos	11
Gestión del mantenimiento	12
Gestión del riesgo	15
2 Estado del arte de modelos de activos digitales	19
2.1 Modelado digital de activos	19
2.1.1 Building Information Model [BIM]	20
2.1.2 Asset Information Model [AIM]	23
2.1.3 Digital Twin [DT]	27
2.1.4 RAMI 4.0	29
2.1.5 Asset Administration Shell [AAS]	31
2.1.6 Cognitive Digital Twin [CDT]	34
2.2 Revisión de estándares y referencias de modelos digitales	35

2.2.1	Information Management Framework [IMF]	37
2.3	Comparación de referencias	38
2.4	Principales dificultades de los modelos de activos digitales	40
3	Propuesta de modelo de activos digitales	43
3.1	Componentes básicos del modelado	43
	Ciclo de vida	44
	Jerarquía del modelo	45
	Descripción del activo	46
3.2	Arquitectura	48
3.2.1	Arquitecturas de referencia	49
	ISO 232471	49
	CDT [59]	51
	Comparación arquitecturas de referencia	53
3.2.2	Propuesta de arquitectura	54
	Comparación arquitecturas	56
3.2.3	Comparación con las referencias analizadas	58
4	Búsqueda de tecnología de implementación	61
4.1	Comparación tecnologías disponibles	61
4.1.1	Microsoft Azure	62
4.1.2	Google Clouds	63
4.1.3	AWS Amazon	64
4.1.4	Comparativa de elementos	65
4.2	Conclusiones y elección de la tecnología	66
5	Caso de estudio	69
5.1	Contextualización del caso práctico	70
	Sector ferroviario	70
	Gestión del mantenimiento en el sector ferroviario	70
5.2	Descripción caso práctico	71
5.3	Implementación del caso práctico	73
5.3.1	Componentes básicos	73
	Jerarquía del activo	73
	Descripción del activo	74

5.3.2	Modelado de la toma de decisiones basado en control del riesgo en el modo de fallo	77
5.4	Implementación de la arquitectura sobre la tecnología Azure	81
5.4.1	Ubicación elementos Azure en la arquitectura	81
5.4.2	Distribución de la arquitectura en la nube	82
6	Conclusiones	87
	<i>Bibliografía</i>	91
	Apéndice Paper Congreso	97
1	Review of asset digitalization models in the context of intelligent asset management and maintenance.	97
	Abstrac	97
1.1	Introduction	98
1.2	Review of references related to digital asset modelling	99
	Building Information Model (BIM)	99
	Asset Information Model (AIM)	100
	Digital Twin (DT)	101
	RAMI 4.0 and Asset Administration Shell (AAS)	103
	Cognitive Digital Twin (CDT)	104
1.3	Comparison of references	105
1.4	Conclusion	107
1.5	Acknowledgements	107
	Apéndice Paper Publicación Científica	109
1	Development of a digital asset model in the context of smart maintenance 4.0	109
	Abstrac	109

Índice de Figuras

1.1	Cronograma Proyecto INMA	7
1.2	Metodología de investigación de este trabajo.	8
1.3	Proceso de toma de decisiones de mantenimiento	14
2.1	Estructura modelo BIM	21
2.2	Ejemplo de relación IFC con los distintos elementos y sus clases	22
2.3	Componentes AIM [24]	24
2.4	Proceso propuesto por la norma PAS 1192-2: 2013 [54]	26
2.5	Proceso propuesto por la norma PAS 1192-3: 2014 [8]	26
2.6	Jerarquía del gemelo digital [31]	27
2.7	Componentes del Gemelo Digital	28
2.8	Estructura RAMI 4.0 [51]	30
2.9	Arquitectura propuesta por RAMI 4.0	30
2.10	Visión general de un ejemplo de aplicación [46]	32
2.11	Ejemplo de estructura del modelo AAS	33
2.12	Arquitectura interna RAMI 4.0	35
2.13	Estructura de núcleo propuesta por IMF	38
3.1	Conceptos básicos del modelo en mapa tridimensional	44
3.2	Fases del ciclo de vida del activo	45
3.3	Jerarquía de niveles del modelo	46
3.4	Capas de descripción de activo	47
3.5	Arquitectura de referencia ISO 23247 [52]	50
3.6	Arquitectura de referencia del CDT [59]	52
3.7	Comparación de componentes arquitecturas de referencia	53
3.8	Arquitectura de referencia propuesta	54

5.1	Imagen de la vía a escala situada en la azotea de la escuela	71
5.2	Trayectoria de la vía en los ejes cartesianos	72
5.3	Vehículo a escala	72
5.4	Visualización de las secciones en la vía a escala	73
5.5	Estructura técnica del caso de uso	75
5.6	Ejemplo ubicación puntos de control (PCi) en la sección	77
5.7	Modelado del proceso de toma de decisiones	78
5.8	Ejemplo visualización cambios de estado	80
5.9	Arquitectura propuesta y elementos Azure	82
5.10	Ubicación de los elementos Azure en la nube	84
5.11	Proceso simplificado del transcurso de la información en la nube	85
1	BIM model structure	100
2	AIM model structure [24]	101
3	Digital Twin as “brick” of complex system’s digital twin [31]	102
4	RAMI 4.0 dimensions [51]	103
5	AAS architecture [57]	104
6	CDT dimensions [59]	105

Índice de Tablas

2.1	Definiciones de BIM	20
2.2	Definiciones de AIM	24
2.3	Análisis de E. Negri[39] de artículos de DT en la industria	29
2.4	Recopilación de referencias y normas	36
2.5	Recopilación de referencias y normas	39
2.6	Comparación de referencias según elementos IMF	40
3.1	Comparación elementos arquitecturas	57
3.2	Comparativa de las referencias con el modelo propuesto	58
4.1	Comparación elementos Azure - Google - Amazon	66
5.1	Variables de monitorización del caso práctico	76
5.2	Variables geométricas del caso práctico	76
5.3	Modos de fallo definidos	78
5.4	Relación elementos arquitectura propuesta y elementos Azure	81
1	Comparison of references on digital asset modelling	106

1 Introducción

Este primer capítulo se enfoca en la presentación del trabajo y estudio llevado a cabo en la realización de este Proyecto Fin de Carrera. Para ello se describe la problemática actual que da interés a este estudio, se enumeran los distintos objetivos, y se plantean los resultados obtenidos. Asimismo, se incluye la descripción de la metodología de investigación utilizada, y una introducción al contexto del mantenimiento industrial.

1.1 Objetivos e interés del TFG

Este Proyecto Fin de Carrera plantea la investigación y el desarrollo de un modelo digital completo de un activo o conjunto de activos, enfocado al mantenimiento industrial. En él, todos los datos e información disponible sobre los activos, a lo largo de su ciclo de vida completo, se estructurarán y gestionarán de manera optimizada teniendo en cuenta la interoperabilidad de todos los sistemas y tecnologías disponibles, además de los diferentes objetivos y procesos de la propia organización.

Se puede afirmar como en la industria actual se viene desarrollando el proceso de digitalización de los activos físicos en gran parte de las empresas, surgiendo la necesidad de gestión de dichos activos digitales. Como consecuencia han ido apareciendo algunas referencias en un intento de dar solución a dicha gestión digital en casos concretos.

La presencia de pocos estudios y referencias de soluciones generalizadas en este ámbito, y las discrepancias entre ellos, genera la aparición de dificultades, condicionando la correcta y óptima gestión del valor de la organización. Los principales retos a los que se enfrenta este estudio son:

- La aparición de problemas de interoperabilidad de la información del activo, como consecuencia de la falta de concordancia entre el concepto de activo que proporcionan

las distintas organizaciones.

- La necesidad de estructurar de forma adecuada todos los datos, información y conocimientos de un activo, provenientes de las diferentes fuentes de información y tecnologías presentes en el propio activo o que interactúan con él.
- La importancia de las funciones digitales en las que interviene propio activo, ya sean procesos o servicios que se ofrecen a partir del activo digital, y su relación con la toma de decisiones que afectan al activo físico en su ciclo de vida completo.
- La falta de integración entre los sistemas, al ser la digitalización de las organizaciones, un proceso que se encuentra todavía en pleno desarrollo, y por tanto no aparece totalmente implementada en todos los aspectos de la empresa.
- La ausencia de referencias durante la fase de mantenimiento de los activos, en la cuál se enfoca este proyecto.

Las dificultades descritas añaden cierta complejidad al proceso; una primera conclusión previa al estudio, manifiesta la ausencia de una visión global y la carencia de modelos de referencia, que faciliten el desarrollo y la integración de las capacidades de la digitalización para la posterior gestión de los procesos de las empresas.

Como consecuencia aparece la necesidad de estudio de estos conceptos, y de desarrollo y estandarización de un modelado generalizado en esta industria, que dé una nueva visión a la digitalización y gestión digital de activos más completa e integrada orientada al desarrollo sostenible de las empresas y al mantenimiento. Se busca por ello:

- Una definición concreta de concepto de activo digital, y descripción práctica de cada uno de sus componentes, que permita la estandarización de conceptos y metodología, facilitando el inicio de futuras investigaciones.
- La elaboración de un modelo estándar completo orientado a su uso práctico en cualquier tipo de empresa o sector industrial, a través de la revisión de los diferentes modelos de activos usados en la industria.
- Una referencia que permita crear un sistema complejo de activos digitales favoreciendo la interacción entre ellos, además de la interacción a través de una interfaz de usuario, facilitando la gestión y toma de decisiones con relación a dichos activos.
- La realización de una prueba de conceptos con el propósito de demostrar todas las ventajas que puede aportar el modelo de digitalización que se quiere proponer a la problemática industrial actual.

- La justificación y validación del modelo mediante una serie de casos prácticos industriales de referencia, como base para la implementación y uso del modelo.

La búsqueda de los objetivos enumerados, lleva este trabajo a la consecución de los siguientes resultados:

- Elaboración del estado del arte de modelos de activos digitales, mediante la revisión de las referencias de la literatura científica más recientes.
- Desarrollo de una arquitectura de integración para el modelo de activos digitales propuesto.
- Revisión de las tecnologías necesarias para la implementación de la arquitectura desarrollada, y comparación de las diferentes plataformas disponibles para ello, con la posterior elección de la plataforma Azure que ofrece Microsoft.
- Realización de una prueba de conceptos y justificación de la arquitectura desarrollada a través de la tecnología seleccionada de Microsoft.
- Validación del modelo de activos digitales mediante su implementación en el caso práctico de la vía de tren.

El interés de este Proyecto Fin de Carrera surge de la colaboración en el Proyecto de investigación de la Universidad de Sevilla, "INMA: Estrategias de Digitalización de Activos para el Mantenimiento Inteligente", durante los últimos 8 meses, el cual me ha permitido formarme en este tipo de tecnologías, además de participar en el desarrollo y puesta a prueba del modelado que este proyecto desarrolla.

1.2 Metodología

En este apartado se describe la metodología seguida durante la realización de la presente investigación, en dos líneas de trabajo diferenciadas. En primer lugar, se explica la estrategia de investigación adoptada desde el punto de vista del proyecto INMA; y acto seguido se expone la estrategia desarrollada durante la elaboración de este Proyecto Fin de Carrera, dentro del propio proyecto de investigación INMA.

1.2.1 Estrategía de investigación del proyecto

En primer lugar, se analiza a grandes rasgos la metodología llevada a cabo en el proyecto de investigación INMA por el equipo de trabajo; esta se distribuye esencialmente en 4

paquetes de trabajo técnicos (PTi), compuestos a su vez por diversas tareas (Tij), los cuales se desglosan a continuación:

1. Definición del dominio de la investigación y requerimientos:

- 1.1.— Estado del arte y tecnología disponible: consistirá en una revisión actualizada de la literatura científica incluyendo, gemelos digitales, plataformas IoT, uso avanzado de BIM para el mantenimiento, analítica predictiva, modelos de simulación, ontologías para el mantenimiento o sistemas de monitorización entre otros. Asimismo se establecerá un marco general para la interpretación de los resultados del proyecto.
- 1.2.— Análisis inicial de aplicabilidad industrial: acotación inicial de la posible aplicación industrial, y los requerimientos del desarrollo y uso del modelo. También se llevará a cabo un análisis de los procesos de toma de decisiones de mantenimiento, la caracterización del nivel de digitalización de estos procesos, además de los diferentes desafíos y barreras de entrada para su aplicación.
- 1.3.— Requerimientos y especificaciones para casos de uso: análisis de los casos de uso disponibles. Se analizarán los distintos sistemas, equipos y modos de fallo a considerar, además de los datos de monitorización y operativos disponibles, y las condiciones de acceso a los mismos.

2. Modelos analíticos como soporte a la toma de decisión inteligente:

- 2.1.— Soluciones y proceso de mantenimiento basado en condición (CBM): Se desarrollará una metodología que ordene, por una parte, los elementos básicos de estas soluciones; y por otro, el proceso end-to-end de este tipo de soluciones aplicadas al mantenimiento. Este desarrollo facilita la construcción y gestión de estas soluciones y el acceso a toda la información generada. Es un elemento fundamental de cara a la digitalización de los sistemas.
- 2.2.— Modelos de salud de activos y de coste de ciclo de vida: Se desarrollará un nuevo modelo que analice la información suministrada por el activo y relacionada con: la vida prevista del activo, las condiciones operativas y ambientales requeridas en el diseño, y las condiciones operativas y ambientales reales en la explotación del activo. Para la predicción de la evolución del modelo, este cálculo se integrará en un modelo de simulación.
- 2.3.— Modelos sistémicos: Se desarrollará estrategias para la modelización de la degradación a nivel de sistema, teniendo en cuenta el conocimiento de los mecanismos

de fallo individuales/locales, sus dependencias funcionales, los factores externos que influyen y las incertidumbres asociadas. Se emplearán métodos de cálculo y simulación en el marco de la Inteligencia Artificial como los procesos de Markov, las redes bayesianas o Petri.

2.4.— Modelo de mantenimiento oportunista: Una vez modelados los escenarios de decisión es posible que determinadas acciones puedan realizarse en planes agregados por oportunidad. Estos planes se lanzan por la necesidad de una o varias acciones, pero incluyen adicionalmente otras acciones, que por su condición no serían necesarias en ese momento, pero por cuestiones de coste y movilización de recursos resulta óptimo realizarlas conjuntamente con las anteriores. Estos modelos emplean también herramientas de simulación.

3. Digitalización de la toma de decisión y marco AIM:

3.1.— Decisión de mantenimiento a nivel de activo/equipo: Se modelarán y parametrizarán los procesos de toma de decisión de mantenimiento a nivel de equipo/activo. Para ello se emplearán técnicas de análisis funcional, riesgo y mantenimiento, y modelos de indicadores de seguridad de funcionamiento. Se modelarán con especial detalle, los procesos de toma de decisión vinculados al mantenimiento predictivo. Se plantearán también distintos niveles de digitalización de la toma de decisión, siendo el nivel más bajo aquel en el que sólo se registran los datos básicos de la decisión y su ejecución, frente a la automatización completa de la decisión que conllevará el nivel más alto de digitalización.

3.2.— Decisión a nivel sistema/flota y a nivel de ingeniería de mantenimiento: en relación al conjunto de información y datos disponibles, se pueden llevar a decisiones que no afectan sólo a un activo en particular, sino a decisiones que afectan a varios activos o a la totalidad de la flota. Los modelos sistémicos incluyen la modelización de cómo determinados fallos y efectos de los fallos pueden impactar o propagarse a lo largo del sistema. Se analizará la información necesaria y el contexto de decisión de estos departamentos. En esta tarea se incluyen decisiones con gran impacto en la empresa como pueden ser decisiones generales sobre tipos de actuaciones de mantenimiento, detalles técnicos, modificaciones en los sistemas, o cambios de proveedores entre otras.

3.3.— Marco para el diseño implementación y uso del AIM: Se analizan la información necesaria y el contexto de decisión de estos departamentos. En esta tarea se llevarán

a cabo decisiones generales sobre tipos de actuaciones de mantenimiento, detalles técnicos, modificaciones en los sistemas, cambios de proveedores, adaptación de nuevas directrices normativas, verificación de cumplimientos, o auditorías entre otras. Son decisiones con mucho impacto en la empresa.

4. Prueba de concepto en la integración CLOUD/IoT del modelo AIM propuesto. Casos de uso.

- 4.1.— Integración hardware sobre plataforma IoT: se plantea el desarrollo de una plataforma IoT de manera flexible que permita simular distintos escenarios prácticos de utilidad del modelo AIM propuesto para la toma de decisión de mantenimiento. Atendiendo a este objetivo de flexibilidad, el planteamiento incluye por un lado la elección de dispositivos IoT en función de la complejidad de las actuaciones y del entorno en el que se encuentren; y la elección de protocolos.
- 4.2.— Integración software sobre plataforma cloud: se incluyen en esta tarea trabajos de adaptación del software previo propuesto e integración en plataforma cloud junto con otras aplicaciones y funcionalidades como ETL, servicios para cálculos analíticos o software de simulación BDs.
- 4.3.— Casos de uso: se implementarán distintos casos de uso sobre la plataforma desarrollada, los cuales se obtendrán de la colaboración con las empresas interesadas. Los casos de uso se diseñarán en función de los resultados anteriores, de forma que se puedan alimentar los modelos desarrollados, y se puedan validar dichos modelos y mostrar su utilidad práctica real.

Cabe mencionar como tanto el primer paquete como el cuarto se realizarán de forma paralela desde el inicio del proyecto, mientras que los paquete de trabajo 2 y 3 podrán comenzar a elaborar sus tareas una vez haya finalizado completamente las tareas del paquete de trabajo 1.

En relación a la extensión de cada paquete en el cronograma, para el primer paquete de trabajo se estima una duración estimada de unos tres meses, siendo el cuarto mes del primer año, el inicio del paquete 2, y un par de meses más tarde del paquete 3. Para el paquete 2, enfocado a la elaboración de modelos analíticos como soporte a la toma de decisión inteligente, se le estima una duración de dieciséis meses; mientras que el paquete dedicado a la digitalización de la toma de decisión y el marco de modelo se valora que se lleve a cabo hasta el momento de finalización del proyecto. Para acabar, el último paquete de trabajo, el



Figura 1.1 Cronograma Proyecto INMA.

cual se encarga de las pruebas de concepto en la integración del modelo propuesto tanto en la plataforma IoT y como en la plataforma CLOUD, además de la ejecución de los diferentes casos de uso; se desarrollará durante toda la extensión del proyecto de manera paralela al resto de paquetes de trabajo y tareas.

1.2.2 Estrategia de investigación del Trabajo Fin de Grado dentro del Proyecto

A continuación se procede a la descripción de la metodología, enfocada al desarrollo de este trabajo, haciendo mención especial durante este proceso a mi aportación al proyecto descrito.

Los resultados de mi participación en el proyecto INMA, pueden clasificarse en dos líneas de trabajo paralelas, una primera línea de investigación y contenido, y una línea de ejecución o redacción de documentos, tal y como se muestra en la figura 1.2.

De forma paralela a todo el proceso de trabajo, he llevado a cabo asimismo, un proceso de formación, obteniendo como resultado una gran variedad de conocimientos en mantenimiento de activos digitales, y en las diferentes tecnologías disponibles para ello, además de permitirme desarrollar mi aprendizaje en técnicas de investigación y redacción de documentos de colaboración científica.

La estrategia llevada a cabo durante el proceso de la línea de investigación comienza con una búsqueda bibliográfica, mediante la revisión del trabajo existente en la literatura

científica en relación a los conceptos, metodologías y tecnologías existentes para la gestión de la información de activos digitalizados. Durante este proceso se descubren numerosas referencias y modelos que intentan dar respuesta a las carencias mencionadas, como pueden ser los modelos BIM, AIM, o CDT entre otros, los cuales se desglosan en la siguiente sección, comparando sus diferentes características, propiedades y dificultades en busca de un modelo general que permita tener una visión global del valor de las empresas.

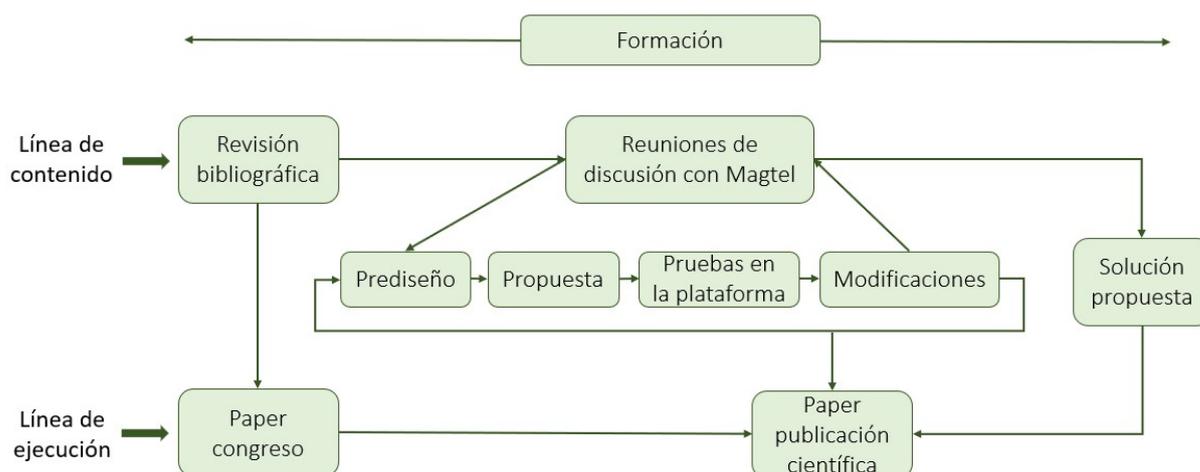


Figura 1.2 Metodología de investigación de este trabajo..

En esta primera parte del proceso de trabajo se plasma mi aportación al paquete de trabajo 1, consistente en la definición del dominio de la investigación y requerimientos mínimos, durante toda su duración.

El siguiente paso a realizar sería la presentación de un marco conceptual, basado en las conclusiones obtenidas de la revisión de las referencias, y enfocado a la estandarización de los conceptos más importantes y a la presentación de una referencia con el objetivo de apoyar la gestión y el uso integrados de los activos; facilitando la estructuración, extracción y transformación automática de los datos manteniendo la coherencia entre los elementos digitales y físicos, permitiendo así el funcionamiento completo del ecosistema. Para ello se escogerán dos referencias en concreto entre las analizadas, debido a su filosofía de uso e interconectividad de sistemas, con el fin de usarlas como fundamento para la referencia propuesta en este trabajo.

Debido a la complejidad y duración que tiene el desarrollo completo de un modelo de digitalización de activos, este trabajo se centrará dentro la solución propuesta, únicamente en el desarrollo completo de la propuesta de arquitectura, y justificación mediante caso de uso.

Por ello el proceso, continúa con la asistencia a una serie de reuniones con el equipo de trabajo y la empresa Magtel, cuya principal actividad fue la discusión de las principales propiedades del diseño, con el fin de establecer la especificación de los requisitos necesarios para el desarrollo del modelo generalizado de activos digitales que se quiere proponer.

Dichas discusiones se han fundamentado en un proceso cíclico de prueba y error, que comienza con el prediseño del modelado y la presentación de propuestas. A partir de ellas se realizarán diversas pruebas en la plataforma IoT; en base a los resultados obtenidos de dichas pruebas se llevarán a cabo las modificaciones oportunas, y vuelta al inicio del proceso hasta conseguir los requisitos de diseño esperados.

En este ámbito se desarrollan los paquetes de trabajo 2 y 3, enfocados a la elaboración de modelos que permitan soportar la toma de decisiones, y la correspondiente digitalización de dicha toma de modelos. Mi aportación se centra en los primeros meses de la extensión que presentan estos paquetes, enfocándose dentro de la creación de los modelos, en especial en la creación de uno de los componentes principales del modelo como es la arquitectura interna; y por ende en la discusión de los diferentes aspectos de la arquitecturas que tiene influencia en la toma de decisiones de mantenimiento y su digitalización.

De forma paralela, en la línea de redacción de documento, la participación en el proyecto se ve reflejada en la redacción de los todos los resultados obtenidos de la línea de investigación como pueden ser:

- Las conclusiones de las revisiones realizadas del estado del arte de modelos de digitalización de activos.
- El análisis de frameworks y arquitecturas de referencia para activos digitales.
- El análisis de requisitos para las soluciones a partir de los resultados obtenidos de las revisiones de las referencias.
- La descripción de un caso de uso como solución, desde el punto de vista del diseño, así como desde el punto de vista de la ontología y la arquitectura adaptada a la plataforma IoT/Cloud elegida.

Finalmente, se llevará a cabo la especificación y posterior justificación mediante un caso de uso, que en este caso particular será un caso práctico perteneciente al sector ferroviario que se explica más adelante. Dicho caso de uso, mediante la realización de ensayos y posterior estudio de la información recogida de estos, facilitará la prueba de los conceptos propuestos en el caso real ferroviario, permitiendo así la validación de la solución propuesta. Será necesario tanto una validación conceptual, es decir, justificar

como la representación propuesta del modelo y el activo como entidad es adecuada para el problema planteado; como una validación operativa consistente en la comprobación de la configuración establecida en la plataforma de cara a la obtención de resultados acordes al propósito de aplicación del modelo.

Este proceso de justificación y validación de la propuesta se desarrolla en el paquete de trabajo 4, a lo largo de la duración completa del proyecto INMA. En primer lugar, mediante la integración en las plataformas IoT y Cloud tal y como se ha comentado, lo cual se llevará a cabo mediante el uso de la tecnología proporcionada por una plataforma comercial, en concreto la tecnología Azure que pone Microsoft a disposición de los usuarios.

Para la realización de la validación mediante la implementación de casos de uso, es necesario que las tareas de integración en las plataformas se encuentren bastante avanzadas en el tiempo, sin ser estrictamente necesaria su finalización. Actualmente se ha comenzado con la última tarea de este último paquete, siendo mi aportación principalmente en la descripción del caso de uso.

Aportación en papers

Además de la participación en reuniones semanales con el equipo de trabajo, nos hemos ayudado en esta línea de investigación, de una vinculación con publicaciones académicas, consistente en la participación en el 16º Congreso Mundial sobre Gestión de Activos de Ingeniería, para el cual se aporta un primer paper titulado "*Review of asset digitalization models in the context of intelligent asset management and maintenance.*", el cual se incluye en el Apéndice A.

Como continuación del paper del congreso, y tras el desarrollo de una solución propuesta se participa también en la redacción de un segundo paper de publicación científica, como desarrollo de dicho paper de congreso, titulado "*Development of a digital asset model in the context of smart maintenance 4.0.*", con la finalidad de descripción de la arquitectura propuesta. Este paper se encuentra todavía en pleno desarrollo, sin embargo, se adjunta en el Apéndice B, el Abstract a modo resumen de lo que consistirá dicho paper.

1.3 Contexto de Gestión de activos y mantenimiento

La transformación que viene sufriendo la industria debido al desarrollo de nuevas tecnologías, es un proceso de evolución constante cuyos principales impulsores son la competitividad entre las organizaciones, y la sostenibilidad, entendida esta en su sentido más amplio. Este proceso se enfrenta, debido al estado actual del desarrollo científico y tecnológico, a

un nuevo reto: la transición desde soluciones tecnológicas discretas, que dan respuestas innovadoras a problemas aislados, a una concepción global y generalizada, donde tanto los activos, como los procesos o sistemas son elaborados, diseñados y explotados como una unidad compleja integrada de elementos interdependientes.

Mediante la contextualización de este trabajo, se pretende descubrir la demanda de investigación y estudio de los aspectos que esta evolución y desarrollo tecnológico exponen como necesarios para la evolución que se viene desarrollando en los procesos de gestión de las propias organizaciones. En este sentido, la gestión de activos y la gestión del mantenimiento se identifican como elementos clave de este reto.

Gestión de activos

Según la norma PAS 1192-3 2014 [8] un activo es cualquier "elemento, cosa o entidad que tiene un valor potencial o real para una organización", es decir, todo aquello que la empresa posee y le aporta valor.

Partiendo de esta base justificamos la importancia de una buena gestión de estos activos, de cara a la consecución de un mejor rendimiento de los propios activos, o a la minimización del costo de vida total de los activos entre otros, lo cual influirá de forma proporcional en un mayor valor para la empresa a un menor coste.

En términos más concretos la ISO 55000 [27] define la gestión de activos como "La actividad coordinada de una organización para obtener valor de los activos", es decir, el conjunto de acciones gestionadas de manera coordinadas, como pueden ser el diseño, la puesta en marcha, uso y mantenimiento de los propios activos. El Instituto de Gestión de Activos (*Institut for Asset Management, IAM*) aporta también una definición para el concepto de gestión de activos como: "el arte y la ciencia de tomar las decisiones correctas y optimizar los procesos de selección, mantenimiento, inspección y renovación de los activos".

Se estima por tanto necesaria debido al impacto en la toma de decisiones, una gestión holística de los activos en tres direcciones principalmente; por un lado de todo el valor del activo, incluyendo todos sus componentes y elementos, por otro lado de todo el sistema, constituido por el conjunto de activos y las interconexiones entre ellos, y finalmente de toda la línea temporal, es decir, la gestión durante el ciclo de vida completo.

La profunda evolución que experimenta la gestión de activos, surge como consecuencia de los buenos resultados obtenidos en su aplicación, además de los profundos cambios sociales y de los entornos de negocio que están provocando la actual revolución tecnológica, constituyendo la gestión de activos como un modelo eficaz y eficiente para enfrentarse a los retos y desafíos expuestos.

La gestión de activos proporciona un soporte estratégico y práctico adaptado a las dificultades actuales de organizaciones y entornos de negocio. Este modelo converge así, el empleo de principios y métodos de los sistemas de gestión, con la integración de las innovaciones tecnológicas.

Los principios estratégicos de la gestión de activos persiguen que la organización alinee y ajuste los recursos para satisfacer las necesidades de los clientes, en un entorno competitivo, y con el fin de maximizar los rendimientos para sus diferentes grupos de interés. De esta manera el gestor de activos se convierte en el responsable de los principales recursos de la organización, alineando los objetivos de su gestión con los objetivos del negocio, creando valor a largo plazo para las diferentes partes interesadas.

En sistemas industriales complejos y en el actual contexto 4.0, se demuestra cómo lo anterior sólo es posible mediante el empleo avanzado de las tecnologías de la información y las comunicaciones, que están revolucionando la manera en que los sistemas se mantienen y gestionan. Entre las consideradas tecnologías habilitadoras de la Industria 4.0 destacan aquellas tecnologías centradas en el tratamiento avanzado de los datos, la información y el conocimiento. Es necesario profundizar en la búsqueda de metodologías de análisis y modos de uso que permitan abrir estas técnicas a la organización, ya que la integración con los aspectos clave de la gestión las enriquece y permite vislumbrar su verdadero potencial transformador.

En un intento de dar soporte a la gestión orientada al valor de los activos, así como a los riesgos que dicha gestión conlleva, los organismos de normalización llevan a cabo su aportación con la publicación de la serie de normas ISO 55000:2014 sobre Gestión de Activos. Este conjunto de normas presenta, de forma generalizada, los requerimientos mínimos necesarios para establecer, implementar, mantener y mejorar, la gestión de cualquier tipo de activo, estableciendo un enfoque estratégico que permita incorporar las operaciones y las aplicaciones de mantenimiento para mejorar la disponibilidad y utilización de los activos. Estos requerimientos, traducen las necesidades de todas las partes interesadas de una organización, y permiten medir, y así mostrar, la capacidad de la misma para cumplir los requisitos legales, así como los propios de objetivos estratégicos de la organización, reflejo del concepto de valor de la organización.

Gestión del mantenimiento

Son muchas las actividades relacionadas con la gestión de activos que se han venido realizando desde que se empezaron a utilizar bienes de capital, edificios, sistemas de transportes, o cualquier otro tipo de activo de producción o de prestación de servicios.

Sin embargo, una gran mayoría de ellas han estado ligadas al mantenimiento, entendido como la función empresarial encargada del control de las instalaciones, así como de los trabajos de reparación y revisión, para garantizar el funcionamiento regular y el buen estado de conservación de las instalaciones productivas, servicios e herramientas para el control de los procesos de las organizaciones.

El concepto de mantenimiento aparece definido por la norma UNE EN 13306 [55] como la “combinación de todas las acciones técnicas, administrativas y de gestión realizadas durante el ciclo de vida de un elemento, destinadas a conservarlo o a devolverlo a un estado en el que pueda desempeñar la función requerida”.

El mantenimiento enlaza dos aspectos que lo colocan como pieza clave de esta revolución tecnológica; por un lado, es uno de los componentes básicos de la gestión de activos; por otro lado, es además el principal campo de aplicación de la monitorización y las técnicas analíticas, y, por tanto, donde éstas están teniendo un mayor desarrollo e impacto.

La gestión del mantenimiento ha pasado en los últimos años a un primer plano, convirtiéndose en una cuestión empresarial de gran importancia, como consecuencia del impacto que tiene como actividad de valor añadido, al permitir con sus acciones una mejora del estado de los activos, y por ende un aumento de su vida útil, lo que supone un mayor rendimiento del activo.

Esta norma incluye también una definición para la gestión del mantenimiento: "todas las actividades de la gestión que determinan los requisitos, los objetivos, las estrategias y las responsabilidades del mantenimiento y la implantación de dichas actividades por medios tales como la planificación del mantenimiento, el control de este y la mejora de las actividades de mantenimiento y las cuestiones económicas".

Existen principalmente dos estrategias de mantenimiento, según si la actividad de mantenimiento se realiza después o antes de que se produzca el fallo, como son el mantenimiento correctivo y el preventivo respectivamente. Dentro de este último se pueden distinguir además dos subtipos de mantenimiento preventivo como son el mantenimiento programado o predeterminado y el mantenimiento basado en la condición.

La norma UNE EN 13306 [55] define estos conceptos de la siguiente forma:

- Mantenimiento correctivo: "mantenimiento que se realiza después del reconocimiento de una avería y que está destinado a poner a un elemento en un estado en que pueda realizar una función requerida".
- Mantenimiento preventivo: "mantenimiento llevado a cabo para evaluar y/o mitigar la degradación y reducir la probabilidad de fallo de un elemento".

- Mantenimiento predeterminado: "mantenimiento preventivo que se realiza de acuerdo con intervalos de tiempo establecidos o con un número definido de unidades de funcionamiento, pero sin análisis previo de la condición del elemento."
- Mantenimiento basado en la condición: "mantenimiento preventivo que incluye una combinación de la evaluación de las condiciones físicas, el análisis y las posibles acciones de mantenimiento posteriores".



Figura 1.3 Proceso de toma de decisiones de mantenimiento.

En relación a la primera estrategia de mantenimiento definida, su principal ventaja consiste en la amortización total de la inversión realizada de los activos, ya que este no se sustituye hasta del final de su ciclo de vida, momento en el que se produce el fallo o avería. Sin embargo, son varios los inconvenientes que esto conlleva tanto en relación a las consecuencias que producen los fallos, por ejemplo, en materia de seguridad, medio ambiente o daños colaterales provocados a otros activos; como en relación a la planificación de la propia actividad de mantenimiento, al no poder llevarla a cabo como resultado de necesitarse de manera inesperada.

El mantenimiento preventivo, sin embargo, destaca por ser una actividad planificada, que permite reducir la tasa de fallos de los activos, y las averías inesperadas. Con respecto a los principales inconvenientes de esta estrategia, aparece la realización de una estimación demasiado conservadora en términos de la tasa de fallos del activo lo que podría llevar a

un mantenimiento excesivo, frente a una estimación demasiado optimista que podría por el contrario llevar a fallos imprevistos.

Las estrategias de mantenimiento descritas, ya sea por separado o en combinación de las dos, persiguen una serie de objetivos [32]:

- Objetivos de carácter técnico: vinculados a acciones operativas como la disponibilidad de los equipos o la seguridad del personal.
- Objetivos de carácter legal: ligados a las diferentes normativas de obligado cumplimiento presente en cada sector.
- Objetivos de carácter financiero: relacionados con la consecución de los objetivos técnicos a costes mínimos, teniendo además en consideración el rendimiento de ciclo de vida de los equipos buscando su maximización.

Además de los ya descritos, otros objetivos quizás no tan esenciales, del mantenimiento, serían los propios objetivos de las organizaciones; como consecuencia de estar la gestión de los activos directamente relacionada con la propia estrategia de la organización, el mantenimiento deberá enfocarse como objetivo final al aumento de los resultados empresariales.

Los modelos de mantenimiento se convierten por tanto en una herramienta realmente poderosa para la optimización, combinación e implementación de las diferentes estrategias de mantenimiento, de modo que se alcancen todos los objetivos descritos.

Al ser el fin principal de la propuesta de este trabajo la gestión del mantenimiento de activos digitales, con el objetivo de mejorar la fiabilidad de los sistemas de activos, previniendo la aparición de fallos y reducir el coste global del mantenimiento; toma especial importancia en este trabajo las acciones de mantenimiento preventivo, siendo aquellas que se pueden gestionar en la toma de decisiones. A continuación se describe cómo se va a llevar a cabo la toma de decisiones de mantenimiento a través del modelo propuesto.

Gestión del riesgo

En primer lugar, cabe mencionar dentro de la gestión del mantenimiento de los activos, la gran importancia que tiene el concepto de riesgo, entendido como la consecuencia de multiplicar la frecuencia o probabilidad de un fallo por la severidad del mismo [43]. El proceso de gestión del riesgo aparece definido en la ISO 31000 [16] como: "el conjunto de actividades coordinadas para dirigir y controlar la organización con relación al riesgo", definiendo también este último concepto como "el efecto de la incertidumbre sobre los objetivos".

Este proceso comienza en la recogida de datos e información mediante la ejecución de diferentes ensayos o del propio proceso de actividad del sistema. Los resultados obtenidos de estos ejercicios son los denominados eventos. Toda esa información disponible es llevada al nivel de riesgo a través de una especie de traductor universal, mediante el uso de distintas herramientas de análisis predictivo.

Los eventos se entienden como aquellos momentos, registrados o programados en el que el nivel de riesgo de los modos de fallo afectados por dicho acontecimiento debe volver a analizarse, es decir, tras la obtención de una serie de medidas, mediante la observación de estos y la comparación con unos rangos o intervalos predefinidos, se interpreta esta información, pudiendo influir en cambios en los estados de los activos [33]. Existen en la industria principalmente dos tipos de eventos, por un lado, tenemos los eventos de monitorización o inspección, frente a los eventos de acción de mantenimiento.

- Evento de monitoreo, son aquellos eventos o momentos que se programan a partir de la información generada por el proceso de monitorización del activo. Pueden ser eventos de detección, de diagnóstico o de pronóstico. Se pueden obtener de forma directa a través de las variables obtenidas, o mediante la combinación y cálculo a partir de diferentes datos recogidos.
- Eventos de acción de mantenimiento, son aquellos que se encargan de la ejecución de tareas de mantenimiento preventivo. Las acciones preventivas son aquellas que se ejecutan antes de que se produzca un fallo con el objetivo de evitarlo. Estos eventos pueden ser programados o no planificados. Se supone que las acciones preventivas permiten controlar los niveles de riesgo de fallo, ya sea reduciendo el nivel de riesgo o garantizando que el equipo se mantenga en un estado tal que el nivel siga siendo aceptable.

Se considera que tanto los eventos de monitoreo como los de mantenimiento preventivo provocan un cambio en el nivel de riesgo en los modos de fallo definidos. Es por ello que la existencia de eventos desencadena una necesidad de revisión o reevaluación del análisis de riesgo, para evaluar los efectos de dichos eventos en los estados de los activos. Se considera importante mencionar como un mismo evento puede afectar al mismo tiempo a diferentes modos de fallo, y de forma diferente para cada uno de ellos en términos de nivel de riesgo.

Este riesgo se aprecia en los activos a través de la definición de una serie de estados que permiten identificar el nivel de riesgo al que se encuentra el activo que se pretende gestionar. Aparece entonces el concepto de evaluación dinámica de riesgos como un método propuesto que analiza los resultados de los eventos en cuanto a su impacto en nivel de riesgo

de fallo, y facilita la planificación y gestión de la toma de decisiones de mantenimiento en función de la evolución del riesgo.

El proceso descrito de toma de decisiones partiendo de los datos recogidos de ensayos y eventos, pasando por su traducción a niveles de riesgo para su posterior evaluación, será el utilizado para la validación del modelo en la implantación del caso de uso, por esta razón este proceso para la toma de decisiones se desarrolla con mayor detalle en el apartado de descripción del caso de uso.

2 Estado del arte de modelos de activos digitales

En este capítulo se procede siguiendo la metodología expuesta en el apartado anterior, a la realización del estado del arte de los diferentes modelos de digitalización de activos encontrados en la literatura científica.

Para ello se llevará a cabo una revisión de las referencias encontradas de modelos enfocados a la gestión inteligente de los activos digitales, y la posterior comparación de sus principales elementos y retos a los que se enfrentan; además de la revisión de las diferentes normas que proponen la estandarización de los modelos analizados.

2.1 Modelado digital de activos

Para llevar a cabo la importante labor de la gestión de activos digitales, surge en la industria el concepto de modelo de activos, y a su vez un gran número variantes de este tipo de modelos.

Nos encontramos ante un concepto que no está estandarizado en la industria actual; la UNE ISO 29481-1 [26] define un modelo como “como la representación de un sistema que permite el análisis de las propiedades del sistema”; sin embargo, no existe en la literatura una definición estandarizada de lo que sería el concepto de modelo de activos. Esto conlleva a la aparición de numerosos modelos en la industria, que aunque con un objetivo similar, difieren en muchos aspectos, tales como las tecnologías implantadas, la forma de gestionar los datos, o la manera de definir o describir un mismo activo.

Este apartado se centra en el estudio de los principales y más usados modelos de activos que se pueden encontrar en la industria actual; se analizan sus características más esenciales,

las principales dificultades o problemas a los que se enfrentan cada uno de estos modelos, además de las diferencias y similitudes que pueden encontrarse entre todos ellos.

2.1.1 Building Information Model [BIM]

El *Building Information Model*, conocido por su abreviación como modelo BIM, es uno de los modelos más usados en la industria actual. Aunque tiene aplicación en diversos sectores, entre ellos la industria de procesos, es en la construcción, edificación e infraestructura donde tiene, hoy en día, una mayor aplicabilidad. En un principio puede parecer que el enfoque centra la aplicabilidad del BIM al comienzo del ciclo de vida de la instalación; sin embargo, se estima que la fase de operación y mantenimiento constituye aproximadamente el 60% del coste total del ciclo de vida de una instalación o edificio. Por consiguiente, BIM permite un enfoque holístico para el diseño, la construcción y la gestión de estas instalaciones.

Es por ello, y por su importancia en el sector, que se establece como uno de los modelos más referenciados de la industria. Son muchas las normas y las referencias que lo definen y presentan metodologías para su uso. En la Tabla 2.1 se exponen algunas de las principales definiciones que podemos encontrar en la literatura:

Tabla 2.1 Definiciones de BIM.

Referencia	Definición
[26]	Uso de la representación digital y compartida de un objeto construido (incluidos edificios, puentes, carreteras, etc.) para facilitar los procesos de diseño, construcción y operación conformando una base confiable para la toma de decisiones.
[54]	Proceso de diseño, construcción o explotación de un edificio o activo de infraestructura utilizando información electrónica orientada a objetos.
[56]	Un modelo BIM está constituido por una serie de elementos virtuales que permiten generar la representación digital de las características físicas y funcionales de un activo a partir de bases de datos de información, tanto gráfica como no gráfica, asociadas a los elementos que la componen, de acuerdo con los requerimientos y usos específicos de cada una de las fases del ciclo de vida del activo.
[45]	El modelado BIM proporciona a los interesados en el proyecto la capacidad de intercambiar datos e información entre diferentes tecnologías y procesos a lo largo de todo el ciclo de vida de los edificios.
[30]	El BIM es un proceso emergente de diseño, construcción o explotación de un edificio o infraestructura que utiliza información digital orientada a objetos.

Para este tipo de modelo [56] propone una estructuración mediante la generación de submodelos siguiendo dos enfoques distintos, tal y como se muestra en la figura 2.1.

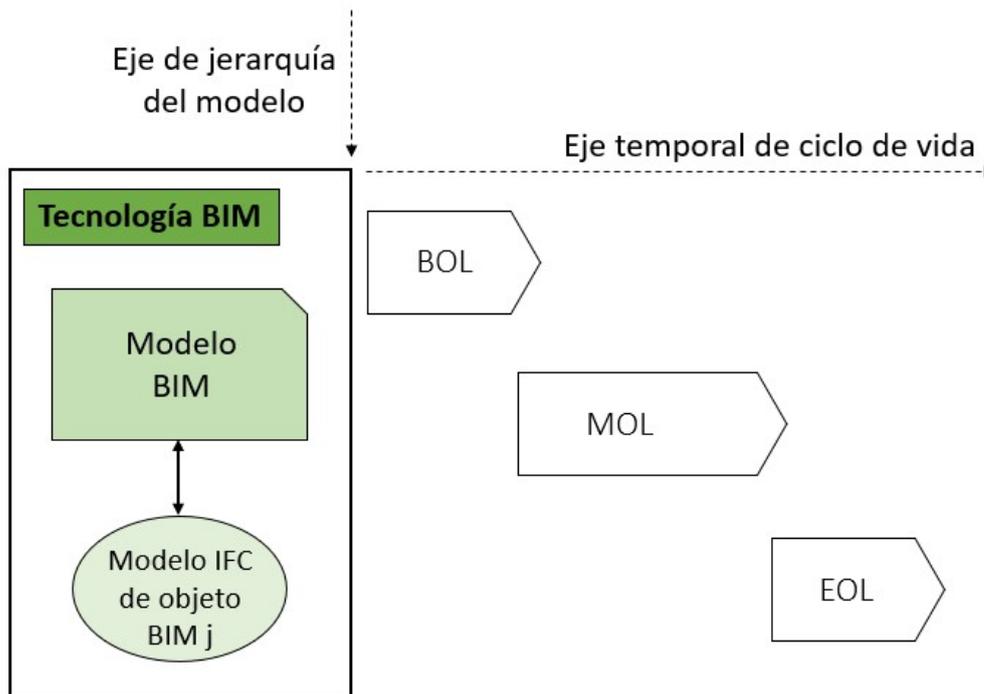


Figura 2.1 Estructura modelo BIM.

Por un lado, expone la necesidad de creación de diferentes modelos según la fase concreta del ciclo de vida en la que se encuentre el activo. Estos modelos que [56] definen como una "representación tridimensional digital de una intención constructiva", podrían denominarse modelos de evolución de ciclo de vida, entre los que podríamos encontrar: modelo de infraestructura existente, modelo de proyecto constructivo, modelo de licitación de obra o modelo para mantenimiento.

Por otro lado, tanto [56] como [24] coinciden en la propuesta de crear modelos de lenguaje IFC (*Industry Foundation Classes*) para llevar a cabo una estructuración o división del activo en objetos o elementos según las relaciones padre-hijo que hay entre ellos, y que están asociados a una clase particular para su mejor gestión, facilitando el intercambio de información, sin pérdida o distorsión de los datos.

Este lenguaje consiste en una forma de intercambio neutro, que se está fomentando a nivel internacional entre las empresas del sector de la construcción. Estos modelos en formato abierto sirven para compartir y transferir información estructurada a lo largo del ciclo de vida de los activos entre los agentes y parte interesadas, permitiendo desde la generación de modelos de soluciones con herramientas ajenas al software o la integración completa de dichos elementos como referencia en otros software; hasta la exportación de información o documentación asociada a los elementos modelados.

En la figura 2.2, se incluye un ejemplo de forma orientativa, de la entidad IFC y su asignación a cada tipología de los elementos contenidos en los modelos BIM [56]. En concreto esta figura muestra una tabla en la que se representa el ejemplo concreto de la vía del tren, en concreto de la estructura de la vía.

COD.	DISC.	SUBDISC.	ELEMENTO	COD. ELEMENTO	FVGClass	Entidad IFC asociada
VIA	Superestructura de Vía					
VIA		Eje				
VIA		EJE	Corredor ferroviario	COF	VIA_EJE_COF	IfcBuildingElementProxy
VIA		EJE	Punto Kilométrico ferroviario	PKF	VIA_EJE_PKF	IfcBuildingElementProxy
VIA		EJE	Poste Hectométrico ferroviario	PHF	VIA_EJE_PHF	IfcBuildingElementProxy
VIA		EJE	Referencia Punto Kilométrico	RPK	VIA_EJE_RPK	IfcBuildingElementProxy
VIA		EJE	Trazado ferroviario alzado. Acuerdo parabólico	APA	VIA_EJE_APA	IfcBuildingElementProxy
VIA		EJE	Trazado ferroviario alzado. Recta	ARE	VIA_EJE_ARE	IfcBuildingElementProxy
VIA		EJE	Trazado ferroviario planta. Clotoide	PCT	VIA_EJE_PCT	IfcBuildingElementProxy
VIA		EJE	Trazado ferroviario planta. Curva circular	PCC	VIA_EJE_PCC	IfcBuildingElementProxy
VIA		EJE	Trazado ferroviario planta. Recta	PNR	VIA_EJE_PNR	IfcBuildingElementProxy
VIA		Aparatos de Vía				
VIA		APV	Aparato de dilatación	APD	VIA_APV_APD	IfcBuildingElementProxy
VIA		APV	Bretelle	BRE	VIA_APV_BRE	IfcBuildingElementProxy
VIA		APV	Desvío	DSV	VIA_APV_DSV	IfcBuildingElementProxy
VIA		APV	Desvío Ferroviario Eléctrico	DFE	VIA_APV_DFE	IfcBeam
VIA		APV	Desvío Ferroviario Condenado	DFC	VIA_APV_DFC	IfcBeam
VIA		APV	Desvío Ferroviario Hidráulico	DFH	VIA_APV_DFH	IfcBeam
VIA		APV	Desvío Ferroviario Mecánico	DFM	VIA_APV_DFM	IfcBeam
VIA		APV	Desvío Tranviario Condenado	DTC	VIA_APV_DTC	IfcBeam
VIA		APV	Desvío Tranviario Eléctrico	DTL	VIA_APV_DTL	IfcBeam
VIA		APV	Desvío Tranviario Talonable	DTT	VIA_APV_DTT	IfcBeam
VIA		APV	Diagonal	DIA	VIA_APV_DIA	IfcBeam
VIA		APV	Encarriladora	ECR	VIA_APV_ECR	IfcBeam
VIA		APV	Escape	EPE	VIA_APV_EPE	IfcBeam
VIA		APV	Espadin	ESD	VIA_APV_ESD	IfcBeam
VIA		APV	Modificadores de fricción	MOF	VIA_APV_MOF	IfcBeam
VIA		APV	Travesía	TRV	VIA_APV_TRV	IfcBeam

Figura 2.2 Ejemplo de relación IFC con los distintos elementos y sus clases.

Resulta interesante en primer lugar, analizar la forma de estructuración que hace esta referencia de los equipos, de forma que agrupa los elementos en lo que denomina disciplinas, las cuales representan agrupaciones de elementos que tienen un denominador común. Por lo general esta división corresponde a la agrupación de elementos constructivos que hace el presupuesto por capítulos. Dentro de estas disciplinas pueden generarse distintas subdisciplinas como nivel intermedio entre las disciplinas y el elemento.

Por último, el último nivel de agrupación es la diferenciación por tipología de elementos. Cada elemento dispondrá de un código único que permita identificarlo, además de tener asociado una entidad IFC, que facilite su gestión independientemente del modelo en el que se implante. Se puede observar como el conjunto de elementos pertenecientes a la subdisciplina del eje de la vía tienen asociada la misma entidad IFC, al compartir una serie de características comunes en todos ellos que posibilita el uso de la misma metodología de gestión. En la subdisciplina de vía, se encuentran sin embargo una división de los elementos

en dos entidades IFC distintas, según las propiedades de cada elemento.

Asimismo esta referencia crea un conjunto de clases dentro de una librería propia, FVGCClass, que también utiliza como método de clasificación de los distintos elementos.

Finalmente, existen numerosas referencias ([56], [24], [45]) que proponen el desarrollo dentro de la tecnología BIM de una plataforma de extracción de datos, a partir de los cuales poder llevar a cabo el desarrollo de diagramas, para la creación de una base de datos que pueda almacenar la información exportada del modelo BIM. Las bases de datos exportadas se utilizan para su incorporación en sistemas de gestión (ej. GMAO); sin embargo, son muchas las ocasiones en las que aparecen limitaciones de integración de la información con estos sistemas de gestión de activos. Esto conlleva que en muchas ocasiones BIM no solo pueda entenderse como modelo, sino también como una tecnología, usada por otros modelos de activos como AIM, a la hora de realizar la extracción de datos del activo.

A modo de resumen entre los aspectos más destacables del BIM analizado como modelo de digitalización, se encontrarán desde el empleo de la gestión de activos como referencia básica para entender el potencial de un sistema digitalizado, hasta la búsqueda que hace de un sistema integrado de información y la interoperabilidad en su uso, mediante la estandarización de la información mediante formatos de datos como el lenguaje IFC comentado, y la integración de tecnologías.

2.1.2 Asset Information Model [AIM]

El *Asset Information Model* o AIM, se traduce al español como modelo de información de activos, y al igual que el modelo BIM, es uno de los más sonados en la industria, y como consecuencia de ello aparecen numerosas definiciones de este modelo en la literatura.

Muchos autores entienden el AIM como un almacén de datos e información proveniente del propio activo, que se centra esencialmente en la gestión de información de calidad, y en el acceso y visualización disponible de dicha información, principalmente durante la fase de operación del ciclo de vida.

La tabla 2.2 recoge algunas de las principales definiciones que se pueden encontrar para este modelo.

La literatura [24] [45] propone, tal y como se puede apreciar en la figura 2.3, la descomposición de este modelo en dos componentes esenciales. En primer lugar, presenta la necesidad de un sistema de gestión de documentos electrónicos (EDMS), que almacene toda documentación gráfica y no gráfica (WORD, EXCEL. . .) proveniente del activo y su actividad; posteriormente, necesita de un almacén de datos e información del activo, en el

Tabla 2.2 Definiciones de AIM.

Referencia	Definición
[47]	El AIM es un conjunto de información estructurada y no estructurada recopilada de todas las fuentes para facilitar la gestión de un activo que se utilizará durante la fase de explotación.
[13]	AIM es un modelo de información relativo a la fase de explotación de un activo.
[24]	Actúa como un repositorio central de datos que apoya los requisitos de la organización, incluyendo, entre otros, las decisiones operativas y de mantenimiento, la inversión de capital y el cálculo de los costes del ciclo de vida, la planificación y el presupuesto, y la planificación de contingencias/emergencias.
[45]	Un AIM es un modelo de datos que contiene todos los datos digitales (gráficos, no gráficos y documentales) necesarios para operar un activo o una cartera de activos.
[8]	Datos e información relacionados con los activos al nivel necesario para apoyar el sistema de gestión de activos de una organización.
[54]	Modelo de información mantenido utilizado para gestionar, mantener y operar el activo.

que poder incluir desde datos de ensayos y sensores, hasta registros de mantenimientos realizados. Ambos componentes son englobados en un entorno de datos común, cuyas siglas son CDE, definido por [13] como “Fuente de información acordada para cualquier proyecto o activo, para recopilar, gestionar y difundir cada contenedor de información, entendido como el conjunto de información persistente y recuperable desde un archivo, sistema o aplicación de almacenamiento jerarquizado, a través de un proceso gestionado”.

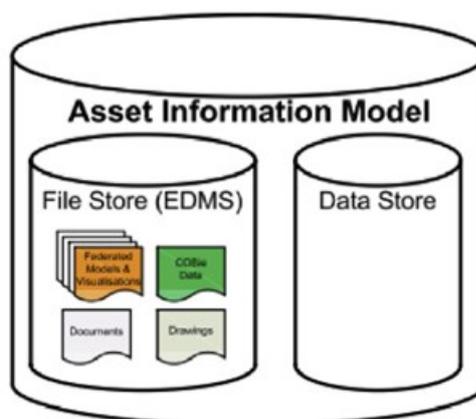


Figura 2.3 Componentes AIM [24].

Este entorno de datos supone en ocasiones problemas de integración de la información, debido a la falta de integración de los sistemas, cuyos datos no siempre son compatibles en tipo, formato o cantidad, con el resto de los sistemas o con el propio AIM, dificultando la interacción y procesamiento de los datos.

AIM utiliza una metodología basada en la tecnología BIM; para su aplicación se estima necesario la definición de un entorno de trabajo específico que cumpla una serie de requerimientos sobre el tratamiento de la información, la relación entre los agentes y el entorno tecnológico a implementar.

En relación a los requisitos de dicho entorno, el cual coincide con el CDE definido, este entorno debe:

- Permitir alojar y compartir información digital de manera estructurada.
- Estar basada en formatos abiertos, garantizando la interoperabilidad entre los diferentes sistemas.
- Permitir el acceso selectivo de participantes a la información generada.
- Establecer un protocolo de comunicación que garantice el acceso disponible a la información adecuada y actualizada.

AIM, propone también al igual que BIM, un sistema de exportación de datos mediante base de datos. Es por ello que ambos modelos pueden a menudo aparecer combinados, con el objetivo de una óptima gestión de la información obtenida y extraída a través del modelo BIM, introduciéndose en el almacén de datos del modelo AIM para su gestión y uso. Esta combinación no siempre optimiza el proceso, ya que frecuentemente aparecen limitaciones de interoperabilidad dentro del propio CDE, como se ha comentado antes debido a la incompatibilidad de los datos extraídos con el sistema de gestión AIM. Esto se debe en gran medida, a la ausencia de estandarización de tipos de datos y conceptos, lo cual lleva a la extracción de la información de una manera única y diferente para cada empresa, dificultando posteriormente la integración con el modelo AIM [47] [45].

Para ello se propone el concepto de modelo federado, entendido como la composición o relación de diferentes modelos, como pueden ser los modelos IFC o bases de datos; que permitirán la integración de la información del activo, y su completa visualización [23].

Entre las referencias que llevan a cabo el intento de estandarización de AIM, destacan las normas PAS 1192-2 y PAS 1192-3: 2014. Estas referencias se entienden como documentos complementarios que especifican el proceso de gestión de la información para apoyar el modelado de tecnología BIM en dos etapas:

- En la fase inicial que conforma desde la concepción a la recepción de la construcción, en la que destaca la PAS 1192-2 la cual da como resultado el PIM (Project Information Model) modelo de información del proyecto;

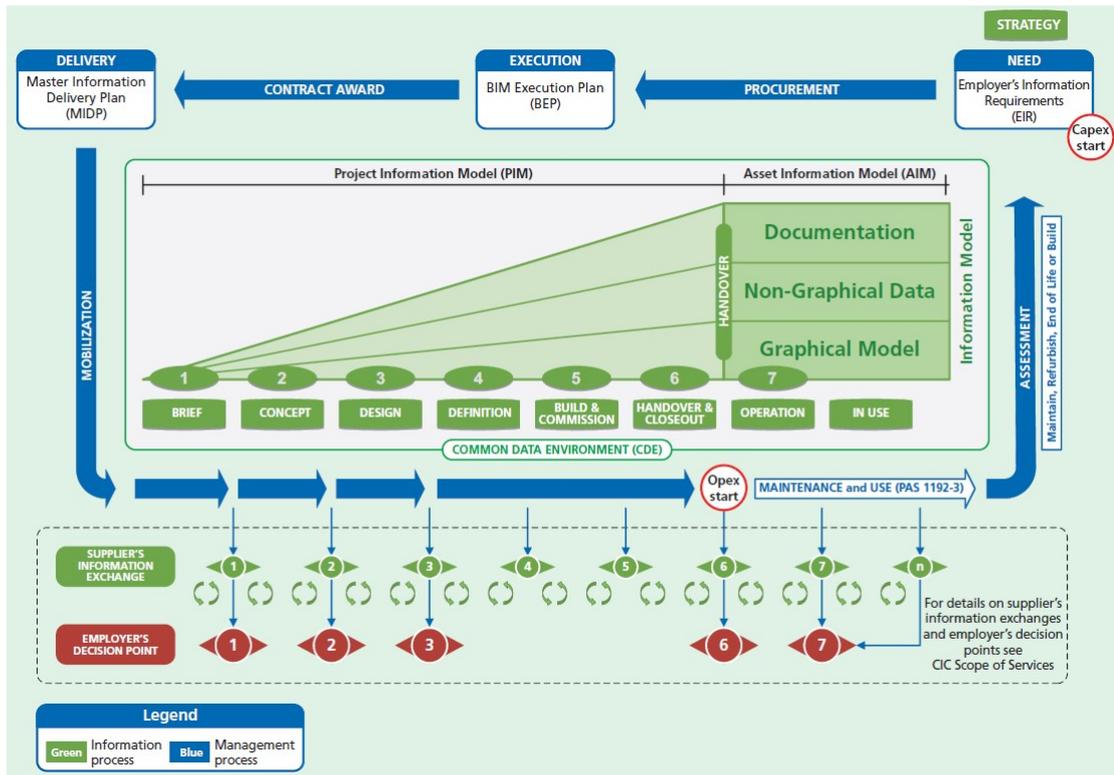


Figura 2.4 Proceso propuesto por la norma PAS 1192-2: 2013 [54].

- Para fase O & M, operación y mantenimiento, toma importancia la PAS 1192-3 al ayudar a la obtención definitiva del modelo AIM, que parte del PIM y recoge el resto de información necesaria para la gestión completa del ciclo de vida del activo.

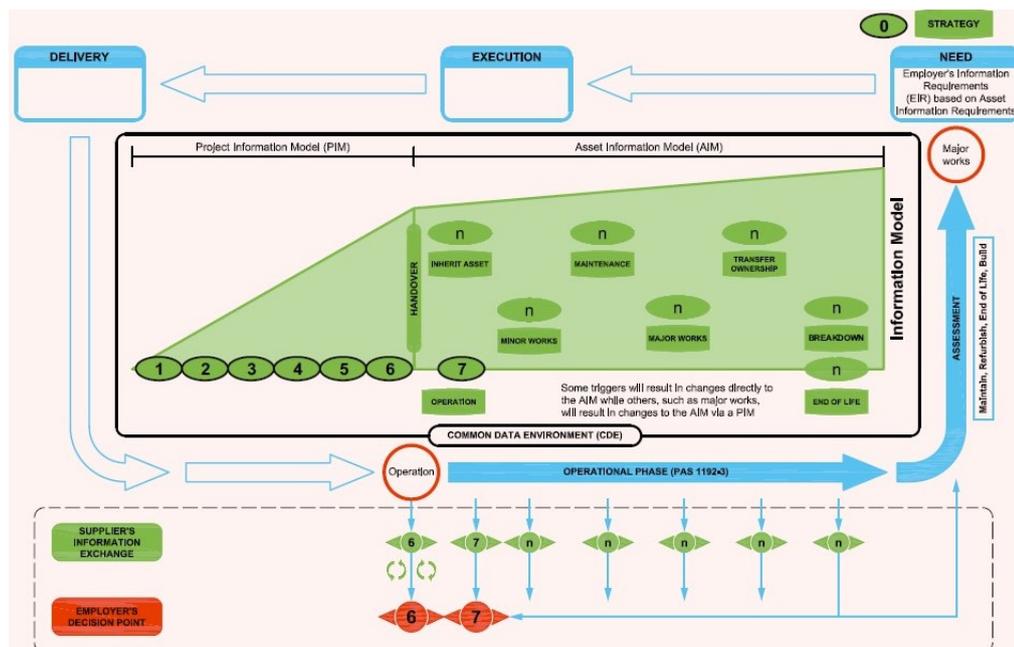


Figura 2.5 Proceso propuesto por la norma PAS 1192-3: 2014 [8].

En las figuras 2.4 y 2.5 se puede visualizar el proceso que proponen estos estándares.

Trabajando de forma progresiva a través de las diversas etapas del ciclo de entrega de información, y el cumplimiento de los requisitos que incluyen ambas normas, se obtiene finalmente el modelo de información de activos construido (AIM).

2.1.3 Digital Twin [DT]

El modelo conocido como gemelo digital, supone una representación digital y dinámica de un activo, proceso o sistema, imitando su comportamiento real. En la literatura puede encontrarse definido como: “modelo digital de un elemento físico concreto o de un proceso con conexiones de datos que permiten la convergencia entre los estados físicos y virtuales a una velocidad de sincronización adecuada” [7] o “Contraparte virtual e informatizada de un sistema físico que puede utilizarse para simularlo con diversos fines, explotando una sincronización en tiempo real de los datos detectados procedentes del campo.” [39]

Se entiende como un modelo basado en el uso avanzado de los datos [31], ayudando, por tanto, a resolver el problema de los silos de información; es decir, el gemelo digital recopila datos de forma centralizada para cada entidad, y luego pondrá esa información disponible a través de interfaces de integración.

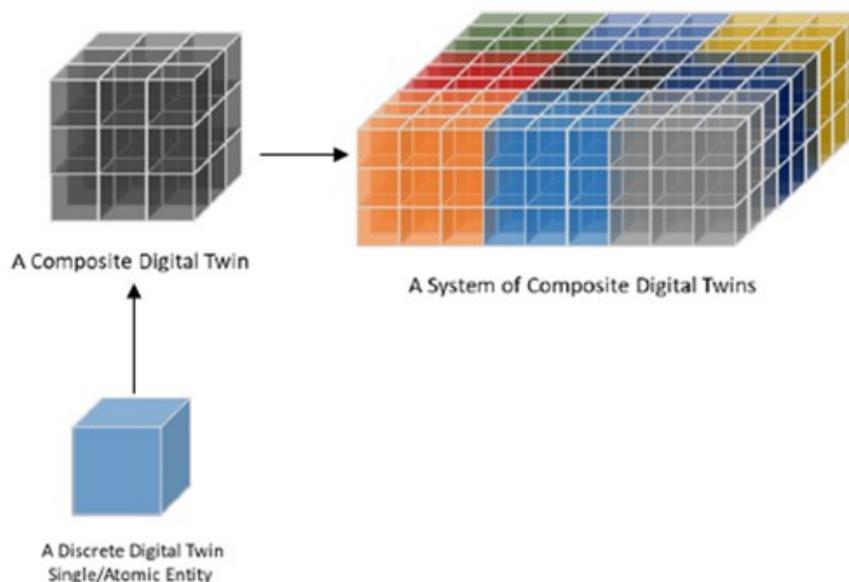


Figura 2.6 Jerarquía del gemelo digital [31].

Para este modelo [31] propone dentro de la literatura científica una jerarquía de integración de gemelos digitales discretos, es decir, modelos de entidades únicas, entendido como

elementos base que no puede desglosarse más, que al unirse conforman gemelos digitales compuestos, como una combinación de gemelos digitales discretos. Estos a su vez serán integrados como un conjunto en un sistema de gemelos digitales compuestos. La figura 2.6 muestra de forma gráfica la jerarquización descrita.

El establecimiento de relaciones y conectividad entre los gemelos digitales de varias entidades de forma automática es uno de los principales retos a los que se enfrenta el diseño de estos modelos de gemelos digitales, con el objetivo de intentar evitar futuros problemas de interoperabilidad entre ellos.

Esta referencia presenta además una división del gemelo digital en tres componentes principales: datos, modelos y servicios o funciones. La figura 2.7 expone dicha descomposición.

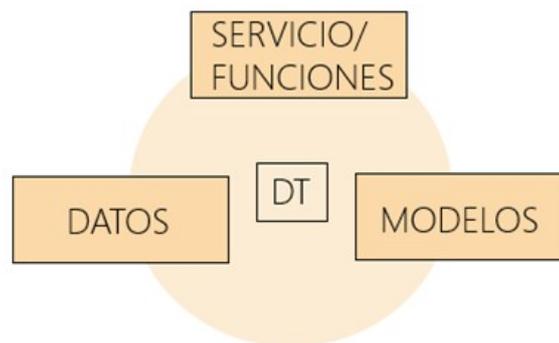


Figura 2.7 Componentes del Gemelo Digital.

- Datos: entendido como toda aquella información necesaria para representar y comprender los estados y comportamientos del gemelo en el mundo real. Pueden ser tanto datos del ciclo de vida completo, como datos empresariales.
- Modelos: podemos encontrar entre otros modelos de visualización, AR, simulación o modelos de datos; todos ellos necesarios para permitir al sistema describir, comprender, y predecir estados y comportamientos del gemelo.
- Servicios: se pueden entender como las funciones internas que tiene un gemelo digital con respecto al activo. Son muchos los servicios que un gemelo digital puede ofrecer desde Descripción, Diagnóstico o Visualización, hasta la inclusión de interfaces para la integración con otros sistemas o gemelos digitales que puedan acceder a los datos y resultados del propio modelo.

Sin embargo, a pesar de ser una de las más arraigadas, ésta es sólo, una de las muchas visiones que se pueden encontrar, ya que el Gemelo Digital es uno de los modelos con más visiones diferentes en la literatura actual tal y como muestra E. Negri[39], mediante un análisis en el que compara los principales aspectos que exponen diferentes artículos enfocados al DT en la ingeniería industrial. Este análisis se incluye en la tabla 2.3.

Tabla 2.3 Análisis de E. Negri[39] de artículos de DT en la industria.

Ref.	Campo de aplicación	Industria 4.0	Big Data	Ciclo de vida	CPS	Modelo semántico de datos
[48]	Fabricación	Industria 4.0, IoT	Sí	Ciclo de vida del sistema de producción	Sí	Metainformación y semántica
[49]	Robótica	Industria 4.0	No	Ciclo de vida de sistemas técnicos complejos	No	No
[9]	Informática	IoT Industrial	No	Ciclo de vida IoT	No	No
[17]	Fabricación	CPS inteligentes	No	Ciclo de vida del sistema de producción	Sí	No
[50]	Fabricación	Industria 4.0, IoT	Sí	Ciclo de vida de la producción	Yes	Modelo AutomationML para el intercambio de datos
[6]	Fabricación	No	No	No	No	Base de datos con modelos CAD
[4]	Fabricación	Productos inteligentes	Sí	Ciclo de vida de la producción	Sí	Gestión de datos semánticos
[20]	Robótica	No	No	No	No	No

2.1.4 RAMI 4.0

El Modelo Arquitectónico de Referencia Industrie 4.0 abreviado como RAMI 4.0, es un estándar impulsado por la Plattform Industrie 4.0 [51], que combina los principales elementos de la Industria 4.0 en un modelo de capas de tres dimensiones.

Es una arquitectura de referencia orientada al servicio, compuesta por un mapa tridimensional que desglosa los procesos complejos en paquetes más simples, englobando por un lado, el ciclo de vida del activo al completo, por otro, los niveles jerárquicos del sistema, y finalmente la arquitectura o capas funcionales del modelo. En la figura 2.8 se pueden observar las tres dimensiones que componen el RAMI 4.0, especificadas en la norma IEC/PAS 63088 [12].

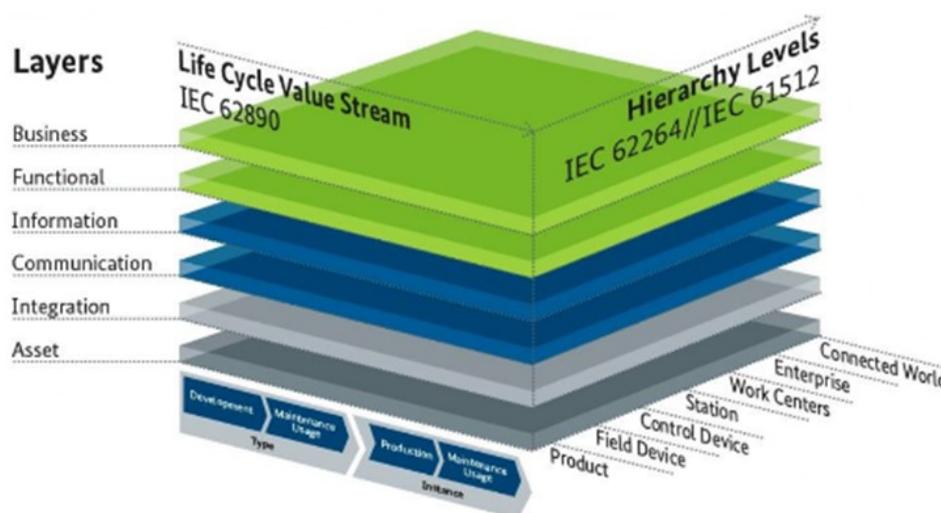


Figura 2.8 Estructura RAMI 4.0 [51].

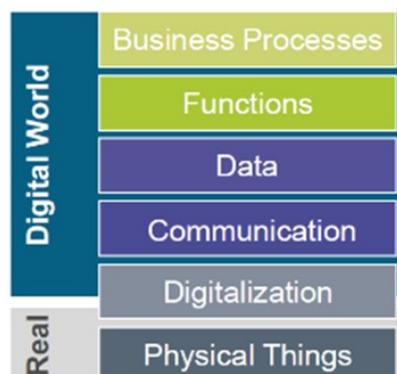


Figura 2.9 Arquitectura propuesta por RAMI 4.0.

Para cada una de las capas que se muestran en la figura 2.9, la Plataforma 4.0 [51], expone la definición de sus funcionalidades:

- Ciclo de vida: Representado en el eje horizontal izquierdo de la imagen 2.8 anterior, muestra el ciclo de vida de instalaciones y productos, basado en la norma IEC 62890 para la gestión del ciclo de vida. Esta referencia [51] distingue entre dos etapas dentro del propio ciclo de vida, una primera etapa denominada "tipos", y una segunda conocida como "instancias"; el cambio de "tipo" a "instancia" se produce cuando el diseño y prototipo se han completado y el producto final se encuentra ya en proceso de fabricación.
- Niveles de jerarquía: En el eje horizontal de la derecha se indican los niveles jerárquicos basados en una serie de normas internacionales como son la norma IEC 62264

y la IEC 61512, enfocadas en los sistemas de control e informáticos de las empresas. Estos niveles jerárquicos representan las diferentes funcionalidades dentro de las fábricas o instalaciones, desde el activo más simple como puede ser el producto, añadiendo complejidad de activos en la empresa hasta llegar finalmente a la conexión con el Internet de las cosas y los servicios, etiquetados como "Mundo conectado".

- Capas funcionales: Por último, en el eje vertical se representa lo que RAMI denomina las capas funcionales. Esta referencia propone un conjunto de seis capas, cuya función consiste en describir la descomposición de una máquina en sus principales propiedades o funciones estructuradas capa por capa, como pueden ser por ejemplo la capa de comunicación, funcional o de integración.

RAMI 4.0 proporciona así un entendimiento común entre las normas y los casos de uso dentro de las dificultades de la Industria 4.0, es decir, puede considerarse una especie de mapa tridimensional de soluciones para dichas dificultades, ya que proporciona una orientación para establecer los requisitos de las diferentes organizaciones, además de un conjunto de normas nacionales e internacionales con el fin de definir y seguir desarrollando la Industria 4.0.

2.1.5 Asset Administration Shell [AAS]

El modelo AAS o *Asset Administration Shell*, se conoce como la base de interoperabilidad de la arquitectura RAMI 4.0, y surge de la necesidad de transformar la información a otros formatos debido a la falta de interoperabilidad del DT entre las distintas organizaciones.

El AAS aparece en la literatura definido como: “Representación digital de un activo relevante, que proporciona una interfaz a una red de Industria 4.0 que permite la conexión con el elemento físico, y la comunicación con otros activos, así como el intercambio de información” [10]. Este modelo tiene como objetivo principal proporcionar información sobre un activo físico durante todo su ciclo de vida; esto podría entenderse como una ficha de almacén de datos e información de un activo concreto; es por esa razón que cada activo debe tener asociado un AAS propio.

Estos modelos de información pueden estar ubicados directamente en el dispositivo, en una plataforma en la nube conectada a los dispositivos; o incluso almacenada en el borde, es decir, en un dispositivo que actúe como mediador entre los dispositivos y la nube [46].

ABB [46] propone además un ejemplo de aplicación, el cual se muestra en la figura 2.10, en el que se puede observar cómo se establece una conexión con la nube, la cual recibe información de los dispositivos a través del borde.

En la nube se almacenarán un conjunto de modelos de información de origen, y se definirán modelos de mapeo, los cuales intercambian información con los modelos de origen, y traducen dicha información al formato AAS, conectando ambos componentes.

Los atributos en los modelos de origen que fueron etiquetados según unas referencias de clases preestablecidas, se transfieren a las correspondientes referencias semánticas en el AAS. La figura muestra además un ejemplo visual del formato de los modelos de información y el ASS.

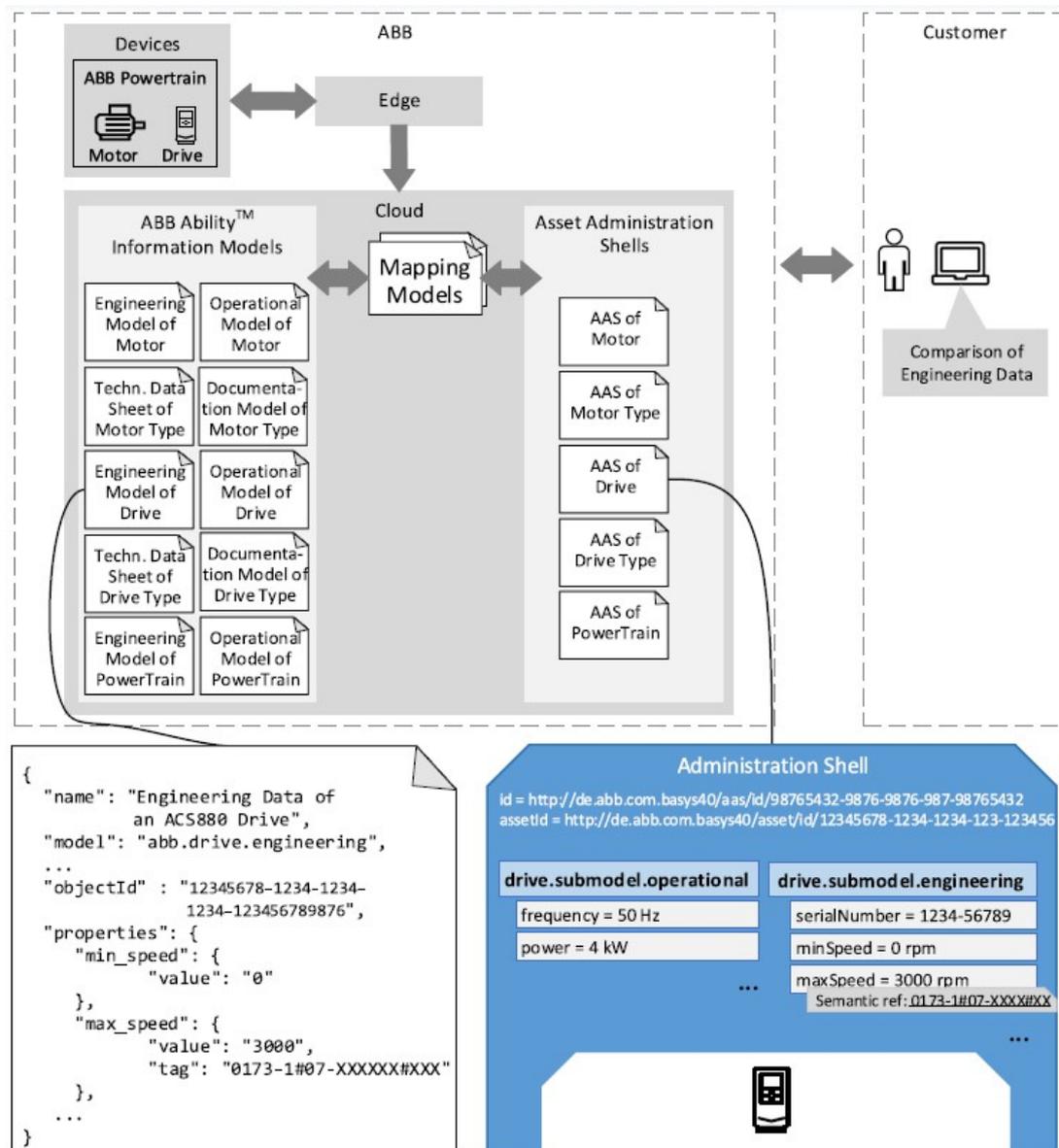


Figura 2.10 Visión general de un ejemplo de aplicación [46].

La Plataforma 4.0 [38] y [46] coinciden en una propuesta de modelo AAS como un metamodelo basado en diagrama de clases UML, con el objetivo de estructurar y simplificar

la representación de información del activo. Este metamodelo propone para el AAS una estructura jerárquica compuesta por submodelos, y estos a su vez por elementos.

Este modelo aparece definido en la literatura compuesto por una serie de fragmento que lo estructuran y lo definen de la siguiente forma:

- **Submodelos:** conforman el nivel superior de la estructura jerárquica de este modelo, son utilizados para estructurar un AAS en partes diferenciables. Cada submodelo estará referido a un dominio o materia de un activo concreto.
- **Elementos del submodelo:** cada submodelo consta de un conjunto de elementos, como nivel inferior de la estructura de dicho modelo. Los elementos de cada submodelo describen el activo; es por ello que se entienden como aquellos datos, propiedades o funciones comprendidos como entidades que se encuentran en la base de la estructura del activo, y lo definen completamente.
- **Identificación:** por último, el modelo AAS deberá estar dotado de dos identificadores únicos; uno para el activo en concreto, es decir, para la identificación de su ubicación física; y un segundo identificador para el Asset Administration Shell del activo, como manera de distinguir la integrante digital de dicho activo.

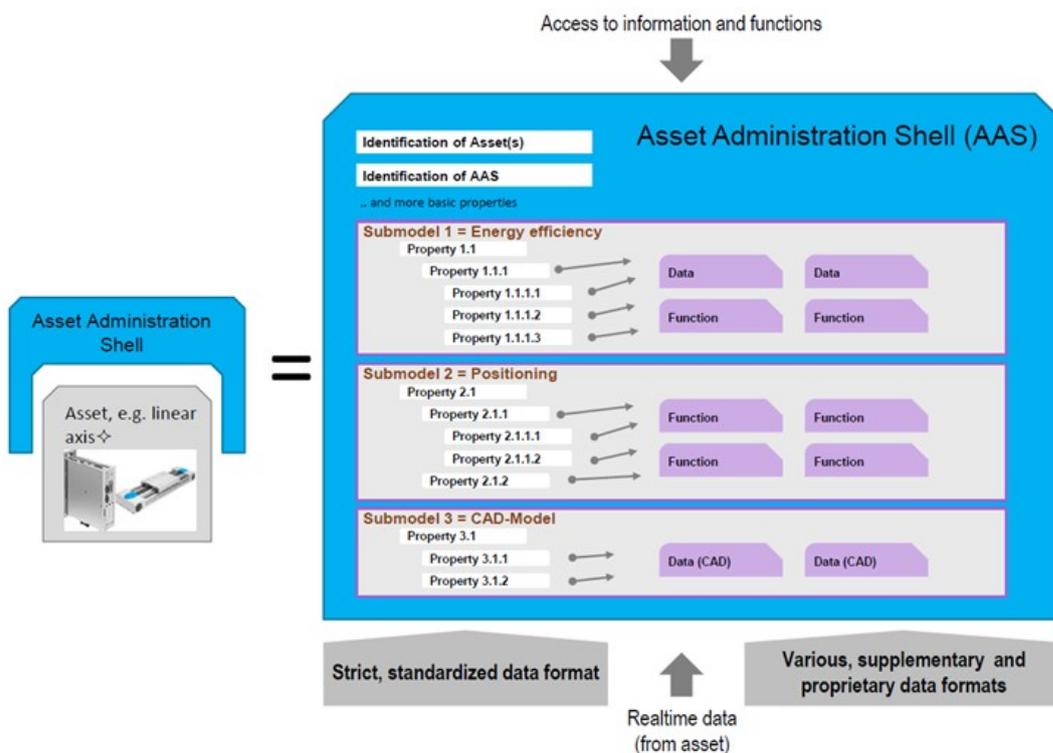


Figura 2.11 Ejemplo de estructura del modelo AAS.

En la figura 2.11 se puede observar un ejemplo concreto de un modelo ASS, en el que se muestran la ubicación en la "ficha" de los identificadores, submodelos y elementos definidos [57].

2.1.6 Cognitive Digital Twin [CDT]

El *Cognitive Digital Twin*, surge como un concepto de modelo de evolución de lo que conocemos como un Digital Twin tradicional, enfocado hacia un modelo con características más cognitivas, es decir, hacia una representación más inteligente, integral y de ciclo de vida completo de los sistemas complejos. Dicha evolución se lleva a cabo mediante el desarrollo de ciertas capacidades como la capacidad de evolución del gemelo digital a lo largo del ciclo de vida del activo, y una mayor capacidad de razonamiento y autonomía con respecto al DT tradicional.

Kiritsis [59], propone una estructura compuesta principalmente por tres dimensiones, siguiendo una estructura similar a la del RAMI 4.0 ya mencionada, de manera que cubra los principales aspectos de la Industria 4.0. Estas dimensiones serían: ciclo de vida completo, niveles de jerarquía del sistema y capas funcionales internas o digitales.

La figura 2.12, muestra de forma gráfica las dimensiones del Cognitive Digital Twin y los diferentes componentes de cada una de ellas.

- Fases del ciclo de vida completo: esta dimensión se centra en la gestión del ciclo de vida completo. A lo largo del ciclo de vida de un sistema, se crearán numerosos modelos digitales para dar soporte a las diferentes fases del ciclo de vida: inicio de vida (BOL), vida media (MOL) y fin de vida (EOL), cada una de estas fases puede tener múltiples modelos digitales relacionados.
- Niveles de jerarquía del sistema: tiene el objetivo de especificar la estructura y los límites de un CDT. Para este modelo se propone una jerarquía que, comenzando por un sistema de sistemas como nivel más alto de la jerarquía, se va descomponiendo en sistemas, subsistemas, y componentes, hasta llegar a partes como nivel más bajo que no puede descomponerse más.
- Capas funcionales: Esta última dimensión especifica las diferentes funciones internas que puede proporcionar un CDT; siendo la capa de Entidad Física la que representa el sistema en el espacio físico, mientras que las otras cinco capas representan diferentes funciones del CDT en el espacio digital, como son la gestión de modelos o servicios entre otros.

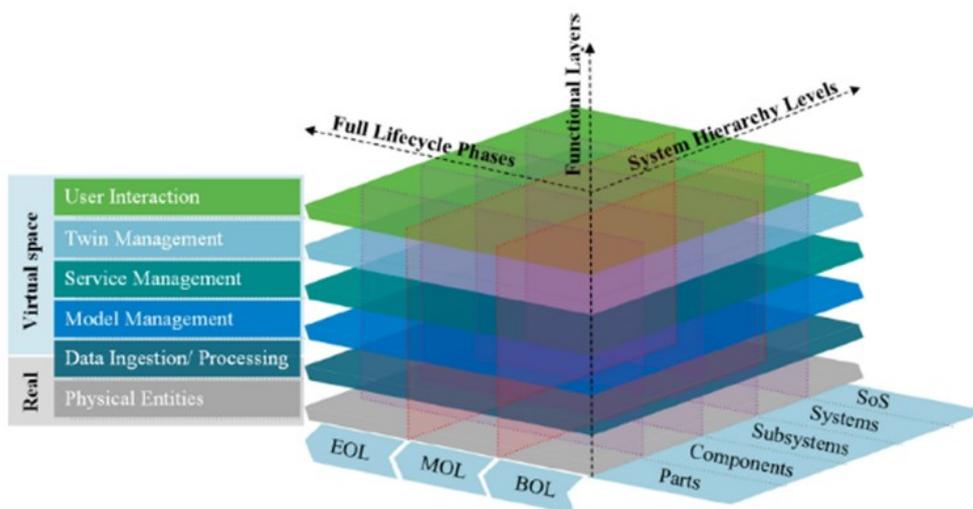


Figura 2.12 Arquitectura interna RAMI 4.0.

Por último, cabe destacar como los principales retos a los que debe enfrentarse este tipo de modelo tienen relación con la complejidad del propio sistema como son: la complejidad de representación de los datos, y la complejidad que conlleva el proceso de actualización de los datos a lo largo del ciclo de vida completo del activo; además de problemas de interoperabilidad de la información.

2.2 Revisión de estándares y referencias de modelos digitales

Una vez analizados los principales modelos de activos digitales que se pueden encontrar en uso en la industria actual, en este apartado se indaga en el campo de los estándares y normas industriales existentes para este tipo de modelos. A pesar de la cantidad de modelos, y el gran uso que se le da a estos en la industria, destaca la falta de metodologías normalizadas para cada modelo, a pesar de ser muchos los documentos que llevan a cabo diferentes intentos de estandarización. Es por ello en gran parte, que hay tanta variedad y tanta diversificación con respecto a conceptos y requisitos en este ámbito, lo cual lleva a plantearse como algo que tiene tanta importancia en la industria como es la gestión y en especial el mantenimiento de los activos debería de estar estructurado y normalizado, para así poder evitar los problemas que encontramos hoy en día en cuanto a falta de integración de la información y los sistemas a la hora de intentar implementar estos modelados, o incluso problemas de interoperabilidad entre los propios modelos.

Entre las normas que se pueden encontrar en la actualidad, una parte considerable de ellas están enfocadas a modelos de tecnología BIM, usados principalmente durante las primeras fases del ciclo de vida, como son sobre todo las etapas de diseño y construcción, y estando además orientadas esencialmente al sector de la construcción. Mientras que otra

gran parte de los organismos de normalización se centran en el intento de estandarizar la creación y uso de gemelos digitales a lo largo del ciclo de vida completo del activo; lo cual justifica la importancia de este modelo en la industria, pero también como el hecho de que haya tantas referencias y tan poca homogeneidad complica la búsqueda de un único framework [44].

En la Tabla 2.4 se incluye una recopilación de algunas de las normas más utilizadas que se pueden encontrar en la literatura, destacando la antigüedad de cada una de ellas, el modelo que normalizan y la etapa del ciclo de vida en que se centra, además de un pequeño resumen del objetivo principal de cada una de estas normas.

Tabla 2.4 Recopilación de referencias y normas.

Ref.	Referencias	Año	Modelo	Ciclo de vida	Resumen
[54]	PAS 1192-2	2013	BIM	BOL-MOL	Objetivo de estandarizar el proceso de entrega de proyectos, es decir, la entrega de toda la información necesaria desde la evaluación de requisitos, hasta las fases de operación y mantenimiento, para proyectos constructivos con BIM.
[8]	PAS 1192-3	2014	BIM, AIM	BOL-MOL	Especifica los requisitos para la gestión de información usando BIM, mediante la creación y uso de un AIM estandarizado, además de un entorno común de datos para el mantenimiento y control de la información.
[26]	ISO 29481-1	2018	BIM	BOL	Surge de la necesidad de fiabilidad en el intercambio de información; y propone una metodología para la elaboración de un documento de referencia (IDM) que describa e identifique los procesos, información y resultados requeridos en el desarrollo o gestión de una construcción.
[13]	ISO 19650-1	2019	BIM	BOL-MOL	Presenta los conceptos, principios, y recomendaciones para definir un marco de gestión de la información para obras de edificación que utilizan BIM.
[31]	IIC	2020	DT	Full	Proporciona una guía para la creación de un DT; partiendo de su definición, propone unas relaciones de jerarquía, y una arquitectura de diseño para el modelo de gemelo digital.
[25]	IMF	2020	DT	Full	Protocolo que propone una serie de requerimientos a estandarizar para el núcleo de un DT, además de exponer 12 pasos para la creación de un gemelo digital desde cero.
[52]	ISO 23247	2021	DT	Full	Proporciona un marco de desarrollo genérico que pueda ser instanciado para implementaciones de casos específicos de gemelos digitales en la fabricación.

En el conjunto de estándares estudiados, destaca la importancia de la referencia IMF, como consecuencia de su enfoque a la elaboración de un sistema interconectado e integrado que evolucione con el tiempo, lo cual podría dar respuesta a algunos de los retos descritos en la introducción; y a su énfasis en la estandarización de ciertos elementos necesarios en

cualquier modelo, proponiendo así la generalización de un modelo común en la industria.

2.2.1 Information Management Framework [IMF]

El *Information Management Framework* o IFM surge de la visión y la propuesta de crear un gemelo digital nacional, es decir, una infraestructura de gemelos digitales a nivel nacional con el objetivo de proporcionar información de calidad que apoye la toma de decisiones en relación al desarrollo, operación, mantenimiento y uso de las infraestructuras y los servicios que se prestan a los ciudadanos del país.

Aparece como un protocolo o esquema que sigue una filosofía enfocada en la creación de modelos que permitan una integración completa de los datos e información, más allá de un simple intercambio, con el consecuente objetivo de una mejor gestión digital de los activos.

Este framework propone además la estandarización de un conjunto de requisitos para el núcleo técnico del modelo de activos, conocido por el nombre de Commons, con el objetivo de apoyar el intercambio seguro de información, la interoperabilidad, la integración y la vinculación de datos y modelos en cualquier entorno.

Dicho núcleo o Commons estaría formado por tres componentes principales definidos por dicha referencia de la forma:

- Modelo de datos (Foundation Data Model (FDM)): “modelo ontológico coherente y claro, del mundo de los gemelos digitales, que incluye descripciones de conceptos generales independientes”. Este modelo deberá abordar las cuestiones propias de una ontología superior, permitiendo además la descripción de conceptos generales independientemente del dominio del problema al que se enfrente.
- Librería de datos de referencia (Reference Data Library (RDL)): “conjunto particular de clases y propiedades necesarios para las descripciones propias de los gemelos digitales”. El RDL supone una referencia común para las partes que deseen intercambiar datos, consistiendo en un ecosistema evolutivo de bibliotecas vinculadas entre sí, es decir, un conjunto jerárquico e integrado de bibliotecas de datos de referencia. Además, proporciona una serie de normas que especifican el nivel de detalle de información necesaria para su uso dentro del modelo.
- Arquitectura (Integration Architecture (IA)): “protocolos que permitirán compartir datos e información de forma gestionada y segura, la producción de modelos, la elaboración de consultas y el análisis, interpretación y aplicación de los resultados”. Esta arquitectura define las reglas y mecanismos necesarios para gestionar las combinaciones de los gemelos digitales.

Este modelo propone una arquitectura de integración como la que se muestra en la figura 2.13.

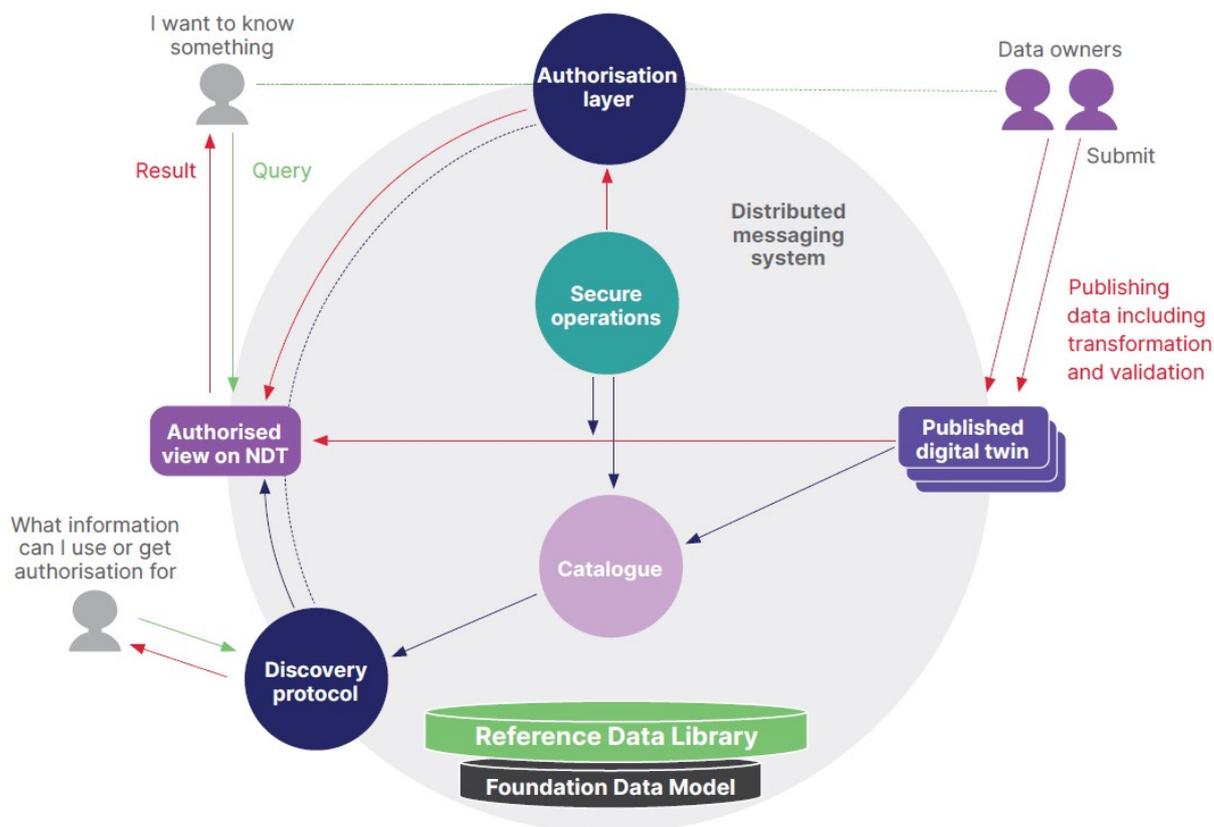


Figura 2.13 Estructura de núcleo propuesta por IMF.

El acceso a los datos almacenados en el modelo estará controlado por una capa de autorización, que permita únicamente hacer los datos visibles y disponibles para aquellos usuarios autorizados para ello. Además, a través de la arquitectura propuesta por IFM en la figura 2.13, los actores podrán vincular tanto gemelos digitales nuevos, como gemelos que ya existan en el modelo, y consultar estos gemelos y los activos en todo el ecosistema.

Es decir, este modelo propone construir un sistema que pueda responder a preguntas o procesos analíticos que requieren que se integren múltiples gemelos en el sistema, utilizando los resultados o datos de dichos gemelos.

2.3 Comparación de referencias

Finalmente, se procede a la comparación de los modelos de activos digitales y algunos de los estándares analizados de estos modelos. En la tabla 2.5 se incluye un pequeño resumen

de cada una de las principales referencias, además de lo que propone cada una de ellas en relación al tratamiento del ciclo de vida que realizan, y lo que proponen con respecto a la forma de definir del activo físico, lo cual es importante a la hora de trasladarlo al elemento en el sistema digitalizado.

Cabe también mencionar dentro del modelo de Gemelo Digital, como son numerosas las referencias que proporcionan visiones muy diferentes de cara a su estructuración y metodología de uso; es por que para poder elaborar la comparativa, se incluye a modo de ejemplo en la tabla 2.5, una nueva fila debajo del DT, en la que se muestra la visión concreta, como la que proporciona la norma ISO 23247.

Tabla 2.5 Recopilación de referencias y normas.

Referencia	Resumen	Ciclo de vida	Definición del activo
BIM	Descripción técnico-gráfica de activos físicos a partir de clases (IFC) integradas en un diseño completo.	Modelo diferente para cada fase.	Clasificación mediante relaciones padre-hijo.
AIM	Repositorio de información de calidad de activos, basado en un BIM simplificado.	Modelo diferente para cada fase.	Clasificación mediante relaciones padre-hijo.
DT	Representación digital de los activos físicos.	Modelo único generalmente para cada fase	Generalmente único activo.
ISO 23247	Define un marco que proporciona una directriz genérica, una arquitectura de referencia, métodos y enfoques para la aplicación del DT.	Esta referencia no ofrece aportaciones relevantes en relación al ciclo de vida.	Elemento observable de fabricación.
RAMI	Sistema tridimensional orientado al servicio (ciclo de vida, jerarquía y capas funcionales).	Modelo único que evoluciona con el tiempo.	Producto inteligente - Fábrica inteligente - Mundo conectado.
AAS	Registro de información que representa digitalmente el activo y evoluciona con el tiempo. Es el componente básico del RAMI para la interoperabilidad.	Modelo único que evoluciona con el tiempo.	Ficha por cada activo.
CDT	Evolución del DT tradicional, formando un conjunto de gemelos digitales que interactúan entre sí con capacidades cognitivas.	Modelo único que evoluciona con el tiempo.	SoS - Sys. - Subsys. - Comp. - Part.

Además, dada la importancia comentada de la referencia del *Information Management Framework* (IMF), en especial relacionada con los elementos que expone como los imprescindibles a estandarizar en cualquier modelado; se incluye una nueva comparación de las referencias analizadas en la Tabla 2.6, según la visión que propone cada referencia con respecto a los elementos del IMF, es decir, según en qué elemento se centra cada una.

Surge en esta tabla la misma ambigüedad a la hora de comparar el modelo de gemelo digital debido a las tantas versiones que aparecen en la literatura. En este caso se ha querido coger el mismo ejemplo concreto que el tomado en la tabla anterior, que es la referencia de la norma ISO 23247, enfocada a la estandarización únicamente de la arquitectura.

Tabla 2.6 Comparación de referencias según elementos IMF.

Referencia	Modelo de datos	Librería de datos de referencia	Arquitectura de integración
BIM	X	X	
AIM	X		
DT	Existen diferentes visiones en la literatura		
ISO 23247			X
RAMI	X	X	X
AAS	X		X
CDT	X	X	X

Se puede observar como la mayoría de las referencias discrepan entre ellas, y se orientan en componentes distintos, siendo únicamente el RAMI 4.0 y el CDT, que está en el fondo como se ha comentado basado en la referencia RAMI, los que presentan propuestas para los tres componentes que expone el IMF como los necesarios de estandarización.

2.4 Principales dificultades de los modelos de activos digitales

Como se ha expuesto en el apartado de estándares, la falta de estandarizaciones y metodologías normalizadas tiene como consecuencia la aparición de numerosas dificultades a las que tienen que enfrentarse las empresas de forma habitual cuando toman la decisión de implementar alguno de los modelos mencionados. En este apartado se persigue hacer una revisión por los principales problemas que pueden surgir en la actualidad, a pesar de todos los avances tecnológicos y del constante desarrollo de estos modelos.

En primer lugar, siguen apareciendo numerosas complicaciones y dificultades a la hora de compartir los datos, debido al desconocimiento y a la complejidad de la forma de recopilar los datos, que no los asigna al propio activo, sino que simplemente los relaciona, lo que complica las búsquedas posteriores, o a la hora de la propia gestión de los activos, debido a la falta de marcos de aplicación o metodologías estandarizadas [24].

En otros casos, surgen problemas relacionados con la cantidad de información, tanto por exceso como por defecto, muchas veces innecesaria, complicando también en muchos casos la gestión de los activos. Esto lleva a la necesidad, ya mencionada, de especificar las necesidades de información o nivel de detalle necesario de cada activo.

Debido a una mala concepción por parte de las empresas de este tipo de modelos o sistemas de gestión, se producen también flujos interrumpidos y lagunas de información dentro de la misma empresa, debido a la desconfianza por parte de las empresas a compartir información incluso dentro de la misma empresa, por el miedo a perder ventajas competitivas [45] y el desconocimiento de las ventajas reales, principalmente económicas, que ello conlleva. Sin olvidar los problemas bastante frecuentes de incompatibilidad de tecnologías [40], sistemas y formato de datos entre las empresas, o incluso áreas o departamentos de una misma empresa, como consecuencia de la ausencia de formatos normalizados.

Sin embargo, este estudio ha observado como los principales o más reiterados retos de estos modelos y sistemas de gestión son:

- La interoperabilidad o la capacidad de los sistemas de información y los procedimientos que soportan, para compartir datos y permitir el intercambio de información y conocimiento entre ellos. Se puede apreciar cómo esta característica se encuentra directamente relacionado con el uso incompatible de los diferentes lenguajes de información utilizados por las empresas, ya sea IFC, XLM o IDM, que impiden la conectividad entre los activos, dificultando así su gestión.
- Integración de la información y los sistemas. Este problema surge por la falta de definiciones concretas de los principales conceptos. Es decir, para un mismo concepto o elemento, se pueden encontrar en la literatura numerosas formas de nombrarlos e incluso diferentes definiciones que, aunque parten de la misma base, acaban creando ambigüedad en torno a los conceptos, y por tanto dificultando el posterior uso y gestión de estos elementos. Este problema no sólo se refiere a los nombres y definiciones de los conceptos, sino también a los diferentes requisitos o niveles de detalle de la información necesarios para cada uno de ellos, ya que la falta de acuerdo dificulta la integración de toda la información y su integración dentro de un mismo sistema.

- Complejidad de los procesos industriales, y falta de flexibilidad de los modelos propuestos. Como consecuencia se elaboran modelados para casos de uso específicos, lo cual crea dificultades no solo para el uso de un mismo modelado por distintas partes interesadas; sino que dentro de una misma organización o área cualquier cambio en el proceso supone grandes retos a la hora de modificar todo el modelado digitalizado.

3 Propuesta de modelo de activos digitales

En este apartado se procede al desarrollo y explicación de la referencia propuesta de modelo de digitalización de activos que se ha elaborado mediante la realización de este estudio, basada en el análisis de los modelos comentados en el apartado del estado del arte, y enfocada al objetivo final de este estudio que consiste en la búsqueda de un modelo para la gestión de mantenimiento inteligente de los activos digitales.

Para la elaboración de dicha propuesta, ha sido necesaria la especificación de algunos conceptos generales, para poder a continuación enfocar el estudio al desarrollo de la solución que se busca. Como ya se explica en este apartado, en este punto el trabajo se enfoca en la elaboración de la arquitectura interna del modelo.

Partiendo de la revisión de referencias realizada, se han elegido dos arquitecturas en concreto, las cuales han sido utilizadas como base para esta propuesta. A partir de la combinación de las referencias seleccionadas se presenta la propuesta teórica elaborada de arquitectura generalizada.

3.1 Componentes básicos del modelado

Para empezar con el desarrollo del modelado del sistema, se estima necesario llevar a cabo algunas decisiones previas con respecto a algunos componentes básicos a considerar en el modelo como son:

- Ciclo de vida
- Jerarquía del modelo
- Descripción del activo

El modelo elegido para llevar a cabo el desarrollo de la referencia propuesta estará compuesto por un conjunto de gemelos digitales, interconectados entre sí, debido a las posibilidades que ofrece este tipo de modelos en la solución que se busca para los problemas planteados.

Dentro del modelo de Gemelo digital elegido, aparecen los conceptos básicos mencionados, distribuidos en un espacio tridimensional siguiendo la propuesta que realiza RAMI 4.0, en el que se mueven los diferentes gemelos (DTi) que componen el modelo. Dicho mapa puede observarse en la figura 3.1; una vez ubicados, se procede a la discusión de estos conceptos básicos.

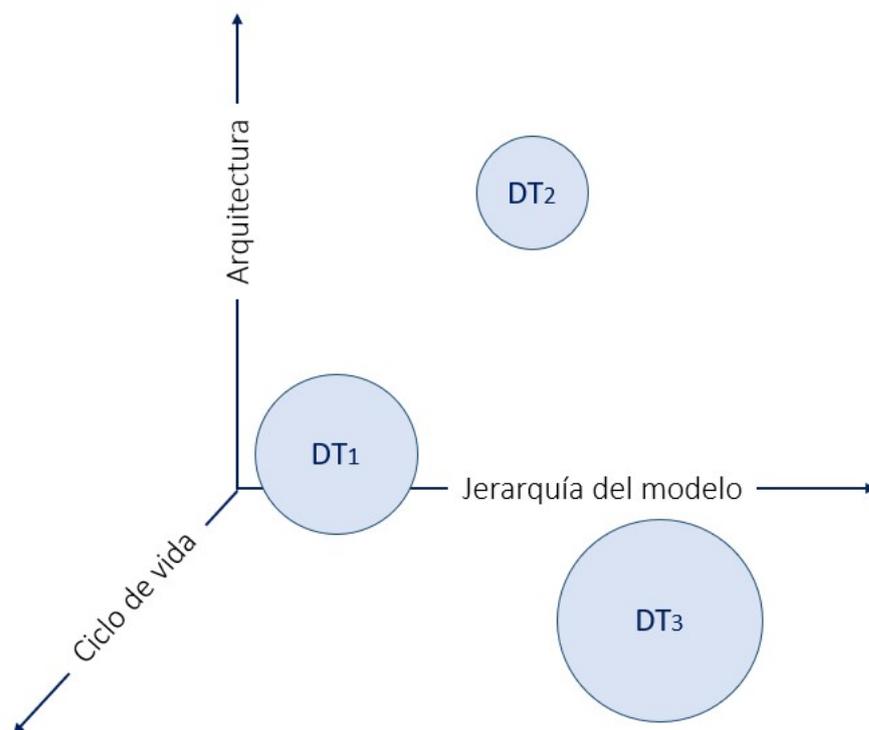


Figura 3.1 Conceptos básicos del modelo en mapa tridimensional.

Ciclo de vida

En primer lugar, este estudio se enfocó en el estudio del ciclo de vida del activo y del propio gemelo. Con respecto a la vida del activo, basándonos en la descripción que hace el AIM del ciclo de vida, se realiza una división del ciclo completo en tres fases o etapas diferenciadas en el tiempo:

- Beginning of life (BOL): o inicio de vida, engloba las primeras etapas de la vida del activo, como pueden ser las etapas de diseño y construcción entre otras.

- Middle of life (MOL): conocido como mitad de vida, se considera la etapa de mayor extensión, y se centra principalmente en la fase de operación, pero también de mantenimiento de los activos, es decir, conlleva toda la vida útil o de uso del activo.
- End of life (EOL): final de vida del activo o últimas etapas del ciclo de vida; esta fase se enfoca en los periodos de reciclaje y búsqueda de revalorización de los activos de la empresa, una vez finalizada su vida útil.

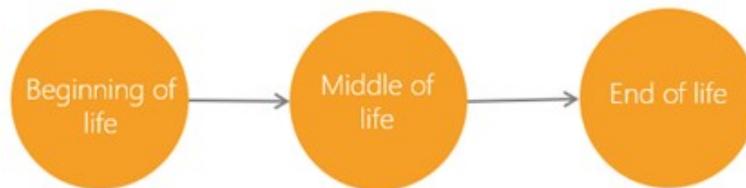


Figura 3.2 Fases del ciclo de vida del activo.

Sin embargo, una de las características del modelo propuesto es la gestión del activo durante todo su ciclo de vida mediante un gemelo digital que almacene y gestione su información de forma que sea un modelo que vaya evolucionando a la vez que lo hace el propio activo, ofreciendo en cada etapa los requisitos que el activo demande. Como consecuencia cada activo tiene un único modelo asociado independientemente del momento de su vida en el que se encuentre.

Cabe mencionar como el ciclo de vida no afecta únicamente al activo físico, sino también al propio modelo que podrá tener un ciclo de vida propio, independiente de la vida del activo.

Jerarquía del modelo

En segundo lugar, se define la jerarquía del modelo propuesto. La jerarquía se entiende como una composición de elementos ordenados según su importancia. El interés de este concepto surge de la presencia de un gemelo digital para cada entidad física existente en el sistema, lo que lleva a la creación de un modelo formado por un conjunto de gemelos digitales que deben estar conectados entre sí. Como consecuencia aparece una necesidad de ordenar y estructurar todos estos gemelos de cara a facilitar la gestión de los activos a los que representan.

Además, la jerarquía presenta una gran influencia con respecto a las relaciones que tienen estos modelos entre sí. Estas relaciones permiten representar cómo un gemelo digital puede estar implicado con otros gemelos digitales; de forma que lo que afecta a uno o

varios elementos de un conjunto pueda afectar en mayor o menor medida a dicho conjunto. Las relaciones permiten también que la solución proporcione un grafo de las entidades interrelacionadas.

Se decide por tanto el modelo propuesto como un sistema compuesto de un conjunto de gemelos digitales estructurados en tres niveles diferenciados, siguiendo lo que expone [31]. En el nivel más bajo se encasillan los modelos DT más sencillos, conocidos como gemelo digital discreto, siendo gemelos digitales de entidades físicas que no pueden simplificarse más. El conjunto de gemelos digitales discretos compone un gemelo digital compuesto, como el conjunto de elementos o activos físicos simples. Finalmente, varios gemelos digitales compuestos se unen formando el último nivel de esta jerarquía, que se conoce como sistema de gemelos digitales compuestos. La jerarquía comentada se puede observar en la figura 3.3.

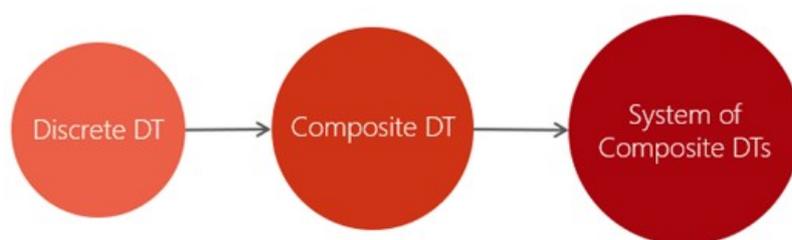


Figura 3.3 Jerarquía de niveles del modelo.

Cada uno de los gemelos digitales que se creen en el modelo, independientemente del nivel en el que se encuentren, tendrán una evolución a lo largo del ciclo de vida del activo, mediante su paso por cada una de las fases propuestas, o a través del enfoque único en una de las etapas, evolucionando dentro de ella.

Descripción del activo

El tercer y último punto importante a considerar en la construcción de este modelo ha sido la realización de la descripción del propio activo. Para ello se propone una estructura de tres capas que almacene toda la información necesaria para definir de forma única y completa al activo. Estas tres capas las cuales se representan en la figura 3.4, englobando en ellas todos los datos y características del activo son:

- Clases
- Ubicación técnica
- Capa de señales

Esta estructura, al igual que el propio modelo de gemelo digital de activos, será única para cada activo, y evolucionará a lo largo del ciclo de vida del objeto al que este asociado, mediante de la evolución de sus elementos. La descripción del activo lleva al uso de una ontología completa. Una ontología es una base de datos relacional, compuesto por las diferentes entidades y las relaciones que aparecen entre ellos, que permite la representación completa de todo el activo [59] [34].

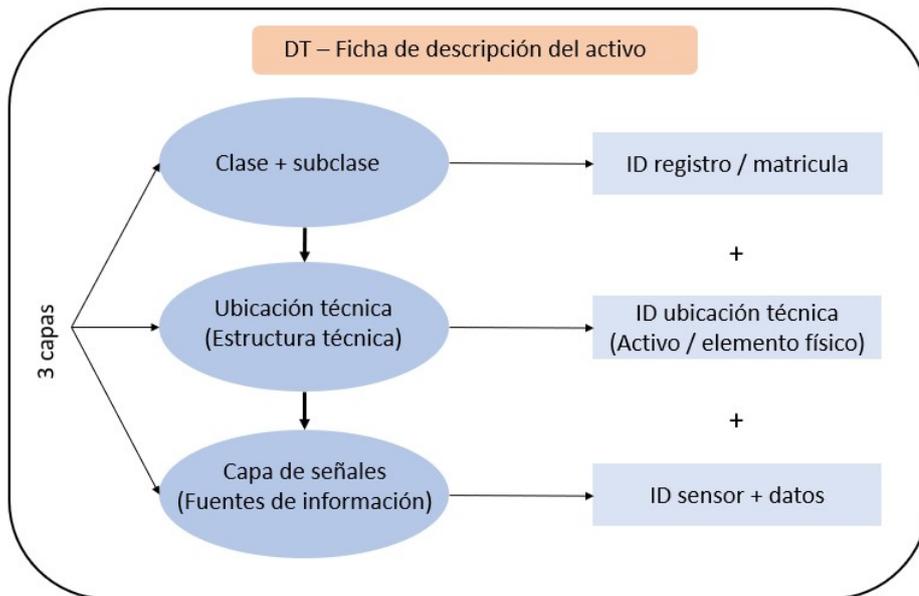


Figura 3.4 Capas de descripción de activo.

- Clases

En primer lugar, cada activo físico necesitará de un identificador de registro o matrícula, que permita identificarlo de manera única. Esta identificación se realizará a través de un conjunto de clases y subclases previamente definidas, tal y como propone el modelo BIM, creando categorías generales de los activos físicos.

Para ello, se ha decidido tomar como base la forma que tiene de definir el activo el modelo AAS comentado en el estado del arte. Este modelo propone la creación de una “ficha” para cada activo elemental, la cual englobará la información necesaria para el modelado de este activo mediante la definición del tipo de entidad al que pertenece. Dicha ficha compondrá la primera capa necesaria para la descripción del activo.

- Ubicación técnica

Como segunda capa, el sistema necesitará de una estructura técnica, que permita la localización del activo en relación a los demás elementos físicos. Una misma clase de

activo puede estar ubicado en más de una ubicación técnica, sin embargo, esta define a un único activo concreto, mediante un ID de ubicación técnica que se le asignará según su funcionalidad.

La estructura técnica definida determinará asimismo desde una visión funcional, las relaciones entre las diferentes clases y subclases de los activos físicos.

- Capa de señales

Para finalizar con la descripción del activo, este deberá contener en su estructura una capa de señales, que almacene el conjunto de datos obtenidos a través de las diferentes fuentes de información durante el proceso de monitorización, que caracterice al activo en cuestión. A partir de esta información almacenada se definirán una serie de estados, que indiquen el nivel de riesgo, y permitan observar la evolución de los activos.

El concepto de estado se define como el nivel cualitativo de riesgo en un momento dado. Se considera un elemento fundamental en la descripción del activo, una vez definidos sus tres componentes elementales.

Se propone utilizar cuatro estados o niveles de riesgo de mayor a menos nivel de riesgo:

- Fallo: estado que se activa después de producirse el fallo. Conlleva un requerimiento de sustitución o reparación inmediata del elemento que haya provocado el fallo o haya fallado.
- Alto riesgo: estado de funcionamiento más próximo al fallo. Supone la programación de actividades a corto plazo para reducir el nivel de riesgo.
- Riesgo medio: estado en el que se ha detectado una anomalía, pero es posible seguir operando en condiciones normales. A medio plazo se planifican actividades para confirmar el riesgo y analizar su evolución.
- Riesgo bajo: estado de funcionamiento normal del elemento.

Esta capa debe incluir además un identificador del sensor que realiza la labor de recogida de datos, facilitando la definición del activo, al poder tener un mismo activo diferentes sensores. Este último concepto se ubicará en un almacén interno común y accesible desde cualquier ubicación del modelo.

3.2 Arquitectura

Tal y como se ha comentado en la revisión de la referencia IMF [25], esta propone tres elementos como los principales a desarrollar en un modelo de este tipo. En este trabajo

se sigue la filosofía propuesta por dicha referencia, al coincidir con los objetivos de este estudio de estandarizar un sistema que permita la integración de la información e interoperabilidad de sistemas. Sin embargo, debido a la complejidad que supone el desarrollo completo del modelo, suponiendo la especificación de los tres componentes que presenta el IFM, como ya se ha mencionado este trabajo se centra en el desarrollo de la arquitectura.

El concepto de arquitectura, según la RAE ("Real Academia Española") consiste en la estructura lógica y física de los componentes de un conjunto, es decir la completa definición de la estructura conceptual del modelado. La referencia IMF profundiza algo más en la definición de la arquitectura de integración como "protocolos que permitirán compartir datos e información de forma gestionada y segura, la producción de modelos, la elaboración de consultas y el análisis, interpretación y aplicación de los resultados". De esta forma la arquitectura permite entender el conjunto de componentes y funcionalidades que tendrá el sistema; y es por ello que su estandarización es posible mediante la completa definición de su estructura especificando desde los diferentes módulos o dominios que la componen, hasta su ubicación y funcionalidad.

La importancia de este componente reside en la posibilidad de generar una estructura simple generalizada que facilite su posterior implementación en cualquier situación u organización, frente al reto de tener soluciones particularizadas para cada caso lo cual dificulta su uso en otros casos distintos.

3.2.1 Arquitecturas de referencia

ISO 232471

La primera de las arquitecturas elegida como referencia procede de la norma ISO 23247, Sistemas de automatización e integración, enfocada a la exposición de un marco de gemelos digitales para la fabricación [52].

Este estándar propone una arquitectura de visión funcional compuesta por cuatro dominios o entidades, con el objetivo de proporcionar un marco de desarrollo genérico que pueda ser utilizado para su implementación en cualquier caso específico de gemelos digitales en la fabricación. En la figura 3.5 se puede observar el esquema de la arquitectura propuesta, compuesto por los dominios: de usuario, de núcleo, de control y recolección de datos, y un dominio externo de observación de fabricación.

Cada uno de los dominios que conforman esta arquitectura aparecen definidos por la referencia de la forma:

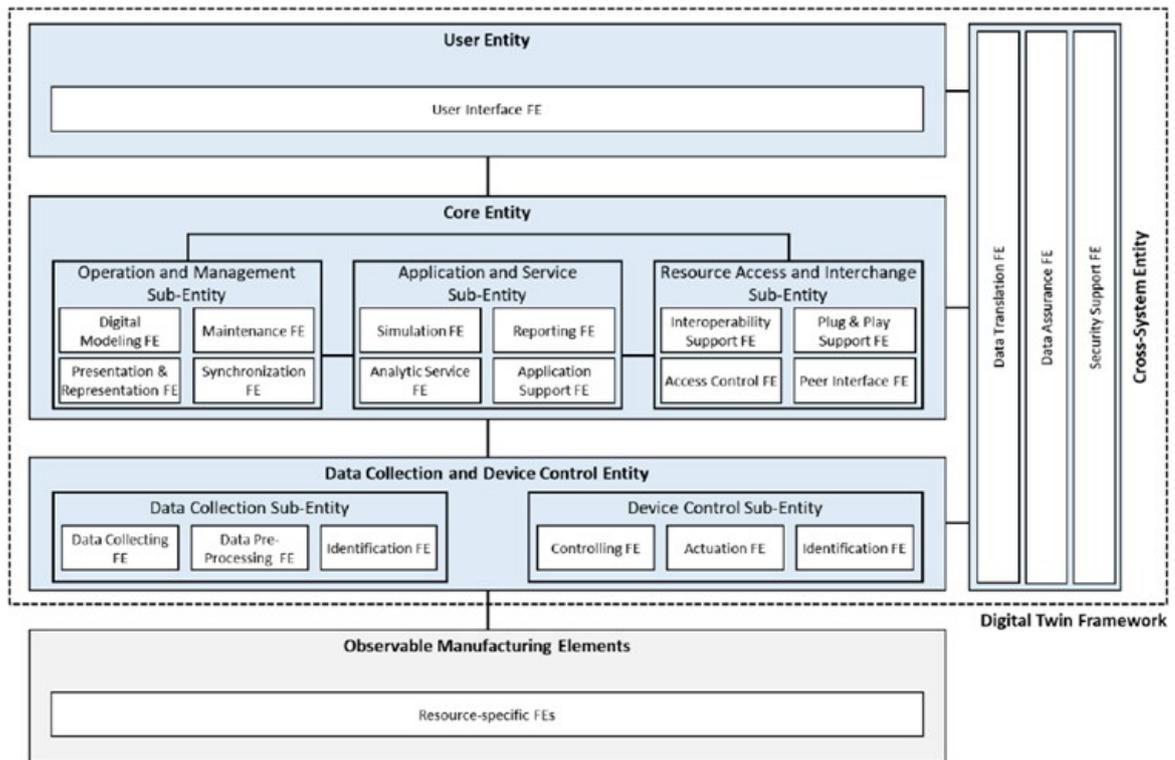


Figura 3.5 Arquitectura de referencia ISO 23247 [52].

- Dominio externo de observación de fabricación: dominio que proporciona un contexto para el desarrollo del gemelo digital e interactúa con el dominio de recopilación de datos y control de dispositivos.
- Dominio de recopilación de datos y control de dispositivos: este dominio se encarga de enlazar las OMEs (*Observable Manufacturing Elements*) o elementos de fabricación observables, con sus gemelos digitales para su sincronización mediante la recogida de datos de los sensores de las OMEs y el control y actuación de las OMEs.
- Dominio del núcleo: dominio responsable del funcionamiento y la gestión general de un gemelo digital. En él se encuentran alojadas distintas aplicaciones y servicios como son el análisis de datos, la simulación y la optimización para permitir el aprovisionamiento, la supervisión, el modelado y la sincronización. Este dominio también puede interactuar con los usuarios del gemelo digital y con otros gemelos digitales.
- Dominio del usuario: dominio responsable de la interacción entre los usuarios y los gemelos digitales. Por usuario se entiende persona, dispositivo, o sistema que hace uso de algunas de las aplicaciones y servicios proporcionados por los gemelos digitales.

Cada dominio está a su vez compuesto de diferentes tareas y funciones, tal y como se puede apreciar en la figura 3.5, que se realizan a través de las entidades funcionales (EF). Destacan esencialmente 5 entidades funcionales en esta arquitectura:

- OMEs: Las entidades OME consisten en entidades funcionales específicas de cada recurso.
- Entidad de Recogida de Datos y Control de Dispositivos (DCDCE): La DCDCE está compuesta por una Sub-Entidad de Recogida de Datos para la recogida de datos de la OME y alimentación con dichos datos a la Entidad Central, y por una Sub-Entidad de Control de Dispositivos para controlar y actuar en la OME.
- Entidad central (CE): El CE es una entidad de gemelo digital, que incluye la Sub-Entidad de Operación y Gestión, la Sub-Entidad de Aplicación y Servicio, y la Sub-Entidad de Acceso e Intercambio de Recursos que permite representar y mantener digitalmente las OMEs. Dentro de cada subentidad, hay varias entidades funcionales, por ejemplo, la de Simulación en la Subentidad de Aplicación y Servicio.
- Entidad de Usuario (UE): La UE proporciona interfaces de usuario para interactuar con el CE. Puede ser un operador humano o una aplicación empresarial ya existente, como un sistema de ejecución de fabricación (MES), un sistema de planificación de recursos empresariales (ERP) u otros tipos de gemelos digitales.
- Entidad intersectorial (CSE): La CSE reside en todos los dominios para proporcionar funcionalidades comunes como la traducción de datos, el aseguramiento de datos y el soporte de seguridad.

Además de los cuatros dominios ya descritos, y sus correspondientes entidades, cabe destacar como este documento propone un gemelo digital conectado con el activo físico, o elemento de fabricación observable, mediante una entidad de control y recolección de datos procedentes del objeto físico. Dicha entidad se conecta a su vez con el núcleo en el cual se almacenan las diferentes funcionalidades y servicios que ofrece el modelo, y con la entidad del usuario.

CDT [59]

El otro documento de referencia elegido [59], presenta una arquitectura para el modelo de Cognitive Digital Twin, cuya imagen gráfica aparece en la figura 3.6.

Este documento propone la integración de todos los datos, información y conocimiento disponible relacionados con el sistema durante su ciclo de vida completo. Para ello este

modelo, tal y como ya se comentó en el estado del arte, y en concreto esta referencia propone tomando como referencia RAMI 4.0 una arquitectura compuesta por capas funcionales.

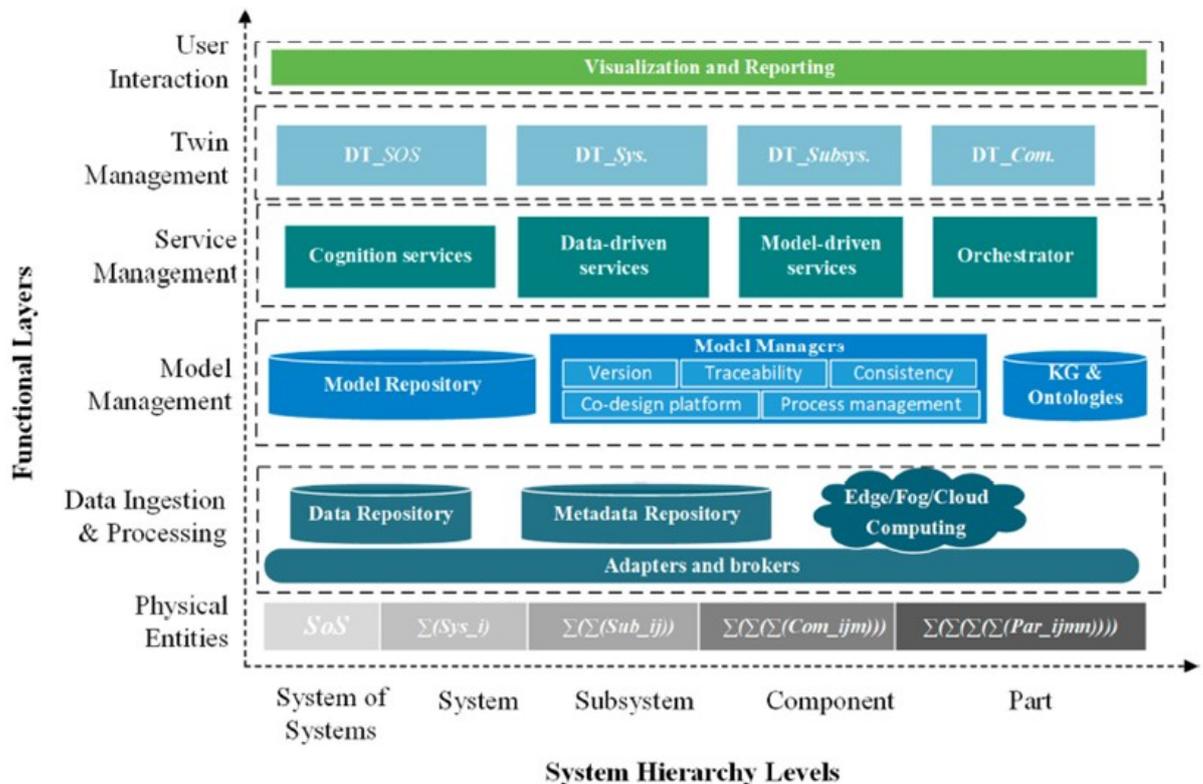


Figura 3.6 Arquitectura de referencia del CDT [59].

Realizando un análisis más profundo de las diferentes capas que presenta esta arquitectura podemos encontrar:

- User Interaction: capa superior que permite la interacción entre las partes interesadas y el propio modelo.
- Twin Management: capa que tiene como objetivo apoyar la actualización y orquestación de todos aquellos gemelos digitales que componen el modelo a lo largo de todo su ciclo de vida, actualizándose de esta manera en función a los nuevos datos y conocimientos. En él se incluyen los gemelos digitales de las diferentes entidades físicas.
- Service Management: capa encargada del registro y orquestación de los diferentes servicios empresariales como pueden ser: servicios cognitivos, servicios basados en datos o servicios basados en modelos.

- **Model Management:** utiliza tecnologías semánticas, como los gráficos de conocimiento y las ontologías para gestionar los diferentes tipos de modelos de DT almacenados en el repositorio de modelos.
- **Data Ingestion and Processing:** este proceso se ayuda de brokers y adaptadores específicos para su realización. En función de los requisitos de los correspondientes servicios, los datos pueden ser procesados y analizados mediante técnicas de minería de datos soportadas por la computación en la nube. En esta capa se produce el almacenamiento de todos los datos y metadatos del modelo.
- **Physical Entities:** capa que representa el Sistema real en el espacio físico.

Esta referencia propone un modelo que difiere del gemelo digital tradicional, debido a la inclusión de ciertas capacidades cognitivas, presentándose como un modelado más maduro. Pero también expone como una de las principales diferencias entre CDT y DT, como el DT se enfoca a un gemelo digital único, mientras que el CDT permite englobar numerosos gemelos digitales, por ejemplo, de las diferentes entidades físicas como se puede apreciar en la figura 3.6.

Comparación arquitecturas de referencia

Comparando las arquitecturas elegidas se puede observar cómo ambas coinciden en algunos de los elementos como puede ser la interfaz de usuario, o la entidad de procesamiento de datos, como se observa en la figura 3.7; además de la visión funcional, y la forma de definir y conectar el elemento físico o activo al modelado.

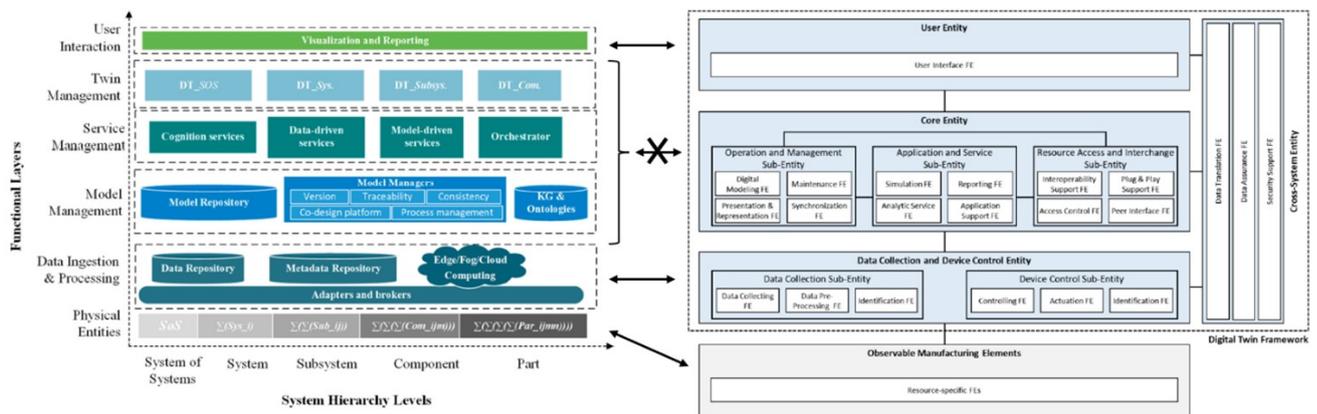


Figura 3.7 Comparación de componentes arquitecturas de referencia.

Sin embargo, estas dos referencias difieren en la parte central o núcleo de la arquitectura, estando la de la ISO 23247 englobado en un mismo bloque que recopila todas las funciones

y servicios del propio modelo, frente a la referencia del CDT [59], que divide el núcleo en tres bloques diferenciados como ya hemos visto.

Finalmente cabe destacar en la arquitectura de la ISO 23247 la ausencia de una ubicación de almacenamiento de diferentes gemelos digitales, es decir, presenta una arquitectura para un único gemelo digital individual no contemplando la presencia e interacción entre varios gemelos, como sin embargo sí lo hace la referencia del CDT en su capa de Twin Management.

3.2.2 Propuesta de arquitectura

Finalmente, tras la descripción de los conceptos básicos que son necesarios conocer de antemano para la definición de la arquitectura, y la revisión de las dos arquitecturas seleccionadas y expuestas en las figuras 3.6 y 3.7; se plantea una arquitectura de modelo como la combinación de las dos, únicamente mediante la descripción de sus principales elementos, obteniéndose la solución que se muestra en la figura 3.8.

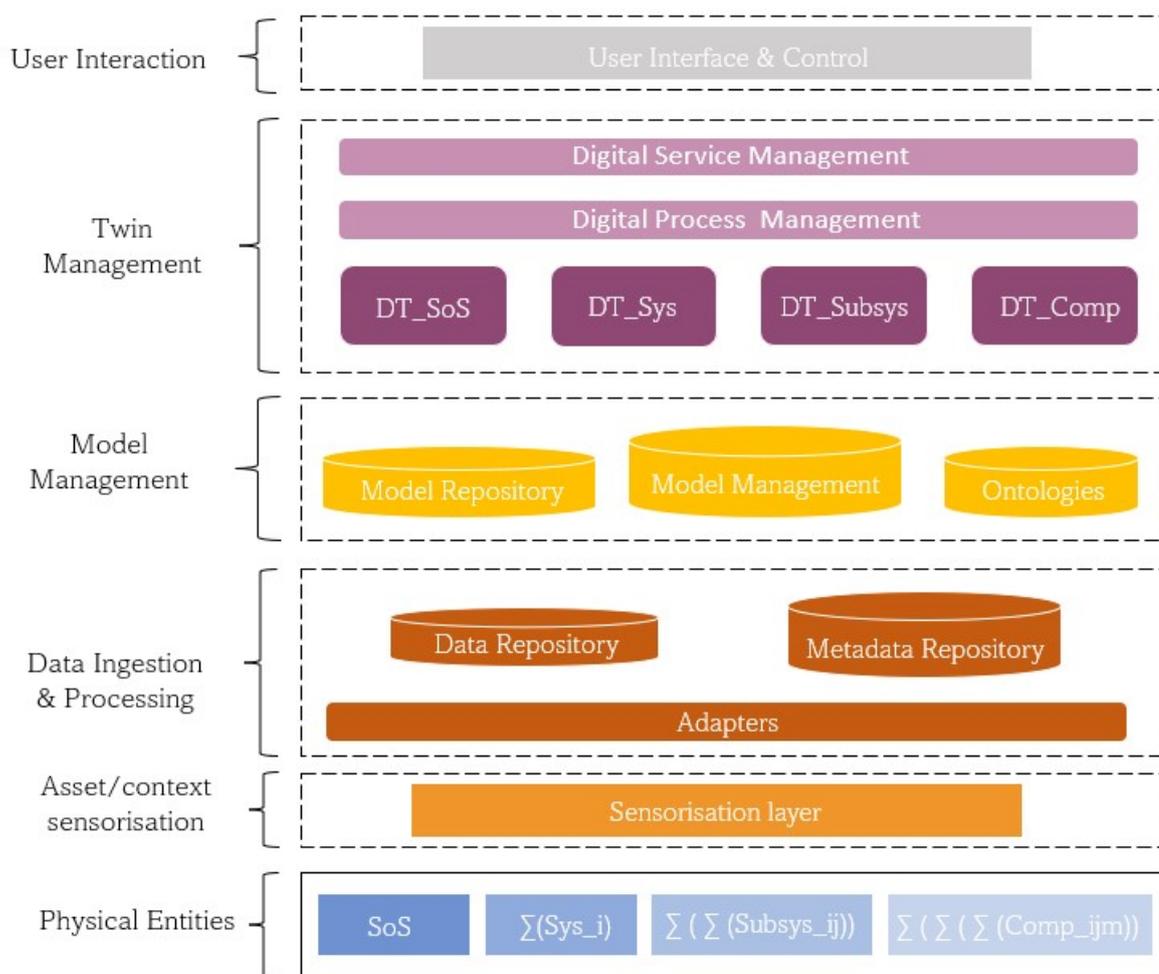


Figura 3.8 Arquitectura de referencia propuesta.

Se puede apreciar al observar la figura 3.8 y las figuras de las arquitecturas de referencia utilizadas, como esta propuesta toma una estructura de capas muy similar, compartiendo algunas de estas capas como puede ser la de ingesta y procesamiento de datos; y muchos de los elementos que las referencias proponen. Sin embargo, esta propuesta en un intento de desarrollar una solución generalizada y simple de cara a su implementación, propone algunos cambios tanto en elementos disponibles, como en la definición de los mismos.

A continuación, se procede a la definición de cada una de los elementos presentes en la arquitectura propuesta en la figura 3.8:

User Interaction:

- User interface and Control: Punto de interacción y comunicación entre el usuario y el sistema.

Twin Management:

- Digital Service Management: Gemelo digital que incluye los servicios o funciones externas ofrecidas por el activo por sí mismo o en colaboración con otros.
- Digital Process Management: Gemelo digital que incluye los procesos o funciones internas que ofrece el activo por sí mismo o en colaboración con otros.
- DT Sos., DT Sys., DT Subsys., DT Comp.: Múltiples DT correspondientes a diferentes entidades, como componentes, subsistemas, sistemas y sistemas de sistemas. Cada uno de ellos representa un gemelo digital único que evoluciona a lo largo del ciclo de vida del activo.

Model Management:

- Model Repository: Base de datos de modelos, pudiendo almacenar desde modelos de datos hasta modelos operativos o computacionales.
- Model Management: Dispositivo que gestiona el conjunto de modelos almacenados en el repositorio de modelos, desde su trazabilidad hasta sus diferentes actualizaciones o versiones.
- Ontologies: Conjunto de modelos para un dominio determinado, como estructuras de edificios, sistemas IoT, ciudades inteligentes, redes de energía, contenido web, etc. A pesar de ubicarse en el bloque de gestión de modelos, se pueden relacionar en muchas ocasiones con el bloque de gestión de gemelos, al mismo nivel de gemelos digitales para las distintas entidades, sin embargo, estos se centran en mayor medida en la representación de los activos, por lo que no podrían ubicarse en este bloque.

Data Ingestión and Processing:

- Data Repository: Almacenamiento de los datos obtenidos del sistema físico, ya sea a través de los sensores o cualquier otra fuente de información externa.
- Metadata Repository: Almacenamiento de información sobre los datos obtenidos, como por ejemplo la trazabilidad de estos datos.
- Adapters: Conjunto de dispositivos que permiten la compatibilidad de datos entre los sistemas.

Asset/context sensorisation:

- Sensorisation layer: capa de sensorización encargada de la monitorización y recogida de datos de los elementos físicos.

Physical Entities:

- Sos., Sys., Subsys., Comp.: Sistema real en el espacio físico, estructurado en entidades físicas, desde componentes como entidad más simple, hasta sistemas de sistemas como entidad más compleja, pasando respectivamente por una clasificación en sistemas y subsistemas.

Comparación arquitecturas

Tras la propuesta de arquitectura y la definición de sus respectivos elementos, se lleva a cabo un análisis que se incluye en la tabla 3.1, en la cual se puede observar la comparativa de los elementos de la arquitectura expuesta con los elementos propios de las referencias que se han usado como base para la creación de este modelo, con el fin de observar con mayor claridad las diferencias y similitudes de los diferentes modelos.

Siguiendo este enfoque cabe destacar en primer lugar como los elementos que eran comunes para las dos arquitecturas de referencia, son también comunes para la arquitectura propuesta; a la vez que la mayor diferencia que se aprecia de la solución propuesta con las referencias analizadas, se puede ubicar en el componente que ya había creado una mayor discrepancia entre las propias arquitecturas de referencia como es el núcleo del modelo en sí, en el que se organizan los diferentes modelos y funciones de los activos.

La arquitectura propuesta parte como base de un modelo de gemelo digital que hospeda un conjunto de gemelos digitales para cada una de las entidades físicas, pero también para los diferentes servicios y procesos del propio activo. La necesidad de relación e interconectividad entre varios gemelos digitales de la arquitectura propuesta hace que esta

proponga un núcleo que se pueda asemejar más a la arquitectura propuesta por la referencia [59].

Tabla 3.1 Comparación elementos arquitecturas.

Capa arquitectura	ISO 23247	CDT [59]	Propuesta
<i>User Interaction</i>	Interfaz de usuario.	Visualización e información.	Punto de interacción y comunicación.
<i>Twin Management</i>	Entidad central, ubicada en el dominio del núcleo, está compuesta por la subentidad de operación y gestión, subentidad de aplicación y servicio, y subentidad de acceso e intercambio de recursos.	DT de las diferentes entidades físicas	DT de las diferentes entidades físicas, Gestión de servicios digitales y gestión de procesos digitales.
<i>Service Management</i>		Servicios cognitivos, basados en datos, basados en modelos y orquestador.	Se incluye en <i>Twin Management</i>
<i>Model Management</i>		Repositorio de modelos, ontologías y gestores de modelos.	Repositorio de modelos, ontologías y gestión de modelos, desde su trazabilidad hasta sus diferentes versiones.
<i>Data Ingestion and Processing</i>	Subentidad de colección de datos y Subentidad de control de dispositivos.	Repositorio de datos y metadatos, adaptadores y brokers, y dispositivos de computación en la nube.	Repositorio de datos y metadatos y adaptadores.
<i>Asset/context sensorisation</i>	No incluye esta capa.	No incluye esta capa.	Sistema de monitorización.
<i>Physical entities</i>	Elementos de fabricación observables.	Partes - Componentes - Subsistemas - Sistemas - Sistemas de sistemas.	Componentes - Subsistemas - Sistemas - Sistemas de sistemas.

Al analizar la tabla 3.1, se aprecia cómo a pesar de ser la propuesta más cercana al modelo CDT, tienen también algunas diferencias, debido a la simplificación que la propuesta hace de la referencia [59] como consecuencia de la finalidad que tiene de presentar un modelo generalizado que pueda ser utilizado en distintas situaciones o sectores independientemente del tipo de activo utilizado.

Es por ello que es preciso recalcar la ausencia en esta arquitectura de la entidad de Gestión de Servicios, siendo esta incluida dentro de la entidad de Gestión de Gemelos. Como ya se ha mencionado se considera que los diferentes servicios y procesos que presente nuestro activo ofrecerán un gemelo digital propio que facilite su gestión, los cuales serán almacenados y gestionados desde la entidad de Gestión de gemelos.

Esta estructura propone además como se puede apreciar, una visión más allá de la visión funcional presentada por las referencias elegidas, acercándose más a una visión empresarial u orientada a los servicios que ofrecen las organizaciones a través de sus activos, tal y como

propone la referencia IMF.

3.2.3 Comparación con las referencias analizadas

Por último, en esta sección se ha realizado una propuesta a grandes rasgos de los conceptos básicos que debe tener el modelo propuesto, centrándose en especial en el desarrollo completo de una arquitectura de integración, que se aleja de las referencias analizadas al enfocarse a una visión de servicio tal y como se ha comentado.

A modo de sumario se decide elaborar en este apartado una comparativa, haciendo uso de la tabla 2.5 elaborada en la sección anterior para la comparación de los modelos de activos digitales analizados, incorporando una nueva fila para la arquitectura propuesta en este apartado tal y como se muestra en la tabla 3.2, con la finalidad de resumir las decisiones básicas del modelo realizadas hasta ahora y llevar a cabo el análisis con el resto de referencias.

Tabla 3.2 Comparativa de las referencias con el modelo propuesto.

Referencia	Ciclo de vida	Definición del activo	Elementos IMF
BIM	Modelo diferente para cada fase.	Clasificación mediante relaciones padre-hijo.	Data Library X Data Model X Architecture
AIM	Modelo diferente para cada fase.	Clasificación mediante relaciones padre-hijo.	Data Library Data Model X Architecture
DT	Modelo único generalmente para cada fase	Generalmente único activo.	Hay diferentes visiones en la literatura.
ISO 23247	No proporciona aportaciones relevantes con respecto al ciclo de vida	Elemento observable de fabricación.	Data Library Data Model Architecture X
RAMI	Modelo único que evoluciona con el tiempo.	Producto inteligente - Fábrica inteligente - Mundo conectado.	Data Library X Data Model X Architecture X
AAS	Modelo único que evoluciona con el tiempo.	Ficha por cada activo.	Data Library Data Model X Architecture X
CDT	Modelo único que evoluciona con el tiempo.	SoS - Sys. - Subsys. - Comp. - Part.	Data Library X Data Model X Architecture X
Propuesta	Modelo único que evoluciona con el tiempo.	Elemento discreto – elemento compuesto - Sistema de elementos compuestos	Data Library X Data Model X Architecture X

Se puede concluir como al ser el modelo elegido para la propuesta, un modelo compuesto

por un conjunto de gemelos digitales, este tendrá una mayor semejanza con dicho modelo, con el Cognitive Digital Twin, o incluso con el modelo RAMI, al ser este la base para la creación del CDT. Cabe señalar, sin embargo, como el modelo propuesto comparte también algunas de las características más generales con otros de los modelos propuestos, en relación por ejemplo a la forma de entender cómo evolucionan los modelos a lo largo del ciclo de vida de los activos.

Con respecto al conjunto de elementos que presenta el IMF, la solución propuesta en este apartado desarrollará completamente cada uno de ellos; aunque como ya se ha mencionado, en este trabajo solo se centre en la arquitectura.

4 Búsqueda de tecnología de implementación

A nivel metodológico se aplica a la arquitectura propuesta en el apartado anterior, un caso de uso concreto que permita entender con mayor precisión el funcionamiento de dicha arquitectura. Para llevar a cabo la implementación del modelo será necesario el uso de una tecnología de computación en la nube.

En este apartado se expone una revisión de las diferentes plataformas comerciales existentes que disponen de las tecnologías necesarias para la implementación de la solución.

Una vez realizada la comparativa de las plataformas, se lleva a cabo la elección de la plataforma de Microsoft, y se incluye la justificación del uso de la tecnología Azure DT en la arquitectura propuesta, y especificada para el caso práctico elegido.

4.1 Comparación tecnologías disponibles

Existen en el mercado varias plataformas que ofrecen los servicios que se buscan para la solución propuesta. En concreto destacan esencialmente tres plataformas comerciales como las más utilizadas en este tipo de propuestas: la de Azure Digital Twin de Microsoft, Google Clouds de Google y AWS de Amazon.

Para comenzar se presentan cada una de las plataformas, y se incluye el conjunto de elementos, y sus correspondientes definiciones, necesarios para el desarrollo de la arquitectura. A continuación, se elabora una comparativa entre los elementos disponibles de cada una de las plataformas. Dicha comparativa se muestra en la tabla 4.1.

4.1.1 Microsoft Azure

La tecnología de Microsoft Azure es conocida como un servicio de computación en la nube creado por Microsoft para construir, probar, desplegar y administrar aplicaciones y servicios mediante el uso de sus centros de datos.

Azure ofrece una amplia gama de servicios, lo que incluye las funcionalidades de plataforma como servicio (PaaS), infraestructura como servicio (IaaS) y servicio de base de datos administrados. Azure es una gran colección de servidores y hardware de red que ejecuta un conjunto complejo de aplicaciones distribuidas. Estas aplicaciones orquestan la configuración y el funcionamiento del hardware y el software virtualizados en esos servidores.

Se incluyen a continuación las definiciones de cada uno de los elementos incluidos en la tabla 4.1.

- Power BI: Herramientas de inteligencia empresarial que permiten crear visualizaciones, hacer análisis ad-hoc y producir conocimiento empresarial a partir de los datos. Permite una fácil conexión con las fuentes de datos.
- Azure Digital Twins: Servicios que sirven para crear representaciones digitales de cosas reales, lugares, procesos empresariales y personas. El uso de estos servicios permite obtener información, impulsar la creación de mejores productos y nuevas experiencias de cliente, y optimizar las operaciones y los costos.
- Azure Machine Learning: Servicio en la nube para entrenar, implementar, automatizar y administrar modelos de aprendizaje automático, en base a datos ya existentes, pudiendo así predecir nuevos resultados, comportamientos y tendencias futuras para nuevos escenarios.
- Azure Cosmos DB: Servicio de base de datos, que nos permite utilizar varios tipos de modelos de datos, almacenar datos y realizar consultas sobre los datos previamente almacenados.
- Azure Data Lake: Servicio de almacenamiento en la nube altamente escalable que permite informar sobre conjuntos de datos grandes y complejos.
- Azure Data Explorer: Plataforma de análisis de macrodatos distribuida, de baja latencia y totalmente administrada, que ejecuta consultas complejas en petabytes de datos. Altamente optimizada para los datos de registro y de series temporales.
- Stream Ingestión(IoT Central): Plataforma de aplicaciones de IoT que reduce la carga y el coste de desarrollo, la administración y el mantenimiento de las soluciones

IoT. Punto de conectividad de los activos con el sistema Azure proporcionando la ingestión de datos de los distintos sensores.

- Event Hub: Plataforma de streaming de macrodatos, ofrece una plataforma distribuida de procesamiento de secuencias con baja latencia e integración perfecta, con servicios de datos y análisis dentro y fuera de Azure para crear una canalización de macrodatos completa.
- DPS (IoT Hub Device Provisioning Service): Asistente de IoT Hub que ofrece un aprovisionamiento Just inTime, sin intervención del usuario, de la instancia correcta de IoT Hub, lo que permite aprovisionar múltiples dispositivos de forma segura y escalable.
- Stream Processing = Stream Analytics + Functions
 - Stream Analytics: motor de procesamiento de eventos complejos y análisis en tiempo real que está diseñado para analizar y procesar grandes volúmenes de datos de streaming con capacidad de operar con varios orígenes de manera simultánea.
 - Functions: Ofrece una interfaz de usuario intuitiva basada en el navegador que permite crear piezas de código programadas o activadas implementados en una variedad de lenguajes de programación.
- CRUD Mantenimiento: Entorno en el que podemos crear, leer, modificar y eliminar datos de las bases de datos, así como alimentar la arquitectura implementada con información estática o simplemente con información que no es recogida por los diferentes activos de la red.
- Azure IoT Edge: Servicio donde los sensores y dispositivos comunican datos en tiempo real a una red. Implementa la inteligencia en la nube directamente en dispositivos IoT para su uso en escenarios locales.

4.1.2 Google Clouds

Google Cloud consiste en un conjunto de recursos físicos, como computadoras y unidades de disco duro, y recursos virtuales, como máquinas virtuales (VM), que se encuentran en los centros de datos de Google en todo el mundo. En la computación en la nube de Google Clouds, lo que se conoce en ocasiones como productos de software y hardware pasan a ser denominados servicios. Estos servicios permiten acceder a los recursos subyacentes.

Se procede en este apartado a la definición de cada uno de los elementos que proporciona la plataforma de Google:

- Looker: Servicio de análisis de datos que explora, comparte y visualiza los datos de la empresa con la finalidad de permitir tomar mejores decisiones comerciales.
- Compute Engine: servicio de computación seguro y personalizable que permite crear y ejecutar máquinas virtuales en la infraestructura de Google. Acelera la transformación digital con VM de alto rendimiento.
- Inteligencia artificial de vértice: Aloja los modelos de aprendizaje automático y entrenamiento con gran potencia y la flexibilidad y contenedores personalizados.
- Cloud Firestore: Desarrolla aplicaciones sofisticadas de forma sencilla mediante una base de datos de documentos completamente administrada, escalable y sin servidores.
- Data proc: Implementa servicios de procesamiento de estadísticas y datos de código abierto con mayor eficiencia y seguridad.
- Big Query: Almacén de datos en múltiples nubes de alta escalabilidad, rentable y sin servidor, diseñado para mejorar agilidad empresarial.
- Cloud Pub/Sub: Crea mensajería y transferencia escalables para sistemas basados en eventos y análisis de transmisiones. Ingiera eventos para emitir en BigQuery, lagos de datos o bases de datos operativas.
- Data Flow: Procesamiento unificado en streaming, de datos por lotes y de transmisión rápida, sin servidores y rentable.
- Cloud Functions: Ejecuta piezas de código sin necesidad de administrar servidores, con una oferta escalable de funciones como servicio (FaaS) y de prepago, que permite crear y conectar servicios basados en eventos con un código sencillo.
- Edge TPU: Circuito ASIC de Google diseñado a medida para generar inferencias en el perímetro.

4.1.3 AWS Amazon

Amazon Web Services (AWS) es una plataforma en la nube que ofrece más de 200 servicios integrales de centros de datos a nivel global. AWS cuenta con una gran cantidad de servicios y de características incluidas en ellos, ofreciendo desde tecnologías de infraestructura como almacenamiento y bases de datos hasta tecnologías emergentes como aprendizaje automático e inteligencia artificial, lagos de datos y análisis e internet de las cosas. Esto hace que llevar las aplicaciones existentes a la nube sea más rápido y fácil.

AWS ofrece también una amplia variedad de bases de datos diseñadas especialmente para diferentes tipos de aplicaciones.

Finalmente, se adjunta también las definiciones de los distintos elementos necesarios de la tecnología AWS de Amazon:

- QuickSight: Permite la comprensión de los datos mediante preguntas en lenguaje natural, exploración a través de paneles interactivos o la búsqueda automática de patrones y valores atípicos, impulsada por machine learning.
- IoT Things Graph: Servicio que facilita la conexión visual de diferentes dispositivos y servicios en la nube para crear aplicaciones de IoT.
- SageMaker: Crea, forma e implementa modelos de machine learning para cualquier caso de uso con infraestructura, herramientas y flujos de trabajo completamente administrados.
- Dynamo DB: Base de datos NoSQL de clave-valor sin servidor y completamente administrada que está diseñada para ejecutar aplicaciones de alto rendimiento a cualquier escala.
- Amazon Timestream: Base de datos de series temporales rápida, escalable y sin servidor
- EMR: Plataforma de big data en la nube para ejecutar trabajos de procesamiento de datos distribuidos a gran escala, consultas SQL interactivas y aplicaciones de machine learning con marcos de análisis de código abierto.
- Kinesis Analytics: Ofrece la manera más sencilla de transformar y analizar datos de streaming en tiempo real con Apache Flink.
- Kinesis Fitehose: Servicio de extracción, transformación y carga que captura, transforma y entrega de manera fiable datos de streaming en lagos y almacenes de datos y servicios de análisis.
- Greengrass: Servicio de nube y tiempo de ejecución de borde y código abierto para crear, implementar y administrar software de dispositivos.

4.1.4 Comparativa de elementos

Tras el análisis individual de las plataformas seleccionadas de Google, Amazon y Microsoft, nos encontramos ante tres tecnologías de gran alcance a nivel empresarial, y una amplia oferta de componentes, aplicaciones y servicios.

Cada una de las plataformas comerciales analizadas oferta una gran variedad de elementos, muchos más de los incluidos y analizados en esta sección, para un uso muy extenso de aplicaciones que disponen estas tecnologías.

Sin embargo, debido a la gran magnitud que tienen estas tecnologías para multitud de necesidades diferentes, se decide realizar la comparativa de las plataformas directamente desde el enfoque de nuestra arquitectura propuesta, es decir, se han seleccionado para su análisis únicamente aquellos elementos de utilidad en nuestra solución propuesta, comparándolos directamente con los equivalentes en cada una de las plataformas seleccionadas.

La comparativa de las plataformas mediante la elaboración de una tabla de correspondencias de elementos de cada una de las plataformas, para cada funcionalidad, se muestra en la tabla 4.1.

Tabla 4.1 Comparación elementos Azure - Google - Amazon.

Funcionalidad	Azure	Google	Amazon
Herramienta que permite la visualización y compartición de datos de manera sencilla. Se relaciona con la interfaz del usuario.	Power BI	Looker	QuickSight
Permite la creación de gemelos digitales o aplicaciones IoT de los activos.	Azure Digital Twin	Compute Engine	IoT Things Graph
Crea y gestiona modelos de aprendizaje automático.	Azure Machine Learning	Inteligencia artificial de vértice	SageMaker
Servicio de base de datos, que permite ejecutar aplicaciones de alto rendimiento.	Azure Cosmos DB	Cloud Firestore	Dynamo DB
Servicio de almacenamiento en la nube y procesamiento de datos.	Azure Data Lake	Dataproc	-
Servicio de procesamiento de macrodatos, series temporales o datos en tiempo real.	Azure Data Explorer	Big Query	Amazon Timestream EMR Kinesis Analytics
Plataforma para la transmisión y mensajería de sistemas de eventos.	Iot Central (Event Hub)	Cloud Pub/Sub	Kinesis Fitehose
Plataforma de análisis de eventos o datos por lotes.	Stream Processing (Stream Analytics)	Data Flow	Kinesis Analytics
Permite crear e implementar piezas de código en una gran oferta de lenguajes y funciones	Stream Processing (Functions)	Cloud Functions	-
Entorno que permite acceder y modificar la información de la base de datos.	CRUD Mantenimiento	-	-
Servicio en la nube que gestiona e implementa dispositivos IoT.	Azure IoT Edge	Edge TPU	Greengrass

4.2 Conclusiones y elección de la tecnología

Una de las primeras conclusiones a las que se llega durante el proceso de análisis para la realización de la comparativa de la tabla 4.1 es la discrepancia de elementos entre las

propias plataformas. Para la elaboración de esta comparativa en primer lugar se analizó la información proporcionada por las propias plataformas, ya que tanto Google [19] como Microsoft [36] [37] proporcionan en sus servidores comparativas de sus elementos con respecto a los de sus principales competidores. Sin embargo, aparecen numerosas discrepancias con respecto a las equivalencias que cada una elabora de los elementos que ellas ofertan.

Frente a esta dificultad, se decide llevar a cabo también una búsqueda de comparativas proporcionadas por referencias más objetivas que no pertenecieran a ninguna de las plataformas en cuestión [11] [42]. Comparando todas las referencias encontradas se obtiene la tabla anterior 4.1.

Destaca además como a pesar de ser plataformas orientadas a una misma finalidad de creación de servicios y aplicaciones para diferentes organizaciones, son muchos y muy dispares los enfoques a los que pueden optar, no disponiendo siempre de equivalentes para los elementos de las plataformas competidoras.

En este caso se ha partido de los elementos de la tecnología de Azure y se han buscado y comparado las otras dos con ella; es por ello que se pueden observar la ausencia de elementos equivalentes por sus competidores como se ha comentado, por ejemplo, con el elemento de CRUD, el cual carece de equivalente tanto AWS de Amazon como en la tecnología Google Clouds; o el elemento de Azure Data Lake, el cual si tiene elemento equivalente en Google Clouds, pero no en AWS.

Se justifica de esta manera, la decisión tomada de elección de la tecnología de Microsoft Azure para la implementación de nuestra solución en el caso práctico, al adaptarse mejor a la arquitectura propuesta, como consecuencia de ser la plataforma que presenta una aplicación de gemelo digital de forma más madura, mediante el desarrollo de ontologías y lenguaje propios; lo cual la hace más potente que las demás.

Finalmente, una vez finalizada la búsqueda de tecnologías de implementación, se decide llevar a cabo una prueba de conceptos de un caso práctico, sobre la plataforma de Microsoft, mediante la tecnología de Azure.

Para el desarrollo de este modelo se ha usado dentro de la amplia oferta que proporciona esta plataforma, la tecnología de Azure Digital Twins, la cual consiste en una oferta de Internet de las cosas (IoT) de la plataforma como servicio, que permite la creación de grafos gemelos basados en modelos digitales de entornos completos como pueden ser edificios, ferrocarriles etc.

Esta tecnología permite modelar y crear representaciones digitales de entornos conectados con un lenguaje de modelado abierto, es decir, da vida a gemelos digitales con un entorno de ejecución en tiempo real que recoge y almacena los distintos cambios que

pueden sufrir los gemelos a lo largo de su ciclo de vida; mediante el lenguaje de definición de gemelos digitales (DTDL) que se basa en JSON – LD. Al mismo tiempo desbloquea información procesable sobre el comportamiento de los entornos modelados a través de potentes API de consulta, y se integra con los análisis de datos de Azure. Como consecuencia facilitará la eliminación de los silos de información en entornos conectados.

5 Caso de estudio

La última sección de este trabajo se enfoca en la descripción y desarrollo del caso de uso que se ha utilizado y ha servido como guía para el desarrollo del modelo de activos digitales propuesto, teniendo en cuenta su importancia para el desarrollo del mantenimiento industrial.

A partir de la elección del caso práctico expuesto se pretende demostrar la capacidad del modelo planteado con respecto a la proporción de soporte para este tipo de soluciones. De otro modo, este caso permitirá justificar si la estrategia de gestión del riesgo propuesta en este caso de estudio es capaz de interpretar las distintas señales en niveles de riesgos, y la propia plataforma propuesta representa adecuadamente dicha información en las acciones de mantenimiento correctas; facilitando así el completo desarrollo y validación de la propuesta planteada.

En un principio, se procede a la descripción del contexto en el que se lleva a cabo este caso de uso como es el sector ferroviario, y la importancia que tiene en la actualidad este tipo de estudio en este ámbito. Una vez contextualizado, se procede a la explicación detallada del caso práctico de la vía de tren que se ha utilizado como ejemplo y justificación para la toma de decisiones de la solución propuesta, además de la descripción del proceso de implementación de la solución propuesta, y su papel en la toma de decisiones de mantenimiento mediante la gestión del riesgo.

Por último, enfocado a la implementación de la arquitectura, se describe la distribución interna de los elementos de la tecnología elegida en la arquitectura propuesta, y el desarrollo y explicación del uso de dichos elementos en el proceso de gestión del riesgo, de cara al mantenimiento inteligente de los activos.

De esta forma se aprecia la contribución de este apartado en el uso del caso práctico enfocado en dos caminos diferenciados, por un lado, mediante su aportación en el sector ferroviario, y por otro a través de su participación en la adaptación de la plataforma.

A la hora de la especificación de la solución propuesta para el caso práctico concreto, se descubre la dificultad de la solución generalizada y simplificada que se buscaba, ya que los casos prácticos pueden llegar a ser muy dispares y pueden tener requisitos muy opuestos haciendo que una solución muy general tenga que posteriormente ser especializada para poder usarla en un determinado caso de estudio.

5.1 Contextualización del caso práctico

Sector ferroviario

El sector ferrocarril en España ha experimentado en los últimos años un gran desarrollo, como consecuencia de la introducción de la alta velocidad, la expansión de los servicios de cercanías, y el apoyo y guía proporcionado por la Unión Europea al transporte en general y en especial al ferrocarril.

Por esta razón, el sector ferroviario, supone un sector de gran impacto en la industria española, debido a su elevado nivel tecnológico y de servicios, gozando además de un gran prestigio a nivel internacional.

Aunque el proceso experimentado hasta ahora por dicho sector se considera muy positivo en relación a los avances alcanzados; dado que seguimos en una etapa de grandes cambios desde tecnológicos hasta económicos o sociales, pero también de cambios tanto a nivel nacional, como internacional, se estima la necesidad de continuar en esta línea de investigación y desarrollo que permita al sector ferroviario evolucionar y seguir adaptándose a los nuevos tiempos y las nuevas circunstancias [41].

Gestión del mantenimiento en el sector ferroviario

Con relación a la acción de mantenimiento en este sector, aparecen varias razones que justifican su necesidad de desarrollo e importancia en este ámbito.

Por un lado, sobresale la vital importancia que se le adjudica al concepto de riesgo, al estar directamente relacionado en este caso con la seguridad, recalcando la perspectiva de gestión del riesgo del fallo de cara a intentar prevenir que se puedan generar problemas de seguridad o accidentes.

El hecho de disponer del control de los riesgos y, por tanto, de la seguridad de los equipos, se encuentra estrechamente enlazado con la disponibilidad o rendimiento del sistema [14], afectando a la siguiente razón de justificación.

Desde otra perspectiva, otra de las razones de la importancia del mantenimiento en el sector ferroviario, consiste en la gran influencia que tiene en la dimensión económica de

la propia organización. Esto se debe no solo al mayor coste que pueda tener un fallo o avería del equipo que implique la sustitución de elementos, frente al arreglo o mejora de un mantenimiento preventivo; si no a las propias consecuencias de dicho fallo, que pueda llevar a la suspensión o cambio de viajes, o el arreglo de los daños colaterales en otros activos, que la gestión periódica del riesgo de fallo previene mediante mantenimiento preventivo.

5.2 Descripción caso práctico

Para este estudio se ha elegido un caso de uso dentro del sector ferroviario, más concretamente el caso práctico de la vía de tren. Para la realización de los ensayos convenientes para la justificación, se ha tenido acceso a una maqueta a escala, cedida por del Departamento de Mecánica de la ETSI de la Universidad de Sevilla, que correspondía al caso práctico elegido de la vía de tren.

Esta maqueta está formada por una vía a escala y un coche de ferrocarril también a escala que se desplaza a lo largo de la vía, y el cual se encarga de la toma de medidas y recogida de datos mediante un ordenador que lleva integrado sobre él.

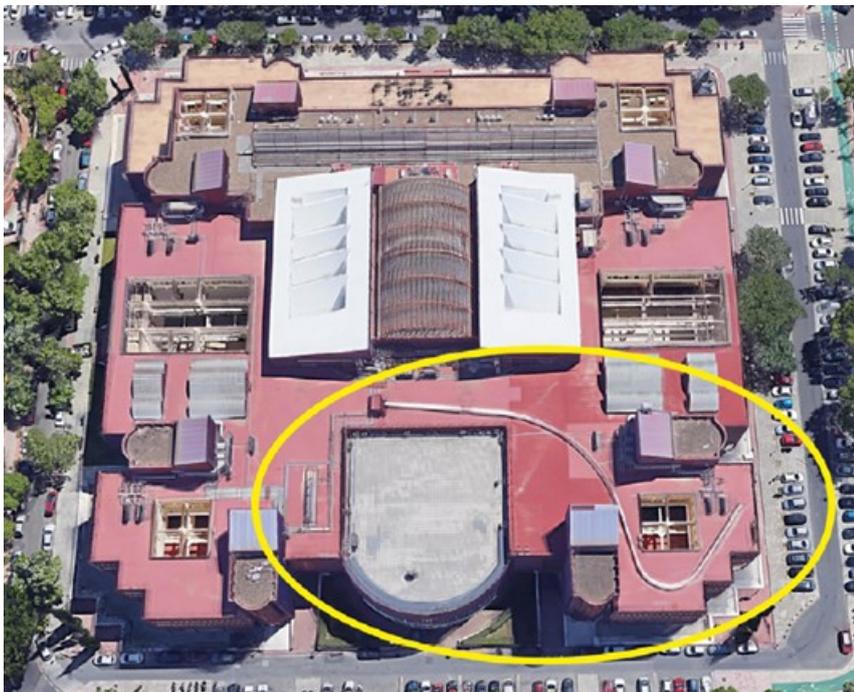


Figura 5.1 Imagen de la vía a escala situada en la azotea de la escuela.

En la figura 5.1 se puede observar una visión de la planta de dicha vía a escala, la cual se encuentra ubicada en la azotea de la escuela. Se incluye también una visualización de la trayectoria de vía proyectada en los ejes cartesianos en la figura 5.2; y por último se

muestra en la figura 5.3 una foto del coche a escala real, junto con un esbozo ubicado en el sistema de coordenadas cartesianas.

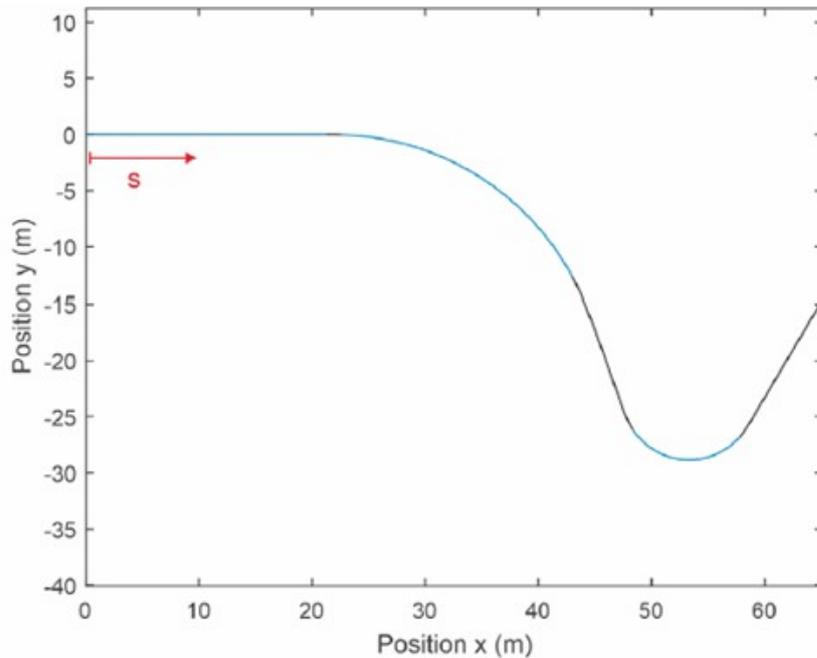


Figura 5.2 Trayectoria de la vía en los ejes cartesianos.

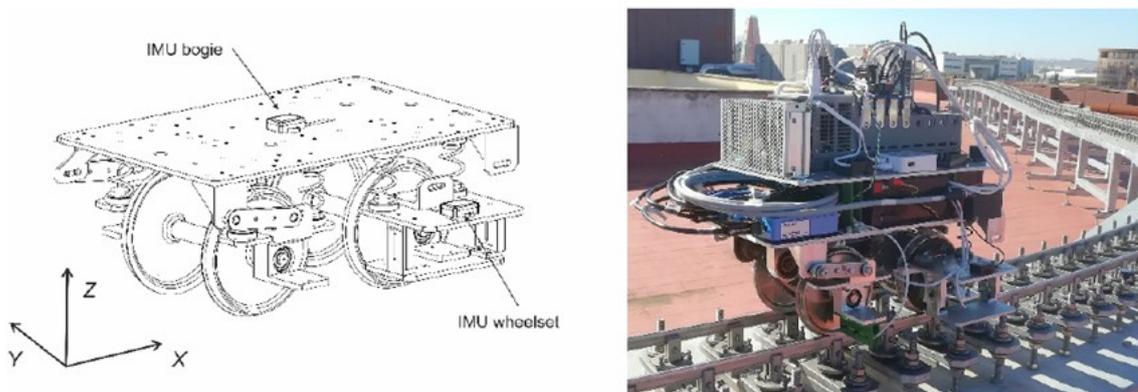


Figura 5.3 Vehículo a escala.

Partiendo del enfoque de este trabajo hacia la prueba de conceptos en el ámbito de modelos para el mantenimiento digital, cabe mencionar la importancia del caso práctico elegido debido a su complejidad de monitorización al tener un sistema de medida móvil, que permitirá a su vez comprobar la capacidad del modelo propuesto durante el proceso de toma de medidas, proporcionando una prueba de conceptos bastante extensiva.

5.3 Implementación del caso práctico

Se procede a continuación a la especificación de la solución propuesta en este trabajo para el caso práctico propuesto, comenzando con los componentes básicos definidos, para después enfocar el caso práctico a la toma de decisiones a través de la arquitectura propuesta.

5.3.1 Componentes básicos

Jerarquía del activo

Se decidió en primer lugar tomar como activo principal del caso práctico el conjunto de las vías de tren. Para la estructuración del activo, siguiendo la estructuración propuesta en el apartado anterior, se divide el activo en tres niveles, teniendo como nivel superior el conjunto de la vía, dividida como segundo nivel en los diferentes tramos que la componen y finalmente, como nivel inferior, las distintas secciones que componen el tramo descrito. Para cada elemento en cada nivel se creará un gemelo digital único e independiente, aunque relacionado con los demás.

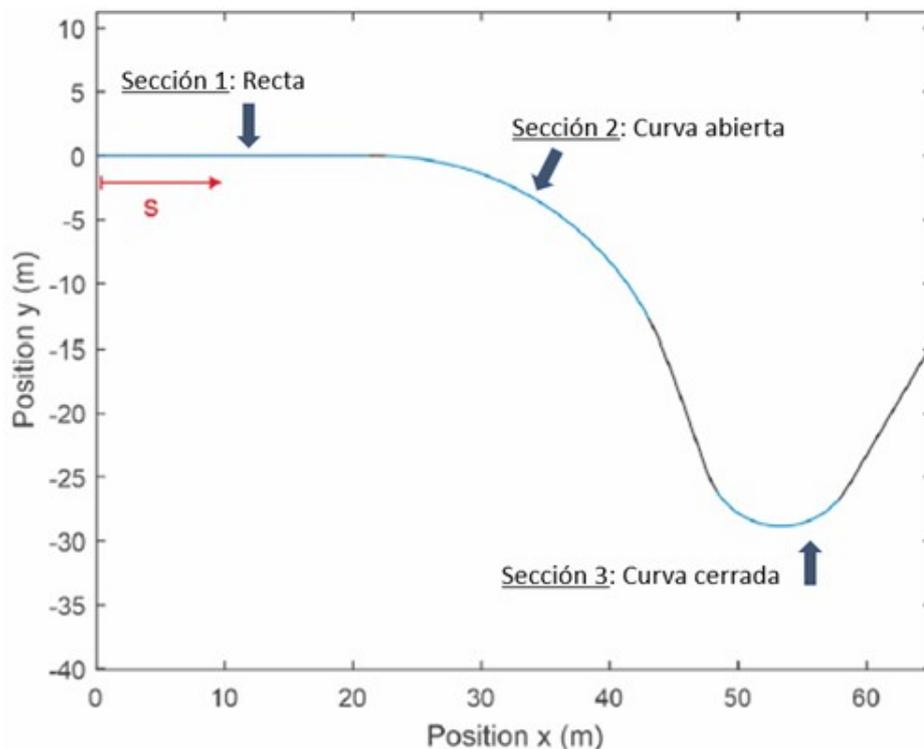


Figura 5.4 Visualización de las secciones en la vía a escala.

En el caso práctico de la vía de tren, dentro del ejemplo particular de la maqueta que se va a utilizar, se tiene un único tramo, que consiste en la totalidad de la vía, subdividida en

tres secciones diferenciadas según la forma de la vía, es decir: sección de segmento recto, sección de segmento de curva abierta y de segmento de curva cerrada. La división de la vía puede visualizarse en la imagen 5.4.

Descripción del activo

De cara a la descripción del activo, tal y como se definió en la solución propuesta, esta estará compuesta por tres capas, que permitan en su conjunto la definición completa y única del activo seleccionado.

En primer lugar, será necesario la definición de las distintas clases y subclases de los activos, mediante algún lenguaje de formato abierto, que pueda ser general para cualquier uso. Además se definen de forma específica para este caso concreto, la capa de señales y la estructura técnica de los activos.

Todo este conjunto de datos e información se llevará al gemelo digital propuesto con el objetivo de demostrar la capacidad de representación de dicho modelo.

- Clases

La definición de las clases y subclases determina por un lado el elemento concreto dentro de la ontología. La base del gemelo digital escogido de Azure es una ontología. En este caso la clase determinará el tipo de entidad, siendo la entidad en este caso práctico la sección, la cual se determina en función de donde comienza, donde finaliza y un conjunto de propiedades que la definen.

También ligado a la definición de clase se encuentran las definiciones de propiedades de ese elemento y la definición de las variables de monitorización que lo determinarán. Son estas variables de monitorización la que se ligarán al estado.

- Estructura técnica

Además de la definición de las clases que determine el tipo de entidad y sus características, se necesita como ya se expuso en la solución, de una estructura técnica que permita la definición de las relaciones funcionales entre los diferentes elementos, asociados cada uno con su clase. En la figura 5.5 se puede visualizar la estructura técnica definida para este caso práctico, en la que se muestra los diferentes elementos físicos según el nivel jerárquico que ocupan y las relaciones entre ellos. Se propone una arquitectura flexible que permita la incorporación y ubicación de cualquier elemento en esta arquitectura una vez definida su clase. El uso de la ontología simplifica este proceso.

Comenzado con el nivel más bajo de la estructura se tendrán en este caso tres componentes para las tres secciones que conforman el tramo de la vía, a los cuales se le asociarán distintos

modos de fallo. Estos componentes formarán parte del subsistema de tramo de vía 1, el cual conformará el sistema del tramo y a su vez el sistema de sistemas que conllevaría la línea completa; el cual coincide en este caso concreto con el tramo al tener la línea de ferrocarril un solo tramo. Cada uno de estos niveles de la estructura técnica conformarán las distintas entidades del sistema.

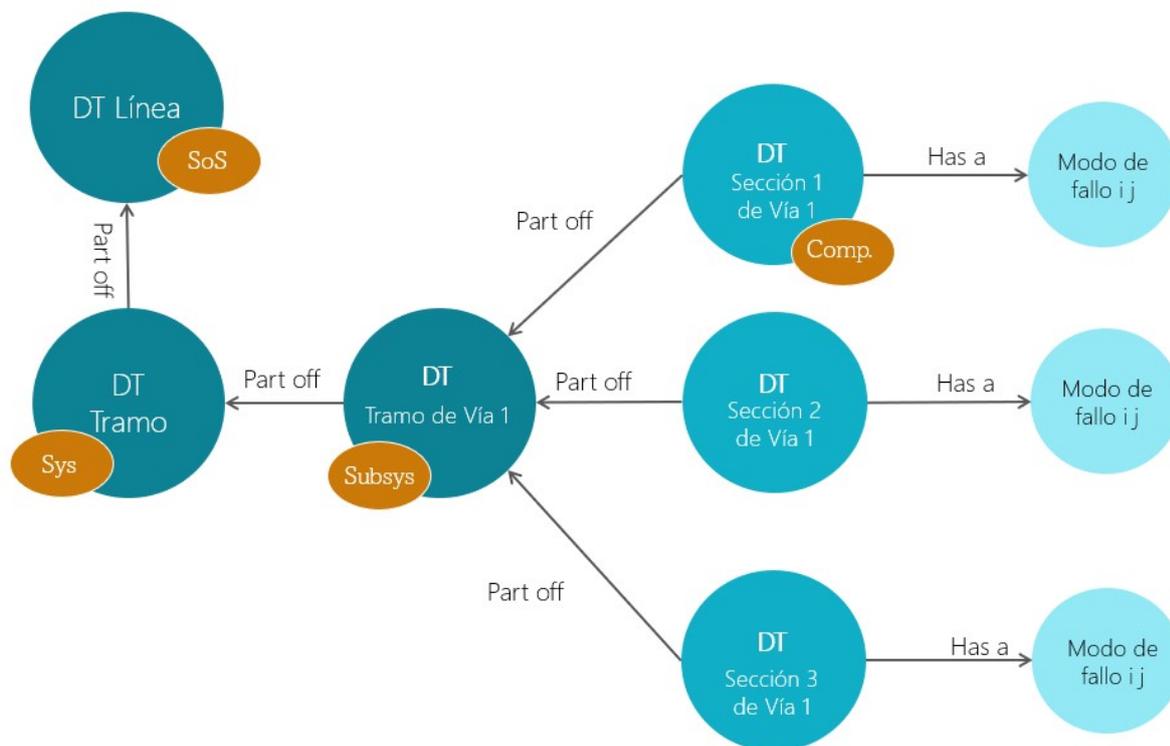


Figura 5.5 Estructura técnica del caso de uso.

- Capa de señales

Finalmente, la capa de señales se conforma mediante el proceso de monitorización del sistema. Para la toma de medidas la maqueta cuenta con dos sensores inerciales, uno encima del bogie (IMU bogie), y el segundo en la caja de ruedas (IMU wheelset), tal y como puede observarse señalado en la figura 5.3. A partir de ellos se realizarán una serie de ensayos y recogida de datos, a partir de los cuales obtendremos una serie de información, almacenada en las denominadas variables de monitorización, las cuales aparecen en la tabla 5.1 junto con su correspondiente definición.

Esta capa de señales y la información obtenida a través de ella permiten completar la descripción del activo, mediante la definición de la evolución de dichos activos a lo largo de su ciclo de vida completo.

En la tabla 5.1, destaca una diferenciación en dos grupos, del conjunto de variables que se exponen, en primer lugar aparecen el conjunto de variables que se obtienen de forma directa del proceso de monitorización como pueden ser el tiempo espacio o velocidad; frente a aquellas propiedades de definición del activo, como pueden ser el peralte o la curvatura, las cuales determinan características que definen al activo geoméricamente, obtenidas de forma directa del proceso de monitorización.

Tabla 5.1 Variables de monitorización del caso práctico.

Variable	Unidad	Descripción
Tiempo (t)	s	Momento en que se realiza la medida, desde el inicio del ensayo.
Distancia (s)	m	Distancia recorrida desde uno de los extremos de la vía, hasta donde se realiza la medida.
Velocidad (V)	m/s	Velocidad media que lleva el coche.
Peralte (InclinoX)	°	Diferencia de altura entre carril derecho e izquierdo, medido en grados.
Pendiente vertical (InclinoY)	°	Pendiente de la vía.
Curvatura	ρ	Desviación de la dirección o forma recta de la vía.
Pulsos (Pulsos encoder)	[-]	Medida utilizada para cálculos de distancia y la velocidad.
Balizas (balizas)	0/1	Elemento fijo, que marca una distancia concreta recorrida.
Aceleración (aX, aY, aZ)	g	Aceleración del coche. Tendrá tres componentes para cada uno de los ejes de coordenadas (X, Y, Z).
Velocidad Angular (wX, wY, wZ)	rad/s	Velocidad angular del coche. Tendrá tres componentes para cada uno de los ejes de coordenadas (X, Y, Z).

A partir de las variables de monitorización obtenidas se calculan otra serie de variables, las variables geométricas o de descripción del elemento físico, también conocidas como irregularidades, que permiten gestionar los modos de fallo y su riesgo. De esta forma, estas variables estarán ligadas también a las acciones de mantenimiento promovidas por los eventos.

Tabla 5.2 Variables geométricas del caso práctico.

Variable	Unidad	Descripción
Peralte	m	Diferencia en la elevación de la parte exterior y la interior de la vía
Ancho	m	Distancia entre las caras internas de los carriles de la vía del tren.
Nivelación	m	Cálculo de las alturas de distintos puntos a partir de un plano de comparación.
Alineamiento	m	Proyección del eje de la vía sobre unos planos de referencia.

Una vez definidas las variables que se usarán en la toma de datos, el siguiente paso consiste en la realización de los ensayos y su monitorización. Para ello, en el proceso de

simplificación de la toma de medidas realizadas, se definirán en cada sección una serie de puntos de control (PCi), en concreto serán tres por sección, tal y como se puede observar en la figura 5.6, y serán aquellos puntos donde se tomarán las medidas necesarias expuestas en la tabla 5.1 anterior, con el fin de facilitar la gestión de los estados o niveles de riesgo, y el análisis de las series temporales obtenidas.

La importancia de este análisis aparece en su posibilidad de mostrar cómo cambian las variables a lo largo del tiempo. Es decir, muestra cómo se ajustan los datos a lo largo de los puntos de control, así como los resultados finales, de cara a la detección de los modos de fallo.

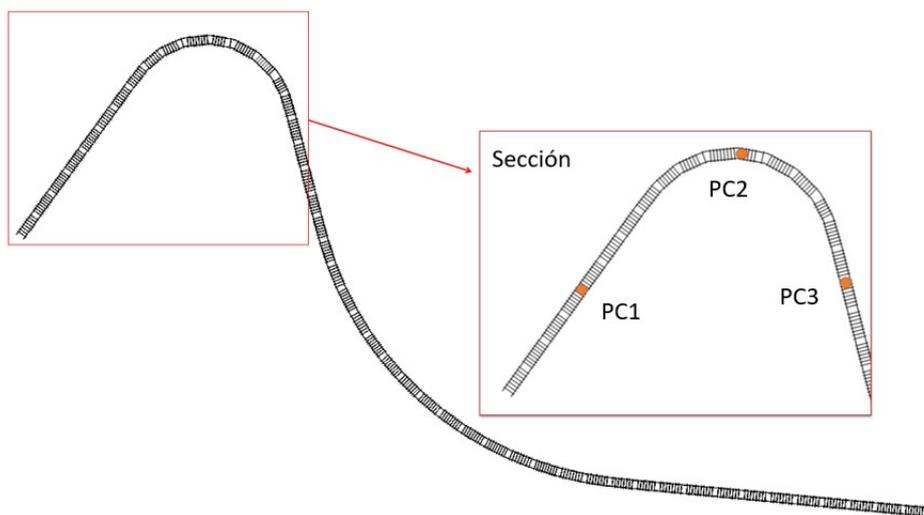


Figura 5.6 Ejemplo ubicación puntos de control (PCi) en la sección.

5.3.2 Modelado de la toma de decisiones basado en control del riesgo en el modo de fallo

La idea principal de este apartado dentro del trabajo, es la realización del diseño de un modelo de organización de la información que represente el gemelo de forma que de soporte a la toma de decisión.

Tal y como se ha expuesto, tanto el modelo de digitalización de activos propuesto, como el caso práctico elegido, ambos están enfocados a la gestión del mantenimiento mediante el análisis de los niveles de riesgo de los activos, basado en los modos de fallo.

Para ello se enfocará el estudio en la gestión de una serie de modos de fallos que serán previamente definidos, y el riesgo de que se produzcan, con el objetivo de probar la competencia de estos modelos para su programación sencilla. Los modos de fallo aparecen definidos por la norma UNE 13306 [55] como las distintas maneras en que puede

producirse la inaptitud de un elemento para la realización de una función requerida. Es decir, se entienden como aquellas causas físicas evidentes del fallo [21]. Pueden definirse por la pérdida de función o por un cambio de estado que se ha producido.

Se definen para este caso práctico una serie de modos de fallos genéricos, los cuales se incluyen en la tabla 5.3; como por ejemplo el modo de fallo de carril roto, el cual determina como al elemento concreto del carril, le ocurre la circunstancia concreta de su rotura.

En relación a estos modos de fallo en este caso de uso se definen con un subíndice i en función del tipo de modo de fallo, y un subíndice j según el número de fallo de tipo i dentro de una misma sección.

Tabla 5.3 Modos de fallo definidos.

i	Modo de fallo
1	Pérdida geométrica
2	Carril roto
3	Carril fisurado
4	Problema de onda corta
5	Problema de onda larga

De esta forma se pretende argumentar la importancia no solo del modo de fallo de cara a la toma de decisiones, sino también la gran importancia de la ubicación de dicho modo de fallo, al ser posible la existencia de más de un modo de fallo en un mismo activo, lo cual no aparece resuelto del todo en la actualidad.

La toma de decisión se realiza en función del estado de los modos de fallo. Dicho estado se obtiene a partir de la interpretación de la información contenida en las variables que se han llevado hasta el gemelo. Además del estado de los modos de fallo, el propio modelo tendrá también su propio estado como interpretación de la combinación de estados de los modos de fallo. Cabe subrayar como la propia toma de decisiones de acciones de mantenimiento influye también de forma directa en los estados de modos de fallo, pudiendo modificarlos.

En la figura 5.7 se muestra el proceso de toma de decisiones, desde la monitorización pasando por los diferentes estados de los modos de fallo.

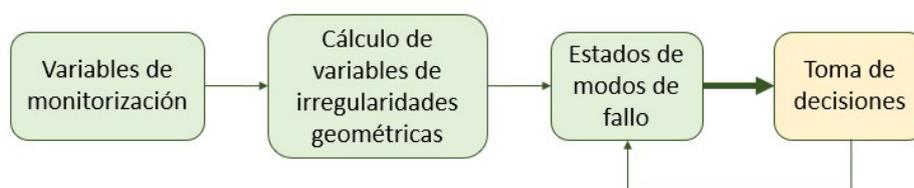


Figura 5.7 Modelado del proceso de toma de decisiones.

Es decir, una vez finalizado el proceso de monitorización, del cual se obtienen el conjunto de variables de monitorización de la tabla 5.1, se calculan las variables de descripción geométrica de la tabla 5.2.

El siguiente paso a llevar a cabo, es el procesamiento del flujo de datos que se recibe de manera repetida de la maqueta, la cual realiza medidas con una frecuencia de tiempo, pero también con una frecuencia espacial definida, debido al ser móvil el objeto de monitorización en este caso el coche que se desplaza por la vía; para ello la frecuencia espacial permite ubicar en el espacio el punto exacto donde se ha realizado la medida. Esta frecuencia tiene especial importancia en relación a la precisión de la toma de medidas, ya que al ser como hemos comentado un objeto móvil el que se encarga de la toma de medidas, y tener este además una velocidad que no es siempre exactamente constante debido a posibles acontecimientos, se utiliza esta frecuencia en un intento de dar mayor exactitud a la medida obtenida.

Al finalizar el tratamiento y análisis de la información recogida de los sensores, se habrán obtenido los ya definidos eventos, siendo el siguiente paso su traducción a nivel de riesgo. Cada evento provoca un posible cambio en el nivel de riesgo, por ello de los tipos de eventos descritos en el apartado anterior, por ejemplo los de monitorización e inspección, una vez interpretados pueden concluir con un aumento del riesgo del activo; por otro lado, los de acción de mantenimiento, indican que en un momento temporal concreto uno de los activos tiene un nivel de riesgo lo suficientemente alto como para necesitar de mantenimiento preventivo, es por ello que se lleva a cabo la acción de mantenimiento, que permitirá volver a variar el estado del activo disminuyendo su riesgo.

El modelo propuesto prevé también el tratamiento de los eventos del proceso de mantenimiento, es decir, las propias decisiones de mantenimiento; a pesar de que estas no hayan sido todavía integradas en el caso práctico que se ha centrado únicamente en la monitorización del sistema.

Según los eventos obtenidos en cada punto de control, los activos tomarán un determinado estado o nivel de riesgo. Se precisa definir por tanto las reglas de estado, es decir, a la hora de gestionar el riesgo de nuestros activos, deben estar previamente definidas las reglas a seguir por el modelo en función de las variaciones de los estados de los diferentes activos con vistas a la toma de decisiones de mantenimiento. Por ejemplo, se debe definir, cuantos modos de fallos son necesarios en amarillo para que el componente al que pertenece cambie de estado y se cambie de color; o cuantos componentes tienen que estar en amarillo para que el subsistema se ponga en amarillo y así sucesivamente.

Estas reglas de estado son bastante comunes en la literatura, mediante una diferenciación

de estados de los activos por colores tal y como se puede observar en la figura 5.8, el cual representa un ejemplo gráfico [33] de solución de monitorización de activos digitales.

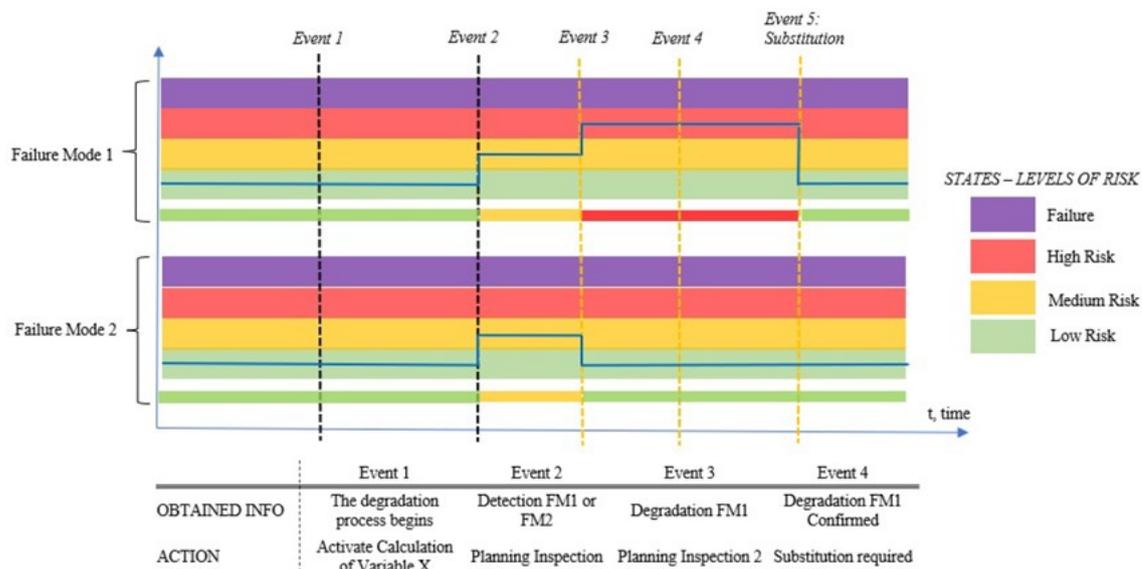


Figura 5.8 Ejemplo visualización cambios de estado.

Este ejemplo muestra cómo se llevan a cabo una serie de eventos tanto de monitorización como pueden ser los eventos 1 y 2; como eventos de acción de mantenimiento como es el evento 3 que consiste en una inspección de la tarea, o el evento 4 que implica la propia ejecución de mantenimiento preventivo sobre el activo.

Se puede observar como la figura representa de forma paralela los efectos de dichos eventos en dos modos de fallos distintos, con el objetivo de justificar la posibilidad de un único evento de afectar a más de un modo de fallo, provocando además diferentes posibles consecuencias.

Volviendo a la definición de riesgo, la cual era igual a probabilidad por consecuencia, en este gráfico de colores únicamente se mide la probabilidad. Es decir, el estudio del activo comienza en perfectas condiciones siendo su estado verde, y conforme ocurren eventos va variando la probabilidad del nivel de riesgo que pueda tener dicho activo, y con el color de su estado. Una vez que se ha producido un evento y se ha asignado el nuevo nivel de riesgo, tratamos de mitigar o reducir el riesgo mediante diversas acciones. Estas acciones son el resultado del subproceso de toma de decisiones asociado a cada nivel de riesgo. Las variaciones de estado y la gestión del riesgo están ligados a las tareas de mantenimiento.

5.4 Implementación de la arquitectura sobre la tecnología Azure

Una vez expuesto los conceptos y la utilidad de cada uno de los elementos Azure en el apartado anterior, y realizada la descripción detallada del caso de uso a implementar, se procede con la implementación de la arquitectura.

5.4.1 Ubicación elementos Azure en la arquitectura

Para comenzar con la implementación, se lleva a cabo una recopilación de las relaciones de los elementos Azure definidos, con los elementos de la arquitectura propuesta, la cual se muestra en la siguiente Tabla 5.4.

Tabla 5.4 Relación elementos arquitectura propuesta y elementos Azure.

Capa	Elemento	Elemento Azure
<i>User Interaction</i>	User Interface and Control	Power BI
Twin Management	Digital Service Management Digital Process Management DT SoS., DT Sys., DT Subsys., DT Comp	Azure Digital Twins
<i>Model Management</i>	Model Repository Model Management Ontologies	Azure Machine Learning Azure Machine Learning + Azure Cosmos DB Azure Cosmos DB
<i>Data Ingestion and Processing</i>	Data Repository Metadata Repository Adapters	Azure Data Lake Azure Data Lake + Azure Data Explorer CRDU + Azure IoT Edge + Stream Processing + IoT Central
<i>Asset/context sensorisation</i>	Sensorisation layer	CRDU + Azure IoT Edge + Stream Processing + IoT Central
<i>Physical entities</i>	Sos., Sys., Subsys., Comp.	

En la figura 5.9 se incluye una imagen de la arquitectura propuesta junto con los elementos Azure asociados a cada entidad ubicados según con qué elementos están relacionados cada uno de ellos, según lo expuesto en la tabla 5.4.

Se considera importante subrayar como la figura 5.9 discrepa de la figura 3.8 en la disposición de la capa de entidad física en la arquitectura propuesta. En esta última figura se decide ubicar dicha capa en el eje vertical, con la finalidad de representar de una forma más evidente como estas entidades están interconectadas con todas y cada una de las capas de la arquitectura. Se observa además como la relación puede no ser la misma con todas las capas, se muestra así como tendrá un mayor flujo de información con las capas de *Twin Management* y *Data Ingestion & Processing*, como muestra el grosor de las flechas que

relacionan la capa de entidades físicas con el resto de capas. Cabe destacar también como alguna de estas relaciones será bidireccional como será el caso de los gemelos digitales en la capa de *Twin Management* y la de *Model Management*.

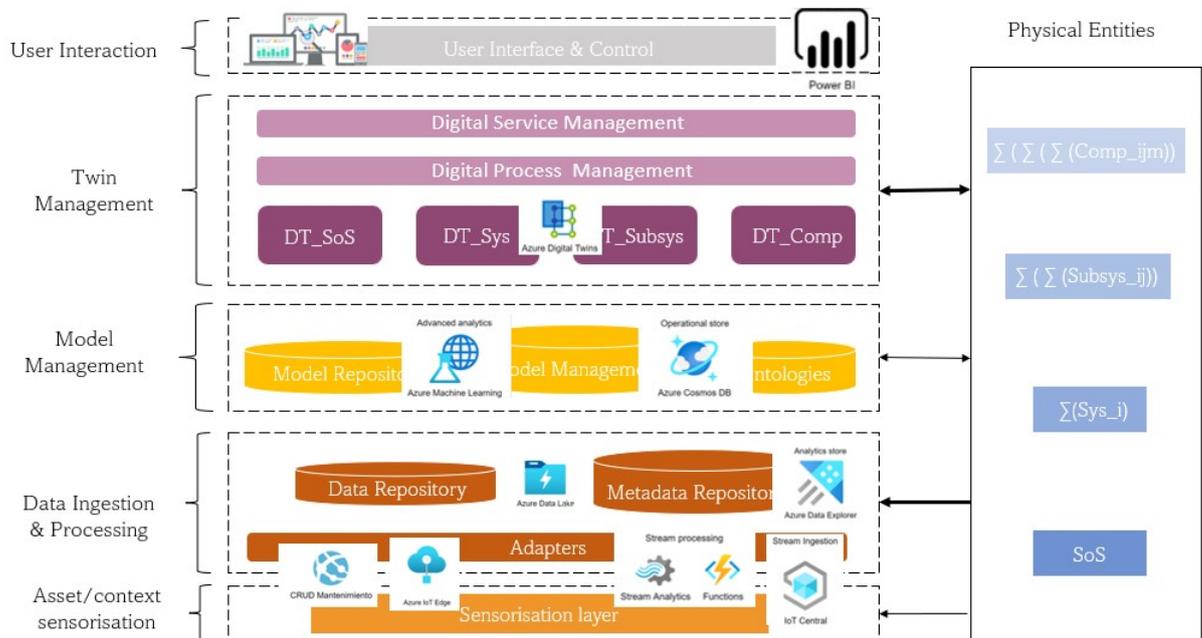


Figura 5.9 Arquitectura propuesta y elementos Azure.

5.4.2 Distribución de la arquitectura en la nube

Partiendo de la figura 5.9, en la que se muestra la estructura interna, y la ubicación de los distintos elementos de la tecnología Azure en ella, se procede por último a llevar a cabo un paso más. Este avance consiste en la ubicación de dichos elementos en la nube de datos donde se almacenarán toda la información del modelo; además de la descripción de dicho proceso de recogida e interpretación de los datos.

En primer lugar, se realiza una revisión de la arquitectura propuesta, a pesar de haber sido ya descrita en la sección anterior, en este apartado se enfoca al caso práctico de la vía, focalizada en la gestión del riesgo y el mantenimiento; además se describe de forma detallada el proceso que realiza el modelo a través de la arquitectura desde la obtención de datos hasta la toma de decisiones de mantenimiento.

El proceso comienza con la obtención de datos, a través de los sistemas de sensorización y monitorización embarcada del coche, ubicados en la capa de sensorización del contexto; dicha información entrará a través del *Azure IoT Edge* al *IoT Central*, siendo este el foco de

la conectividad entre las entradas o fuentes de información externas, y el propio sistema. Todo este flujo de información se almacena en el bloque de Ingesta donde se encuentra el *Stream Processing*, el cual se entiende como la aplicación de procesado inicial o tecnología que permitirá la creación de las funciones lógicas necesarias para cambiar los estados del activo. Las funciones que se crean aquí pueden ser de dos tipos: funciones para crear eventos o establecer indicadores, o funciones para la interpretación de los eventos. Una vez analizados los eventos, la información obtenida se almacena en el *Azure Data Lake* y el *Azure Cosmos DB*, ubicado en la *Data Base (DB)* o base de datos de la nube tal y como se puede observar en la figura 5.10. Tanto el procesamiento de la información como su almacenamiento se localiza completamente en la capa de Ingesta y Procesamiento de datos, ubicada inmediatamente por encima de la capa de sensorización.

Además de las medidas tomadas de la monitorización embarcada, existen también otras posibles entradas de información como puede ser el *CRUD Mantenimiento* el cual recoge datos de distintos sistemas de gestión como el CMMS (Sistema de gestión de mantenimiento computarizado), los cuales serán procesados hasta llegar a la base de datos a través de la base de datos relacional *Azure Cosmos DB*.

Para toda la información almacenada en la base de datos, existe la posibilidad de un segundo procesado de la información si resulta necesario al no ser suficiente el primer procesado llevado a cabo por el *Stream Processing*, por medio del *Analytics Store*.

Como ya se ha comentado con anterioridad, la cantidad de datos que se obtienen de la toma de medidas es extensa, siendo necesaria su filtración para una mejor gestión de la información de cara a la toma de decisiones. Es por ello que aparece la necesidad de decisión de la persistencia de datos, es decir, se deben decidir qué datos son los que van a persistir y se van a guardar en la base de datos correspondiente para su posterior uso, y cuales no son necesarios o de utilidad y no serán guardados de forma indefinida en base de datos del modelo.

A partir de toda la información almacenada, la base de datos se conecta por un lado con la interfaz de control, ubicada en la capa de interacción del usuario, a través del *Power BI*, permitiendo el acceso del usuario al sistema mediante la visualización e interacción con los datos; pero también con el bloque de gemelos digitales, compuesto por el conjunto de gemelos desde los de las entidades físicas, hasta los de servicios y procesos, mediante *Azure Machine Learning*, con el fin de facilitar el acceso a la información de los modelos de activos para su uso en su función. El manejo de dichos gemelos digitales con la información almacenada se ubica en la capa de gestión de modelos, mientras que el almacenamiento de las versiones anteriores de todos estos modelos se encasilla en la capa de gestión de modelos.

Se estima preciso subrayar cómo el proceso descrito recorre la arquitectura al completo desde su capa más baja hasta la capa más alta, la cual se encarga de la propia interacción con el usuario; teniendo además un contacto en paralelo de todas las capas en todo momento con las entidades físicas.

En la figura 5.10 se pueden observar las relaciones descritas entre los distintos elementos internos y la tecnología Azure utilizada.

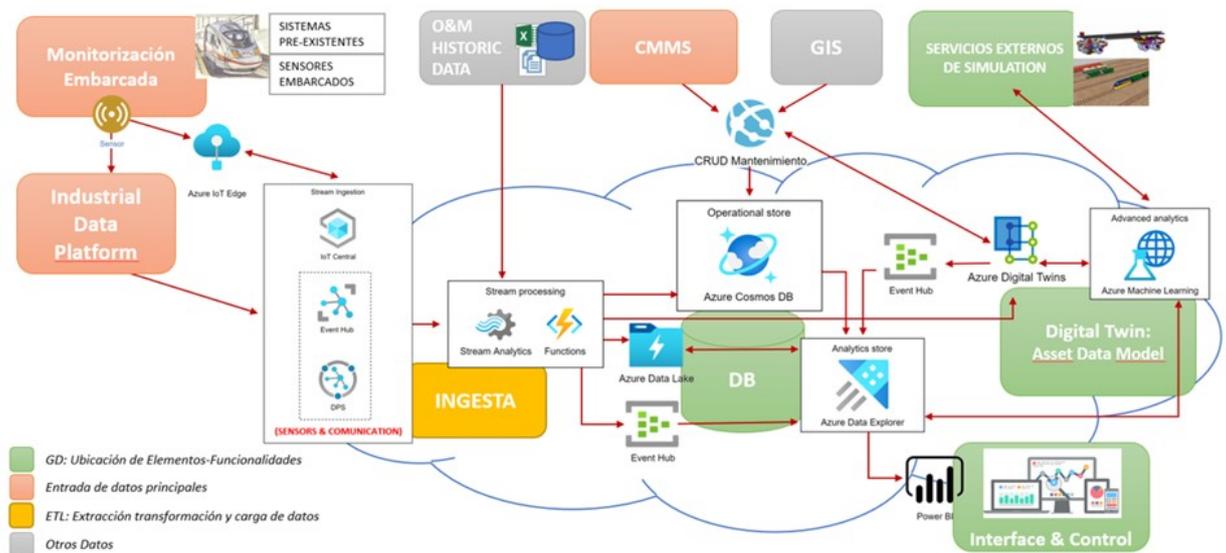


Figura 5.10 Ubicación de los elementos Azure en la nube.

El proceso descrito y representado en la figura 5.10 consiste en la generalización detallada del transcurso de la información desde su entrada hasta su procesado y uso en los gemelos digitales. Dicho proceso detallado se puede simplificar de la siguiente forma: en primer lugar, se produce la obtención de datos, los cuales deberán pasar por un primer procesado, para la creación de las funciones necesarias. Una vez procesadas la información y funciones se almacenarán en la base de datos, sin embargo, algunas pueden necesitar un segundo procesado antes de ser almacenadas. El conjunto de información obtenida de la monitorización procesada, y la obtenida por otras fuentes como sistemas de gestión, almacenada en la base de datos, será accesible para el usuario a través de la interfaz o los propios gemelos digitales.

En la figura 5.11, se representa el proceso descrito de una forma simplificada con el objetivo de facilitar el entendimiento del camino que lleva la información una vez entra en el sistema.

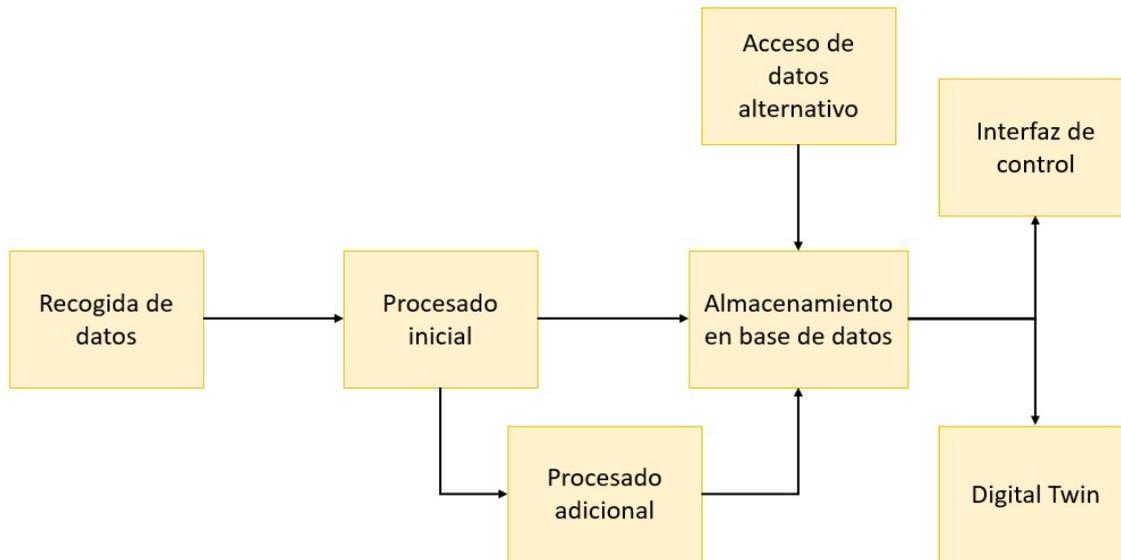


Figura 5.11 Proceso simplificado del transcurso de la información en la nube.

Además, esta simplificación permite visualizar las distintas etapas del proceso, facilitando así el montaje de la nube para su implementación el cual debe realizarse de forma faseada, al estar estas etapas interconectadas y necesitar de las anteriores para continuar el flujo de información y facilitar además el propio proceso de especificación para casos de estudio concretos.

Por último, una vez diseñada la arquitectura y definida la ubicación de cada uno de sus elementos en la nube IoT, el siguiente paso será la configuración de la propuesta en la plataforma y su respectiva validación operativa mediante la realización de los ensayos oportunos con el caso de uso.

6 Conclusiones

El principal problema que lleva al estudio realizado en este proyecto es la ausencia de una solución completa definida que facilite la digitalización de los activos de las empresas, y la posterior gestión de dichos activos digitales, en especial durante la fase de mantenimiento.

Son muchos los modelos de activos digitales que aparecen en la literatura, lo cual lleva a plantear la presencia de numerosos estudios, ante la falta de referencias generalizadas. En este estudio se han analizado en concreto seis de estos modelos entre los que se encuentran BIM, AIM o DT. En todos ellos aparecen una serie de elementos comunes, que constituyen los principales a abordar a la hora de plantear un modelo de este tipo; sin embargo, difieren en su gran mayoría a la hora de definir e implementar dichos elementos, dificultando la aparición de alguna referencia común.

En primer lugar, se puede concluir cómo se han cubierto los resultados expuestos en la introducción de este trabajo, además ratificar el problema industrial planteado. Tras la realización del estado del arte, y el análisis de las distintas referencias expuestas, se ha propuesto un modelado completo basado en la estructura del gemelo digital, que evolucione a lo largo del ciclo de vida completo, y englobe además cada uno de los principales aspectos existentes en la industria 4.0.

Este trabajo decide enfocar su estudio en la elaboración y desarrollo de una propuesta de arquitectura de referencia, como parte de la solución completa que se sugiere, debido a la complejidad del modelado, superior a las competencias que tiene este trabajo. Además el desarrollo de la arquitectura permite entender los elementos básicos que conforman estas soluciones y como se relacionan entre ellos.

Uno de los principales obstáculos a las que se enfrenta este estudio aparece a la hora de buscar una solución de visión general, frente a las numerosas propuestas específicas que proporciona la literatura, para casos muy dispares.

Esta complejidad demuestra sin embargo de forma paralela, el gran alcance que tiene este estudio al presentar una propuesta que permita su uso por cualquier empresa industrial, facilitando el proceso de toma de decisiones, en especial durante su fase de mantenimiento.

Ha sido necesario para ello además la búsqueda de una tecnología de implementación, de la cual se obtiene la misma conclusión de complejidad de la solución generalizada debido a la gran variedad de ofertas de elementos específicos que tienen estas tecnologías para usos y funcionalidades muy concretas. En este enfoque se analizan varias plataformas comerciales, y se elige finalmente la tecnología de Azure digital Twin que oferta Microsoft, al concluir como la de mayor potencial, y la que mejor se adapta a la solución que se propone. Se considera importante recalcar como llama la atención el hecho de que grandes plataformas comerciales como puedan ser Microsoft, Google o Amazon dediquen parte de sus recursos en la comercialización de este tipo de herramientas, lo que plasma la gran demanda que hay en la industria de estas tecnologías a pesar del poco desarrollo de estas soluciones.

En este punto, se dispone de una propuesta de arquitectura, que cumple los requerimientos especificados con el objetivo de hacer frente a las diferentes dificultades que aparecen con el uso de estos modelados, y su implementación en la nube; además de la exposición de un caso de uso dentro del sector del ferrocarril, de gran importancia para su justificación y prueba de conceptos necesaria para su desarrollo, al aportar una gran versatilidad de cara a la solución generalizada. Se propone por tanto, un sistema complejo que demuestre la capacidad de la propia solución propuesta para abordar de manera sencilla y simplificada diferentes casos de uso.

Cabe mencionar como el estudio de estos modelos tiene todavía mucho camino por recorrer, como consecuencia de la complejidad del problema, la magnitud de la solución que se busca y el continuo desarrollo de las tecnologías industriales; además de la gran variedad de casos de uso que pueden tener estos modelos, y las numerosas dificultades que aparecen al proponer un modelo generalizado y simplificado, en el momento de implementarlo en casos concretos. Entre las siguientes líneas futuras a seguir aparecen:

- Profundizar en la adaptación de la plataforma de Azure para la arquitectura propuesta.
- La conexión con la toma de decisiones mediante la integración del tratamiento de eventos del proceso de mantenimiento, a través de la definición de los estados de los modos de fallo y el propio modelo.
- El desarrollo de los diferentes servicios y funciones internas que puede ofrecer el modelo de activos digitales.

- La elaboración y desarrollo del modelo de datos y la librería de datos de referencia, como los componentes restantes definidos como esenciales para el modelo por la referencia del IFM [25].
- La implementación del modelado digital completo, y su prueba de conceptos en el caso de uso descrito.

Personalmente, creo que cabe subrayar por último la falta de conocimientos a nivel general en este ámbito y en relación a este tipo de tecnologías, únicamente mediante especialización; a pesar de ser herramientas esenciales hoy en día en la gestión digital de cualquier empresa, y con un seguro mayor alcance en el futuro.

Bibliografía

- [1] *Modularidad en la industria de procesos con i4.0 (parte 1)*, <https://www.infoplcn.net/plus-plus/tecnologia/item/104784-modularidad-en-la-industria-de-procesos>, 2017.
- [2] ISO/DIS 23247-2, *Automation systems and integration—digital twin framework for manufacturing—part 2: Reference architecture*.
- [3] Sailesh Abburu, AJ Berre, M Jacoby, D Roman, L Stojanovic, and Nenad Stojanovic, *Cognitive digital twins for the process industry*, Proceedings of the The Twelfth International Conference on Advanced Cognitive Technologies and Applications (COGNITIVE 2020), Nice, France, 2020, pp. 25–29.
- [4] Michael Abramovici, Jens Christian Göbel, and Hoang Bao Dang, *Semantic data management for the development and continuous reconfiguration of smart products and systems*, CIRP Annals - Manufacturing Technology **65** (2016), no. 1, 185–188 (English).
- [5] Zaid Alwan and Barry J Gledson, *Towards green building performance evaluation using asset information modelling*, Built Environment Project and Asset Management (2015).
- [6] Erhan Batuhan Arisoy, Guannan Ren, Erva Ulu, Nurcan Gecer Ulu, and Suraj Muvathy, *A data-driven approach to predict hand positions for two-hand grasps of industrial objects*, International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, vol. 50077, American Society of Mechanical Engineers, 2016, p. V01AT02A067.
- [7] Maurizio Bevilacqua, Eleonora Bottani, Filippo Emanuele Ciarapica, Francesco Costantino, Luciano Di Donato, Alessandra Ferraro, Giovanni Mazzuto, Andrea Monteriù, Giorgia Nardini, Marco Ortenzi, Massimo Paroncini, Marco Pirozzi, Mario Prist,

- Elena Quatrini, Massimo Tronci, and Giuseppe Vignali, *Digital twin reference model development to prevent operators' risk in process plants*, Sustainability (Switzerland) **12** (2020), no. 3, 1–17.
- [8] BSI, *PAS 1192-3:2014 Specification for information management for the operational phase of assets using building information modelling*, BSI Standards Publication **1** (2014), no. March, 1–44.
- [9] Arquimedes Canedo, *Industrial iot lifecycle via digital twins*, Proceedings of the Eleventh IEEE/ACM/IFIP International Conference on Hardware/Software Codesign and System Synthesis, 2016, pp. 1–1.
- [10] Salvatore Cavalieri and Marco Giuseppe Salafia, *Asset administration shell for plc representation based on iec 61131–3*, IEEE Access **8** (2020), 142606–142621.
- [11] Clarcat, *Comparativa: Amazon web services (aws) vs. microsoft azure vs. google cloud platform*, <https://www.clarcat.com/comparativa-aws-vs-microsoft-azure-vs-google-cloud-platform/>, 2021.
- [12] International Electrotechnical Commission et al., *Iec pas 63088: 2017. smart manufacturing—reference architecture model industry 4.0 (rami4.0)*, IEC, Genf (2017), 1–35.
- [13] CTN 41/SC 13, *Organización y digitalización de la información en obras de edificación e ingeniería civil que utilizan BIM. Gestión de la información al utilizar BIM. Parte 1: Conceptos y principios. (UNE-EN ISO 19650-1:2018)*, (2020).
- [14] Leedeo engineering, *El mantenimiento ferroviario y la gestión de riesgos*, <https://www.leedeo.es/l/mantenimiento-ferroviario/>, 2021.
- [15] Asier Erguido, Adolfo Crespo Márquez, Eduardo Castellano, Ajith Kumar Parlikad, and Juan Izquierdo, *Asset management framework and tools for facing challenges in the adoption of product-service systems*, IEEE Transactions on Engineering Management (2019).
- [16] Norma Española, *Gestión del riesgo*, (2018).
- [17] Thomas Gabor, Lenz Belzner, Marie Kiermeier, Michael Till Beck, and Alexander Neitz, *A simulation-based architecture for smart cyber-physical systems*, 2016 IEEE international conference on autonomic computing (ICAC), IEEE, 2016, pp. 374–379.

- [18] Elizaveta Gavrikova, Irina Volkova, and Yegor Burda, *Implementing asset data management in power companies*, International Journal of Quality and Reliability Management (2021).
- [19] Google, *Compara los servicios de aws y azure con google cloud*, <https://cloud.google.com/free/docs/aws-azure-gcp-service-comparison>.
- [20] Georgij Grinshpun, Torben Cichon, Dipika Dipika, and Juergen Rossmann, *From virtual testbeds to real lightweight robots: Development and deployment of control algorithms for soft robots, with particular reference to*, Proceedings of ISR 2016: 47st International Symposium on Robotics, VDE, 2016, pp. 1–7.
- [21] Antonio Jesús Guillén López, *Diseño de soluciones avanzadas de cbm/phm en sistemas inteligentes de gestión de activos.*, (2018).
- [22] Martin Hankel and Bosch Rexroth, *The reference architectural model industrie 4.0 (rami 4.0)*, ZVEI **2** (2015), no. 2, 4–9.
- [23] James Heaton and Ajith K Parlikad, *Asset information model to support the adoption of a digital twin: West cambridge case study*, IFAC-PapersOnLine **53** (2020), no. 3, 366–371.
- [24] James Heaton, Ajith Kumar Parlikad, and Jennifer Schooling, *Design and development of bim models to support operations and maintenance*, Computers in industry **111** (2019), 172–186.
- [25] James Hetherington and Matthew West, *The pathway towards an Information Management Framework*, (2020).
- [26] Une-en Iso, Extracto Del, and Documento Une-en Iso, *Norma Española Manual de entrega de la información Parte 1 : Metodología y formato*, (2018).
- [27] ISO/PC 251, *Asset management - Overview, principles and terminology (ISO 55000:2015)*, (2014).
- [28] Sergey Konstantinov, Fadi Assad, Wajid Azam, Daniel Vera, Bilal Ahmad, and Robert Harrison, *Developing web-based digital twin for industrial cyber-physical systems*.
- [29] M López, C Parra, and A Crespo, *La gestión de activos y la pas 55". xiii congreso de confiabilidad, primera edición, asociación española para la calidad*, Tech. report, M-45074-2011, 2011.

- [30] Qiuchen Lu, Xiang Xie, James Heaton, Ajith Kumar Parlikad, and Jennifer Schooling, *From bim towards digital twin: strategy and future development for smart asset management*, International Workshop on Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing, Springer, 2019, pp. 392–404.
- [31] Somayeh Malakuti, Pieter van Schalkwyk, Birgit Boss, Chellury Ram Sastry, Venkat Runkana, Shi-Wan Lin, Simon Rix, Garvin Green, Kilian Baechle, and Chyam Varan Nath, *Digital twins for industrial applications*, IIC Journal of Innovation (2020), 1–19.
- [32] Adolfo Crespo Márquez, *The maintenance management framework: models and methods for complex systems maintenance*, Springer Science & Business Media, 2007.
- [33] Pablo Martínez-Galán Fernández, Antonio J. Guillén López, Adolfo Crespo Márquez, Juan Fco Gomez Fernández, and Jose Antonio Marcos, *Dynamic Risk Assessment for CBM-based adaptation of maintenance planning*, Reliability Engineering and System Safety **223** (2022).
- [34] Lasse Metso and Mirka Kans, *An ecosystem perspective on asset management information*, Management Systems in Production Engineering **25** (2017), no. 3, 150–157.
- [35] Microsoft, *Azure digital twins*, <https://azure.microsoft.com/es-es/services/digital-twins/#overview>.
- [36] ———, *Comparación de aws con los servicios de azure*, <https://docs.microsoft.com/es-es/azure/architecture/aws-professional/services>, 2022.
- [37] ———, *Comparación entre servicios de google cloud y azure*, <https://docs.microsoft.com/es-es/azure/architecture/gcp-professional/services>, 2022.
- [38] A A S Reference Modelling, *Discussion paper AAS Reference Modelling*, (2021).
- [39] Elisa Negri, Luca Fumagalli, and Marco Macchi, *A review of the roles of digital twin in cps-based production systems*, Procedia Manufacturing **11** (2017), 939–948.
- [40] Mohamed Z Ouertani, Ajith K Parlikad, and Duncan McFarlane, *Asset information management: Research challenges*, 2008 Second International Conference on Research Challenges in Information Science, IEEE, 2008, pp. 361–370.

- [41] Comisión Técnico Científica para el estudio de mejoras en el Sector Ferroviario, *Informe de la Comisión Técnico Científica para el estudio de mejoras en el Sector Ferroviario*, (2014).
- [42] Paradigma, *Aws vs azure vs gcp: todos los servicios cloud frente a frente.*, <https://www.paradigmadigital.com/dev/comparativa-servicios-cloud-aws-azure-gcp/>, 2019.
- [43] Carlos A. Parra and Adolfo Crespo, *Ingeniería de Mantenimiento y Fiabilidad Aplicada en la Gestión de Activos*, Ingeman **1** (2012).
- [44] Contributing Partners, Lead Partner, and Quality Controllers, *FIRST REPORT ON STANDARDS RELEVANT FOR DIGITAL TWINS*, (2021).
- [45] João Patacas, Nashwan Dawood, David Greenwood, and Mohamad Kassem, *Supporting building owners and facility managers in the validation and visualisation of asset information models (aim) through open standards and open technologies*, *Journal of Information Technology in Construction* **21** (2016), 434–455.
- [46] Marie Platenius-Mohr, Somayeh Malakuti, Sten Grüner, Johannes Schmitt, and Thomas Goldschmidt, *File-and api-based interoperability of digital twins by model transformation: An iiot case study using asset administration shell*, *Future Generation Computer Systems* **113** (2020), 94–105.
- [47] Azzam Raslan, Georgios Kapogiannis, Ali Cheshmehzangi, Walid Tizani, and Dave Towey, *A framework for assembling asset information models (aims) through permissioned blockchain*, 2020 IEEE 44th Annual Computers, Software, and Applications Conference (COMPSAC), IEEE, 2020, pp. 529–534.
- [48] R Rosen, G Von Wichert, G Lo, and KD Bettenhausen, *About the importance of autonomy and digital twins for the future of manufacturing*. *ifac-papersonline* **48** (3): 567–572, 15th ifac symposium on information control problems in manufacturing, 2015.
- [49] Michael Schluse and Juergen Rossmann, *From simulation to experimentable digital twins: Simulation-based development and operation of complex technical systems*, 2016 IEEE International Symposium on Systems Engineering (ISSE), IEEE, 2016, pp. 1–6.
- [50] Greyce N. Schroeder, Charles Steinmetz, Carlos Eduardo Pereira, and Danúbia Bueno Espíndola, *Digital twin data modeling with automationml and a communication methodology for data exchange*, *IFAC-PapersOnLine* **49** (2016), 12–17.

- [51] Karsten Schweichhart, *Reference architectural model industrie 4.0 (rami 4.0)*, An Introduction. Available online: <https://www.plattform-i40.de> I 40 (2016).
- [52] Guodong Shao et al., *Use case scenarios for digital twin implementation based on iso 23247*, National Institute of Standards: Gaithersburg, MD, USA (2021).
- [53] TC 184/SC 4, *Automation systems and integration. Digital twin framework for manufacturing . Part 1: Overview and general principles. (UNE-EN ISO 23247-1:2021)*, (2021).
- [54] The British Standards Institution, *Specification for information management for the capital/delivery phase of construction projects using building information modelling: PAS 1192-2:2013*, BSI Standards Publication (2013), no. 1, 1–68.
- [55] UNE EN, *Terminología del mantenimiento*, AeUNE. (2018). Terminología del mantenimiento. Aenor, 31. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0026303nor> (2018), 30.
- [56] Ferrocarrils de la Generalitat Valenciana, *Manual BIM Metodología Ferrocarrils de la Generalitat Valenciana*, 2.
- [57] Constantin Wagner, Julian Grothoff, Ulrich Epple, Rainer Drath, Somayeh Malakuti, Sten Grüner, Michael Hoffmeister, and Patrick Zimmermann, *The role of the industry 4.0 asset administration shell and the digital twin during the life cycle of a plant*, 2017 22nd IEEE international conference on emerging technologies and factory automation (ETFFA), IEEE, 2017, pp. 1–8.
- [58] Xun Ye and Seung Ho Hong, *Toward industry 4.0 components: Insights into and implementation of asset administration shells*, IEEE Industrial Electronics Magazine 13 (2019), no. 1, 13–25.
- [59] Xiaochen Zheng, Jinzhi Lu, and Dimitris Kiritsis, *The emergence of cognitive digital twin: vision, challenges and opportunities*, International Journal of Production Research (2021), 1–23.

Paper Congreso

1 Review of asset digitalization models in the context of intelligent asset management and maintenance.

Abstrac

Assets digitalization is currently one of the main challenges of industrial companies in order to finally get access to Industry 4.0 promises. Over the years industry and academia have been envolved on the development of numerous references such as BIM, AIM, AAS or a great variety of DT approaches among others, with the objective of managing data and giving support to organize the use of tools allowing to improve the intelligence of the asset management and maintenance. The study of these models, the fundamental elements they handle and the application framework that each of them proposes, gives a clear idea about the complexity of the common problem that, from different approaches, these models address. At the same time, it is clear the current need to standardize the way in which assets are defined and managed in the digital world. Not only from the point of view of an isolated asset, but also establishing the basis for the interaction of different digitalized assets in complex systemic environments and management levels of greater scope. The real thing is digitalization is changing the nature of own assets, and developing methods and strategies for modeling assets, including asset data model and architecture model consideration, is a must for developing and exploiting more complex digitalization solutions. The aim of this paper is to carry out a review on the state of art of digital asset modeling approaches, analysing the description and fundamental elements considered by each of them, as well as their differences and similarities.

1.1 Introduction

Digital transformation has a particular impact on asset maintenance and management. This is due to the increased availability of data/information/knowledge about asset condition and performance and the increased possibilities for management and risk control, in real time and throughout the lifetime of the assets. Despite the availability of large amounts of data, the reality today is that asset management and intelligent maintenance are often reduced, in most cases, to very particular and short-range applications. However, most of the key decisions still have a very low level of digitization and are not made based on the available data and information.

Modern asset management and maintenance must necessarily be data-driven and digitized. This will require an appropriate digital asset model, which structures and organizes all available data, information and knowledge of the asset(s) to support maintenance decisions, allowing these to be conveniently digitized. The fundamental idea of this approach is that in a context of high level of digitization the information model of an asset has to be part of the asset itself. The data and information needed to make decisions at any point in its life cycle must be designed as a part of the asset itself. And not just any part, but one of the most critical. This is not the case today, where: there is no single vision of the digital asset but applications and/or partial models that try to take advantage of the available data, so that on the basis of a system or physical asset to be managed, isolated and partial technological solutions with a low level of interaction are superimposed. They provide data on the asset that often have no practical use or that the organization is not able to interpret. The integration of different systems or technologies ends up being very complex and involves high costs and high consumption of hours of qualified personnel.

This asset digitization model involves a certain complexity in its conception and management. Giving it an entity involves simultaneously managing aspects ranging from the configuration of IoT/Cloud platforms, development of analytical and simulation models, database models and ontologies, etc., to complex functional analysis and maintenance techniques. Defining the digital asset means defining its data model but also the software/hardware architecture and the processes that run through this architecture to feed and bring to life this data model.

In this sense, a great research effort is being made to generate more integrated solutions that can take advantage of asset data. The ones linked to the development of digital twins stand out for their number and long history over the years. In recent years, the number of digital twin references has only increased [39] [7][3]. However, it is still a broad concept and therefore lacks concreteness, which is used in the most diverse ways depending on the approach or the specific industrial problem to which it is applied.

For this reason, there is now a consensus in the scientific community and in industry that the very extension of digital twins requires an effort to standardize and generalize models and methods. And not only, or mainly, to support the design of solutions that can have a good performance working in isolation, but contemplating the possibility that the twins can interact with each other as fundamental elements of complex engineering systems. Regarding the standardization and generalization effort, several international institutional initiatives such as ISO 23247 [52] or RAMI 4.0 [22] that seek to standardise this issue to facilitate the level of interaction and interconnection of complex systems in this new stage of digitisation in which the industry finds itself. The British IMF initiative [25], set out a philosophy focused on the creation of models that allow a complete integration of data and information, beyond a simple exchange, which supports decision-making with regard to the development, operation, maintenance and use of infrastructures and services; and stressing the importance of their standardisation.

In any case, the reality is that there are currently many initiatives that can be used as a basis for proposing an advance in the digitization of assets. This paper aims to review the main ones, comparing them and establishing basic conclusions for new research initiatives in the field of maintenance and asset management.

1.2 Review of references related to digital asset modelling

The following section will focus on the study of the main references and most widely used asset models that can be found in the industry today; their most essential characteristics will be analysed, as well as the main difficulties or problems faced by each of these proposals.

Driven to meet the needs demanded by industry, these references differ according to the sector or life cycle phase for which they are found, but always seeking to provide quality information that facilitates subsequent decision-making.

Building Information Model (BIM)

The Building Information Model, known by its abbreviation as BIM model, is one of the most widely used models in the industry, especially in the construction sector, as it is especially focused on the design and construction phases of assets, in this case buildings. It is also one of the most standardised models in the industry. The standard ISO 19650-1 [13] define BIM model as: "use of a shared digital representation of a built asset to facilitate the design, construction and operation processes, and provide a reliable basis for decision making".

For this type of model [56] proposes a structuring through the generation of sub-models following two different approaches, as shown in Figure 1. On the one hand, it proposes the need to create different models according to the specific phase of the life cycle in

which the asset is located. These models, which [56] defines as a three-dimensional digital representation of a constructive intention, could be called life cycle evolution models, among which we could find: existing infrastructure models, construction project model, construction tender model or maintenance model; all of them should be classified into the three main stages of the life cycle: Beginning of life (BOL), Middle of life (MOL) and End of life (EOL)

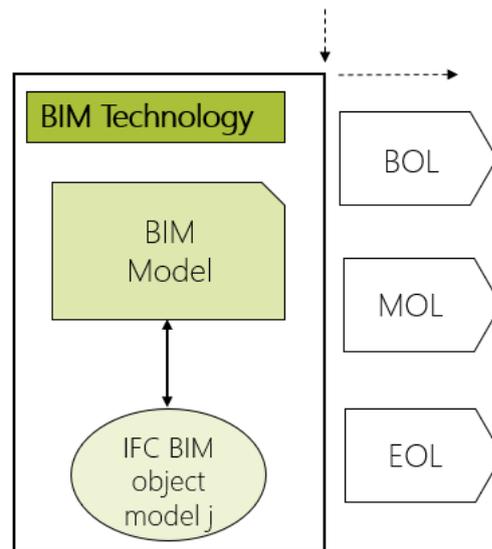


Figura 1 BIM model structure.

On the other hand, both [56] and [24] coincide in the proposal to create IFC language models to carry out a structuring or division of the asset into objects or elements according to the parent-child relationships between them, which will be associated with a particular class for better management, facilitating the exchange of information.

Finally, there are many references ([56], [24], [45]) that propose the development within BIM technology of a data extraction platform, from which to carry out the development of diagrams, for the creation of a database that can store the information exported from the BIM model. The exported databases are used for their incorporation in management systems (e.g., CMMS); however, there are many occasions in which there are limitations in the integration of the information with these asset management systems.

Asset Information Model (AIM)

The asset information model is defined among other references by [45] as "Data model that contains all digital data (graphical, non-graphical, and documentary) required to operate an asset or portfolio of assets". This model focuses on the management of quality information, and the available access and visualisation of such information, mainly during the operation phase.

The literature [24] [45] proposes its decomposition mainly into two components, which are shown in Figure 2 below. Firstly, it presents an electronic document management system (EDMS), secondly, it entails a data and information store of the asset itself; both parts are encompassed in a common data environment (CDE). This environment sometimes leads to problems of information integration, due to the lack of integration of the systems, whose data are not always compatible in type, format or quantity with the rest of the systems or with AIM itself.

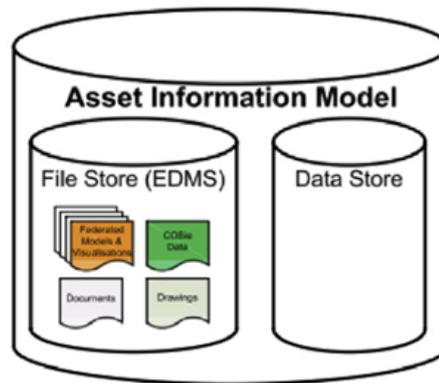


Figura 2 AIM model structure [24].

As stated by many authors, such as [47] or [45] the Asset Information Model uses a technology based on BIM and, like this model, proposes a data export system through a database. This is why both models are usually combined, for the optimal management of the information obtained and extracted through the BIM model, introducing it into the AIM data warehouse for its management. This combination does not always optimise the process, as there are often interoperability limitations within the CDE itself, as mentioned above, due to the incompatibility of the data extracted with the AIM management system.

To this end [23] the concept of federated model appears, understood as the composition or relationship of different models, such as IFC models or databases, which allow the integration of the asset's information and its complete visualisation.

Digital Twin (DT)

This model is defined by [7] as "A digital model of a given physical element or process with data connections that allow convergence between physical and virtual states at an appropriate rate of synchronisation". In other words, it involves a digital and dynamic representation of an asset, process or system, mimicking its actual behaviour.

It is understood as a model based on the advanced use of data, as set out by [31], thus helping to solve the problem of information silos. A digital twin will collect data centrally for each entity, and then make that information available through integration interfaces.

For this model [31] proposes within the scientific literature a hierarchy of integration of discrete digital twins, i.e. single entity models, understood as base elements that cannot be broken down further, into composite digital twins, as a combination of discrete digital twins. These in turn will be integrated as a set into a composite digital twin system. Figure 3 shows graphically the hierarchy described above.

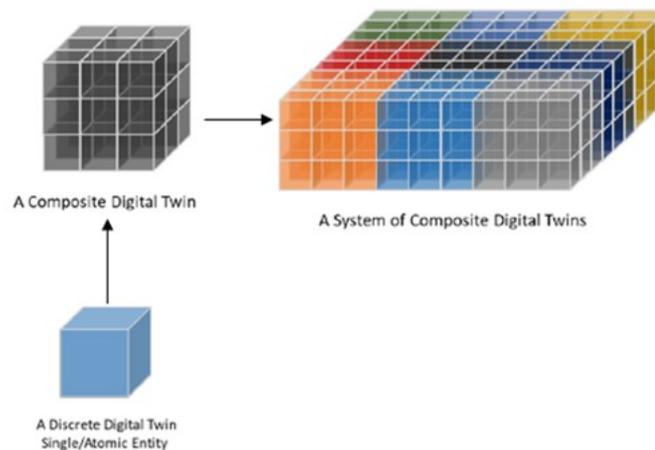


Figura 3 Digital Twin as “brick” of complex system’s digital twin [31].

Establishing relationships and connectivity between the digital twins of various entities in an automatic way is one of the main challenges facing the design of digital twins, with the aim of trying to avoid future interoperability problems between twins.

This reference also presents a division of the digital twin into three main components: data, models and services or functions [31].

- **Data:** understood as all the information necessary to represent and understand the states and behaviours of the twin in the real world.
- **Models:** we can find among others visualisation models, AR, simulation or data models; all of them necessary to allow the system to describe, understand, and predict states and behaviours of the twin.
- **Services:** which can be understood as the functions that a digital twin has with respect to the asset. There are many services that a digital twin can offer from Description, Diagnosis or Visualisation to the inclusion of interfaces for integration with other systems or digital twins that can access the data and results of the model itself.

However, despite being one of the most entrenched, this is only one of the many visions that can be found, as the Digital Twin is one of the models with the most different visions in the literature today as shown by E. Negri[39].

RAMI 4.0 and Asset Administration Shell (AAS)

The Asset Administration Shell or AAS model is known as the interoperability basis of RAMI 4.0 and arises from the need to transform information into other formats due to the lack of interoperability of DT between organisations and industrial systems.

RAMI 4.0 is a [22] service-oriented reference architecture, driven by the Plattform Industrie 4.0, consisting of a three-dimensional map that encompasses what are considered to be the fundamental concepts of Industry 4.0; the full lifecycle, the hierarchy and the model architecture. Figure 4 shows the three dimensions that compose the structure RAMI 4.0, as specified by the standard IEC/PAS 63088.

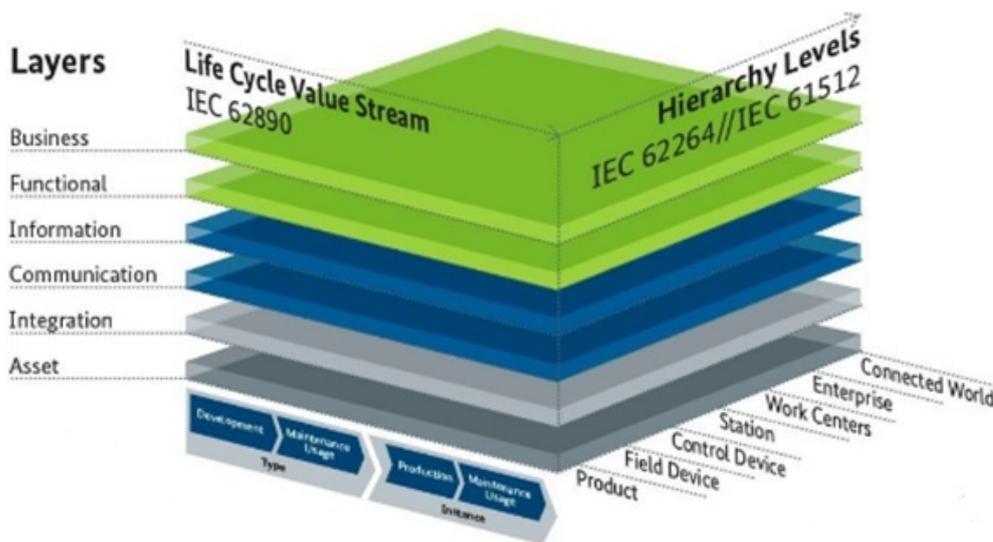


Figure 4 RAMI 4.0 dimensions [51].

The AAS is therefore defined as "Digital representation of a relevant asset, providing an interface to an Industry 4.0 network that enables connection to the physical element, and communication with other assets, as well as information exchange" [10]. Its main objective is to provide information about an asset throughout its life cycle, in other words, it could be understood as a data and information storage record of a specific asset. Each asset must have its own AAS associated with it. This is why they have two identifiers, one for the specific asset, meaning for the physical location of the model; and a second identifier for the Asset Administration Shell, as the digital constituent of the model.

The literature ([57], [46], [10]) proposes the AAS model as a metamodel based on a class diagram, with the aim of structuring and simplifying the representation of asset information. This metamodel sets out a hierarchical structure so that an AAS is composed of submodels, and each of them in turn by submodel elements, such as those data, properties or functions understood as entities that cannot be further decomposed, but that are at the base of the asset structure. Figure 5 shows an example of the AAS of a particular asset [57].

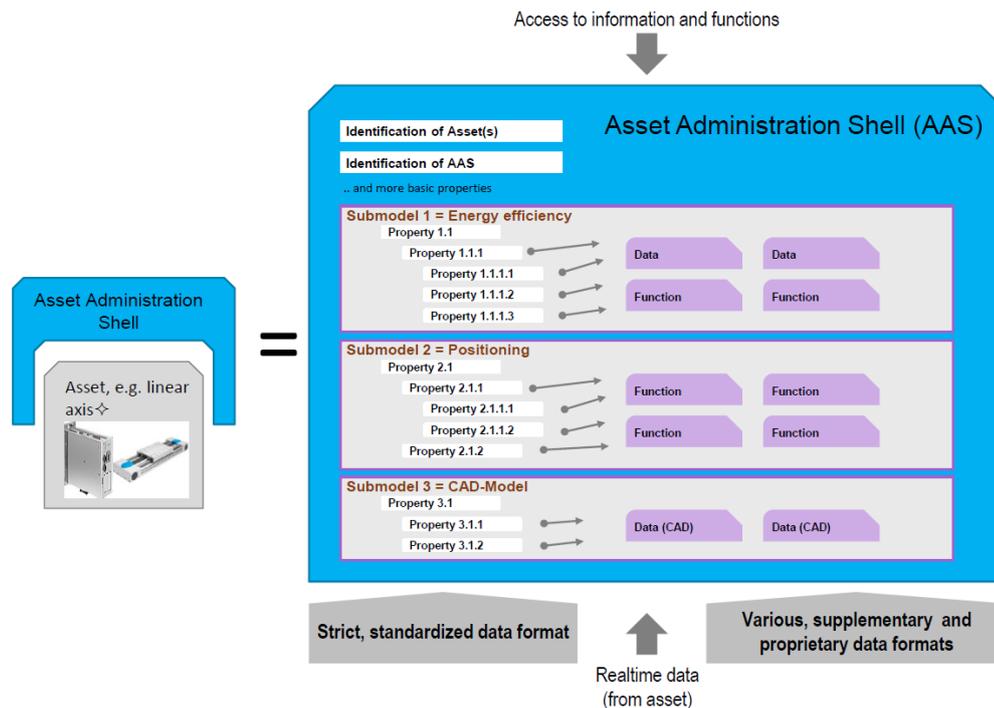


Figura 5 AAS architecture [57].

Cognitive Digital Twin (CDT)

The concept of Cognitive Digital Twin (CDT) arises as an evolution of what we know as a traditional Digital Twin, towards a more intelligent, integral and full life cycle representation of complex systems [59] [3]. This evolution is carried out through the development of certain capabilities such as the ability to evolve the digital twin throughout the life cycle of the asset, in addition to a greater capacity for cognition and autonomy with respect to the traditional DT.

Kiritsis [59], proposes a structure composed mainly of three dimensions, following a similar structure to the RAMI 4.0 already mentioned, so that it covers the main aspects of Industry 4.0. These dimensions would be: full life cycle, system hierarchy levels and internal or digital functional layers.

- Full lifecycle phases: dimension focuses on full lifecycle management. Throughout the lifecycle of a system, numerous digital models will be created to support the different lifecycle phases: early life, mid-life and end-of-life, each of these phases may have multiple related digital models.
- System hierarchy levels: aims to specify the structure and boundaries of a CDT. For this model, a hierarchy is proposed that, starting with a system of systems as the highest level of the hierarchy, is decomposed into systems, subsystems, and components until reaching parts as the lowest level that cannot be further decomposed.

- Functional layers: This dimension specifies the different functions that a CDT can provide; the Physical Entity layer represents the system in physical space, while the other five layers represent different functions of the CDT in digital space.

Figure 6 below shows graphically what has been said about each of the dimensions of the Cognitive Digital Twin.

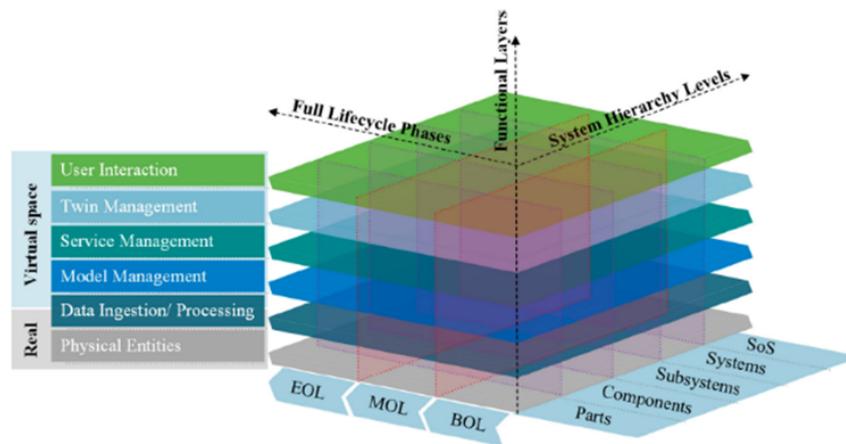


Figura 6 CDT dimensions [59].

Finally, it should be noted that the main challenges to be faced by this type of model are related to the complexity of the system itself, such as: the complexity of data representation, and the complexity involved in the process of updating the data throughout the entire life cycle of the asset; as well as problems of information interoperability.

1.3 Comparison of references

Once the different references have been analysed, a comparison is made by means of a summary table in which some of their main aspects are compared, such as the treatment of the life cycle, the way of defining the asset or the main components. This summary table is attached in Table 1 below.

Starting from the philosophy of the IMF, which stems from the proposal to create a digital twin infrastructure at the national level with the objective of providing quality information to support decision-making, the IMF proposes a concept of a globally connected system. This reference raises the need to standardise a complete system that supports the secure exchange of information, interoperability, and the integration and linking of data and models in any environment. To this end, it presents three components as the main components at the core of such a system, for which the need for standardisation arises: the data model, the reference data library and the integration architecture.

Tabla 1 Comparison of references on digital asset modelling.

Reference	Ref	Review	Lifecycle treatment	Asset Definition	IMF elements
BIM	[8] [13] [24] [54] [56]	Technical-graphical description of physical assets from classes (IFC) integrated into a complete design.	Different model for each phase	Classification of parent-child relationships	Data Library X Data Model X Architecture
AIM	[24] [15] [45] [34]	Asset quality information repository based on simplified BIM	Different model for each phase	Classification of parent-child relationships	Data Library Data Model X Architecture
DT	[31] [44] [59]	Digital representation of physical assets	Unique model generally for a single phase	Generally single asset	Others: calculation and simulation models
ISO 23247	[52] [2]	Defines a framework that provides a generic guideline, reference architecture, methods and approaches for the application of DT		Observable Manufacturing Element	Data Library Data Model Architecture X
RAMI	[1] [12] [51] [22]	Service-oriented, three-dimensional system (life cycle, hierarchy and functional layers)	Unique and evolving model	Smart product - Smart factory - Connected world	Data Library X Data Model X Architecture X
AAS	[46] [10] [57] [58] [59]	Information record that digitally represents the asset and evolves over time. It is the basic component of the RAMI for interoperability.	Unique and evolving model	Sheet for single active	Data Library Data Model X Architecture X
CDT	[59] [51] [3]	Evolution of traditional DT, forming a set of multi-asset twins interacting with each other with cognitive capabilities.	Unique and evolving model	SoS - Sys. - Subsys. - Comp. - Part	Data Library X Data Model X Architecture X

In the table it can be seen how the last column refers to the mention made by each of the references analysed to these concepts, with the aim of showing the purpose of each reference to satisfy the need for a system that allows a complete integration of data and information.

Another point that is important to review in these references is the use that each of them makes of the functions and services (or external functions) of the model itself. While some of the references do not even mention these concepts, such as AAS, AIM or BIM, given the lack of importance they give to the architecture; others, such as DT or CDT, do mention the existence of these concepts and even [59] states the need for a location in its proposed architecture for the model's services. However, none of them considers differentiating the two concepts.

Consequently, this paper proposes to follow a similar line to two of the models studied, the Digital Twin and the Digital Cognitive Twin, due to the philosophy of use of these

models, and therefore to the importance they give to the fact of carrying out an integration of information and data, beyond the simple exchange of data as any other model simpler than the DT could do, reaffirming what was stated by the IMF.

1.4 Conclusion

After carrying out the state of the art, one of the first and simplest conclusions is the great variety of models and options that users have when it comes to managing their company's assets. It is not only the variety that stands out, but also the lack of agreement in terms of basic concepts and methodologies that can be found for the same model, or the different forms of management that can be seen in the industry for the same asset.

It is also worth highlighting the lack of data and information on the implementation of any of these models during the maintenance phase of the asset; despite the fact that the vast majority of them mention that, as they are models that manage the asset throughout its life cycle, they include the maintenance phase, there is a notable lack of studies focused on this phase.

Therefore, the focus of this study is the standardisation of concepts, underlining their importance and starting the search for a reference that satisfies the main requirements of asset maintenance.

1.5 Acknowledgements

This paper has been written within the framework of the projects "Methodology for industrial application of intelligent maintenance solutions. Integration of Predictive Analytics and Machine Learning techniques in IoT platforms" (Grant CEI-19- TEP134) and "INMA, Asset Digitalization for INtelligent MAintenance" (Grant PY20 RE 014 AICIA),

Paper Publicación Científica

1 Development of a digital asset model in the context of smart maintenance 4.0

Abstrac

Over the years, numerous references have been developed in industry and scientific literature with the aim of managing asset data and information, and providing support for coordinating the use of tools to improve the management and intelligent maintenance of these assets. The study of these models, through the analysis of the fundamental elements that compose them and the application framework that each one proposes, predisposes the complexity of the common problem that these models address. At the same time, there is a current need to standardise the way assets are defined and managed in the digital world. Not only from the point of view of an isolated asset, but from a global vision establishing the bases for the interaction of different digitised assets in complex environments, allowing interoperability with the rest of the systems.

In the absence of global standards or generalised methodologies that provide simple solutions to the imminent challenge of asset management brought about by the current process of digitisation of organisations, the aim of this work consists of proposing a model for asset digitisation, based on a review of the literature, and focused mainly on the industrial maintenance phase, which allows, with a generalised approach, the connectivity and industrial 4.0 functionality of assets. For the validation and justification of the proposed solution, a proof of concepts is also proposed by means of a practical case study as an example.

