
Arquitectura para la Industria 4.0

PID_00249433

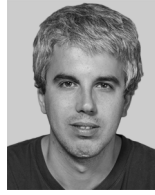
Xavier Pi Palomés
Pere Tuset Peiró

Tiempo mínimo de dedicación recomendado: 5 horas



**Xavier Pi Palomés**

Ingeniero Industrial por la Universitat Politècnica de Catalunya (1988). Desde 2004 ha sido Profesor de Ingeniería del Software en la Universitat Oberta de Catalunya, en la Facultad de Informática de la Universitat Politècnica de Catalunya y en la EUNCET, centro adscrito a esta última. Desde 2014 es miembro de la Comissió Indústria 4.0 constituida por las asociaciones profesionales de los Ingenieros en Informática, Ingenieros de Telecomunicación, Ingenieros Industriales, Ingenieros de Puentes y Caminos e Ingenieros Agrónomos. Desde 2017 es Profesor en el Máster en Industria 4.0, impartido conjuntamente con la Escuela Superior Politécnica del TecnoCampus, centro adscrito a la Universitat Pompeu Fabra.

**Pere Tuset Peiró**

Ingeniero Técnico de Telecomunicación (2007) e Ingeniero de Telecomunicación (2011), ambos por la Universitat Politècnica de Catalunya, y Doctor en Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (2015) por la Universitat Oberta de Catalunya. Desde 2016 es Profesor de los Estudios de Informática, Multimedia y Telecomunicación de la Universitat Oberta de Catalunya en el ámbito de los sistemas embebidos, las redes de computadores y los sistemas operativos. Desde 2017 es el Director Académico del Máster en Industria 4.0, impartido conjuntamente con la Escuela Superior Politécnica del TecnoCampus, centro adscrito a la Universitat Pompeu Fabra.

Primera edición: septiembre 2018
© Xavier Pi Palomés, Pere Tuset Peiró
Todos los derechos reservados
© de esta edición, FUOC, 2018
Av. Tibidabo, 39-43, 08035 Barcelona
Diseño: Manel Andreu
Realización editorial: Oberta UOC Publishing, SL

Ninguna parte de esta publicación, incluido el diseño general y la cubierta, puede ser copiada, reproducida, almacenada o transmitida de ninguna forma, ni por ningún medio, sea éste eléctrico, químico, mecánico, óptico, grabación, fotocopia, o cualquier otro, sin la previa autorización escrita de los titulares del copyright.

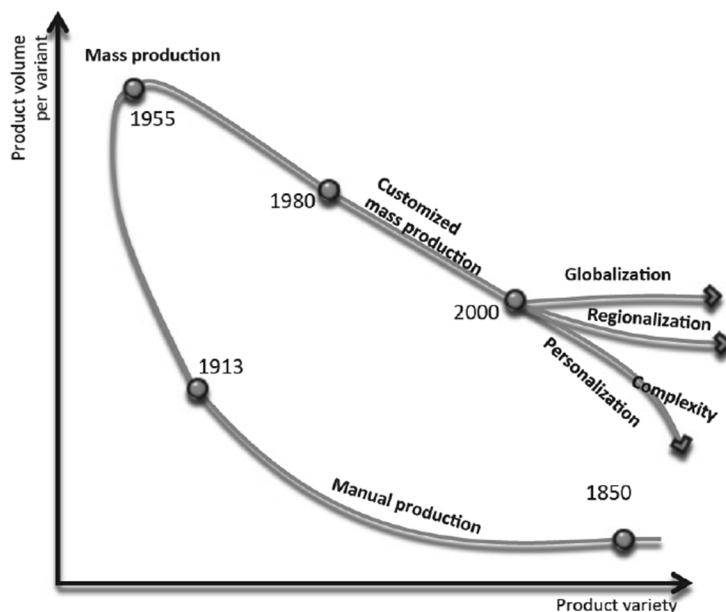
Índice

1. Hacia la Industria 4.0	5
1.1. Introducción	5
1.2. Fundamentos teóricos de la fabricación flexible	10
1.3. Definición de Industria 4.0	12
2. Arquitecturas de referencia	15
2.1. Definición de arquitectura de referencia	15
2.2. Características de una arquitectura de referencia	16
2.3. Historia y evolución de las arquitecturas de referencia	17
2.4. Situación actual	21
3. Modelo IIRA	24
3.1. Introducción	24
3.2. Origen y motivaciones	24
3.3. Arquitectura IIRA	26
3.4. Descripción funcional de IIRA	29
3.5. Marco de ciberseguridad	31
3.6. Casos de uso y <i>testbeds</i>	37
4. Modelo RAMI 4.0	39
4.1. Introducción	39
4.2. Origen y motivaciones	40
4.3. Arquitectura RAMI	42
4.4. <i>i4.0 Components</i>	44
4.4.1. <i>Administration shell</i>	44
4.4.2. El <i>manifest</i>	47
4.4.3. El <i>component manager</i>	49
4.4.4. El <i>asset</i>	49
4.4.5. <i>Virtual commissioning</i>	51
4.5. Casos de uso y <i>testbeds</i>	54
5. Integración IIRA/RAMI	55
Bibliografía	59

1. Hacia la Industria 4.0

1.1. Introducción

El diseño y la fabricación de productos han evolucionado a lo largo del tiempo gracias a la utilización de la tecnología como parte de los procesos productivos. Tal como se indica en el modelo de Boër y Dulio (Boër y Dulio, 2007), hasta mediados del siglo XIX, la fabricación de productos se llevaba a cabo de manera manual en talleres artesanales, lo que suponía una gran variedad de productos, pero con un volumen reducido de cada tipo de producto. Es decir, como se fabricaban de forma artesanal, se producían elementos del mismo tipo (por ejemplo, una mesa) pero cada elemento producido era ligeramente diferente del anterior y del siguiente.



Fuente: Boër y Dulio (2007)

Si bien esta aproximación ofrecía productos adaptados a las necesidades específicas de cada individuo, el coste de producción por unidad era muy elevado, lo que limitaba sustancialmente el mercado de clientes potenciales. Fue a partir de la invención de la máquina de vapor a mitad del siglo XVIII, y su introducción en el ámbito de la fabricación, a mediados del siglo XIX, lo que originó un cambio de tendencia en el diseño y la fabricación. Este cambio de paradigma respondía a un crecimiento exponencial de la población y una fuerte demanda de productos de primera necesidad a bajo coste, que sólo se podía satisfacer mediante la estandarización y automatización de los procesos

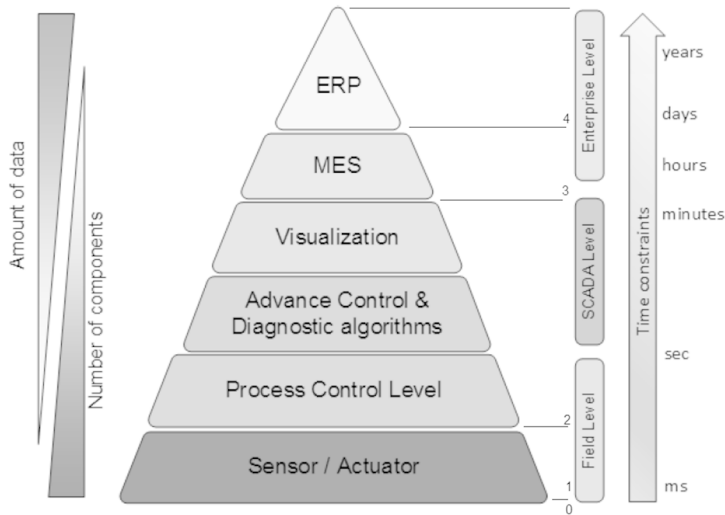
de fabricación. Como vemos en la figura de Boër y Dulio, esta tendencia supuso una reducción sustancial de la variedad de productos y un aumento de la cantidad producida de cada tipo de producto.

En esta misma dirección, la introducción de la electricidad como fuerza motriz y la aparición de los procesos de fabricación en cadena a finales del siglo XIX, aceleró este proceso de transformación de la fabricación, alcanzando su máximo exponente en torno a los años sesenta con la introducción de los primeros sistemas de control electrónicos, que permitían la automatización de procesos industriales a gran escala. Gracias a la introducción de las tecnologías de automatización en los procesos productivos se consiguió aumentar la productividad y mejorar la calidad de los productos. Pero la introducción de estas tecnologías también permitió aumentar la flexibilidad en los procesos de producción, consiguiendo así crear productos personalizados a gran escala con unos costes unitarios bajos. Esto supuso que, por primera vez desde la introducción de la máquina de vapor, se invirtiera la tendencia de reducir la variedad de productos e incrementar el volumen por cada tipo de producto.

Con el perfeccionamiento de los sistemas de fabricación basados en las tecnologías digitales, la respuesta a la demanda de productos personalizados ha ido en aumento hasta llegar al momento actual, en el que se plantean tres tendencias en función de la tipología del producto, el precio de venta objetivo y el mercado donde se comercializará. Así pues, se plantean tres tipos de productos: globalizados, regionalizados y personalizados, tal como describimos a continuación. En primer lugar, los productos globalizados contienen pequeñas variaciones en su configuración en función de la región donde se distribuyan (por ejemplo, embalaje, manuales, etc.), como es el caso de los teléfonos móviles. En segundo lugar, los productos regionalizados contienen variaciones sustanciales según sea la región donde vayan dirigidos, como es el caso del etiquetado de las botellas de una conocida marca de refrescos con los nombres más populares de cada país. Finalmente, los productos personalizados son aquellos que son fabricados de manera exclusiva para cada cliente, como es el caso de los álbumes de fotografías.

Como hemos visto, las tecnologías digitales han revolucionado el diseño y la fabricación, pero la introducción de la flexibilidad en los sistemas productivos ha supuesto un aumento de la complejidad de los mismos, lo que ha llevado a la implementación de modelos organizativos que faciliten el diseño y la gestión. En este contexto, a comienzos de los años setenta, se desarrolló la pirámide de automatización CIM (del inglés, *Computer integrated manufacturing*), que se deriva de la arquitectura de referencia propuesta en la Universidad de Purdue (Williams, 1992). Como se muestra en la imagen siguiente (Bajer, 2014), la pirámide de automatización CIM define una jerarquía representada por distintas capas que conforman un sistema de producción, de la capa del nivel inferior a la capa del nivel superior: sensores y actuadores, controladores de procesos, sistemas SCADA (del inglés, *Supervisory Control And Data Acquisition*) y HMI (del inglés, *Human-Machine Interface*), sistemas MES (del inglés,

Manufacturing Execution System) y sistemas ERP (del inglés, *Enterprise Resource Planning*). Como vemos, la escala temporal del gráfico (lado derecho) aumenta de abajo hacia arriba, y también los volúmenes de los datos (lado izquierdo). Por contra, el número de componentes de cada nivel (lado izquierdo) disminuye de abajo hacia arriba.



Fuente: Bajer (2014)

Si bien la pirámide CIM ofrece un modelo válido para la automatización de los sistemas de fabricación, la jerarquía que impone este modelo al diseño y desarrollo de los mismos –principalmente el flujo de información entre los diferentes elementos que los conforman– supone una limitación a su flexibilidad y escalabilidad. Esta limitación choca con la flexibilidad y escalabilidad de los sistemas del ámbito de las tecnologías de la información y las comunicaciones, que durante las dos últimas décadas han demostrado una evolución sin precedentes y han sido el motor de la sociedad del conocimiento, con su máximo exponente en Internet y los servicios que se ofrecen mediante esta red.

Con el objetivo de aumentar la flexibilidad y la escalabilidad de los sistemas de automatización industrial, en el MIT (Massachusetts Institute of Technology) nace el discurso de una nueva revolución industrial a mediados de la primera década de los 2000, justo después del boom de las empresas puntocom. Este discurso se basa en utilizar la informática y las comunicaciones para conseguir esta flexibilidad, y sus bases teóricas se recogen en la obra *Fab: The Coming Revolution On Your Desktop – From Personal Computers to Personal Fabrication* (Gershendfeld, 2005) publicada en 2005 por Neil Gershendfeld, director del Center of Bits and Atoms del MIT. En un ejercicio de teorización sobre los sistemas productivos del futuro, la máquina Replicator de la obra de ciencia ficción *Star Trek* representa la utopía de la materialización de cualquier objeto a partir de las instrucciones de composición de sus ingredientes elementales.

En 2006, Joseph Sifakis (que en 2007 obtendría el Premio Turing) advirtió de la necesidad de avanzar en la construcción de un conocimiento académico conjunto entre las comunidades científicas relacionadas con el estudio de fenómenos físicos y las comunidades del mundo de la computación, y aventuró que para el año 2015 la sociedad en general se vería rodeada del fenómeno denominado «maridaje entre los mundos físico y digital» (Sifakis y Henzinger, 2006). En el ámbito de la ingeniería este concepto se conoce como «sistemas ciber-físicos» y se basa en la utilización de las tecnologías digitales (principalmente sistemas embebidos e Internet) para la monitorización y el control de sistemas físicos.

En la misma dirección, en 2011 se publicaron dos libros con títulos relacionados explícitamente con la idea de una nueva revolución industrial. Por un lado, *The Third Industrial Revolution* (Rifkin, 2011), de Jeremy Rifkin, donde identifica una primera revolución basada en la máquina de vapor a finales del siglo XVIII, una segunda revolución basada en la energía eléctrica y el petróleo a comienzos del siglo XX, y anuncia la entrada a una tercera revolución basada en la digitalización y en las energías renovables. Rifkin considera que la digitalización, hasta ahora, se ha utilizado para seguir quemando petróleo sin hacer la revolución energética, basada en energías limpias y renovables.

Por otra parte, Chris Anderson (2011) publicó el libro *Makers: The new industrial revolution* (Anderson, 2011). En este plantea los efectos que podría tener la aplicación generalizada de los principios planteados por el Laboratorio de Bits & Atoms del MIT en la sociedad. La difusión generalizada y abierta de conocimiento por internet, con poca barrera de entrada del tipo DIY (del inglés, *Do it yourself*), ha propiciado la emergencia del llamado movimiento *maker*, cuyos principios se recogen en el «The Maker Movement Manifesto», que puede dar lugar a una generación de ciudadanos de perfil prosumidor. Las diferentes formas de conocimiento con poca barrera de entrada permiten que las empresas puedan adentrarse en la producción de productos que tradicionalmente fabricaban empresas de otros sectores. En definitiva, según Anderson, la digitalización conlleva la eliminación de las barreras y fomenta la transversalidad.

En el año 2011, el DFKI (del alemán, *Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz*, Centro alemán de inteligencia artificial) presentó un modelo basado en una sola revolución industrial dividida en cuatro etapas, mientras que en 2013, la ACATECH (del alemán *Deutsche Akademie der Technikwissenschaften*, Academia alemana de las ciencias) formuló la variante de las cuatro revoluciones industriales sobre el modelo de la DFKI para dar lugar al término Industria 4.0. El documento *Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0* (Kagermann y otros, 2013), que se puede considerar como el «libro blanco de la Industria 4.0 alemana», fue presentado en la edición de la Feria de Hannover de 2013 y entregado a la cancillera Angela Merkel por re-

Bibliografía

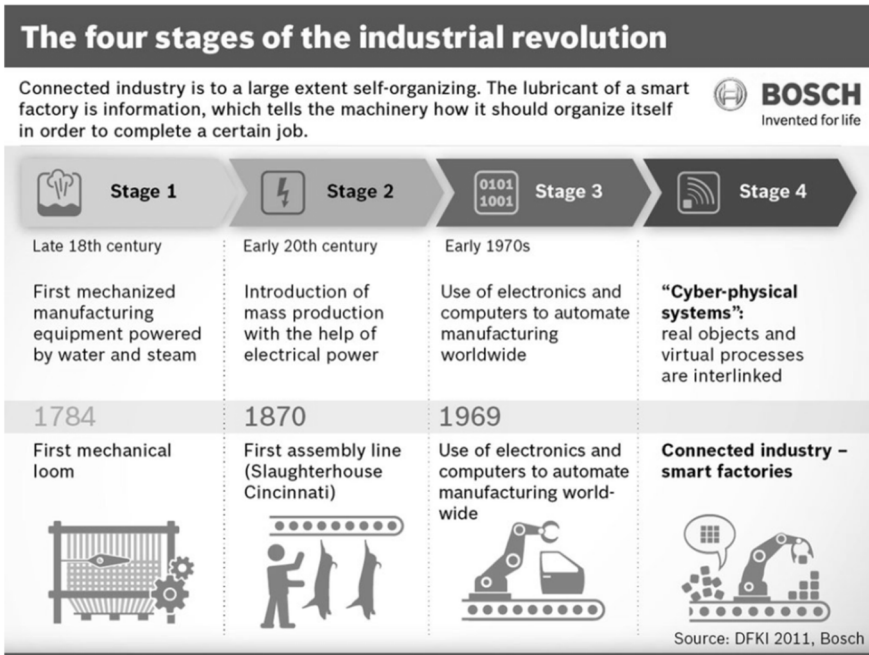
Edward A. Lee and Sanjit A. Seshia, *Introduction to Embedded Systems, A Cyber-Physical Systems Approach*. Second Edition, MIT Press, ISBN 978-0-262-53381-2, 2017.

Disponible online en: <https://ptolemy.berkeley.edu/books/leeseshia/download.html>

Prosumer

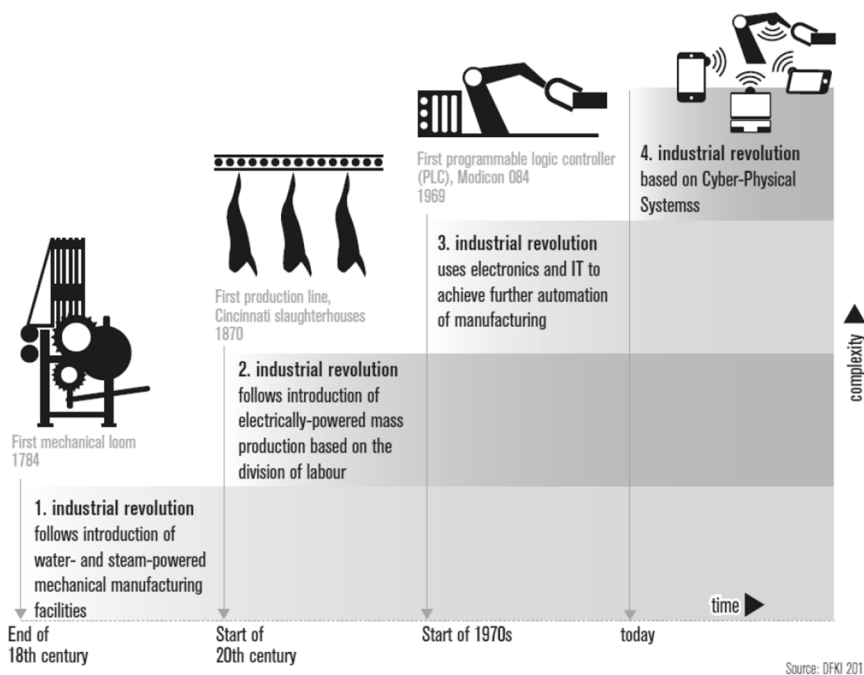
Prosumer es un acrónimo formado por las palabras «productor» y «consumidor» y que apareció por primera vez en el libro *The Third Wave* de Alvin Toffler en 1980. El término *prosumer* se asocia a los nuevos roles que toman los consumidores en los procesos de diseño y fabricación de los productos.

presentantes de la academia y la industria alemana. En el modelo inicial propuesto por DFKI se consideraba que sólo ha habido una revolución industrial y que desde entonces ésta ha ido pasando por distintas etapas.



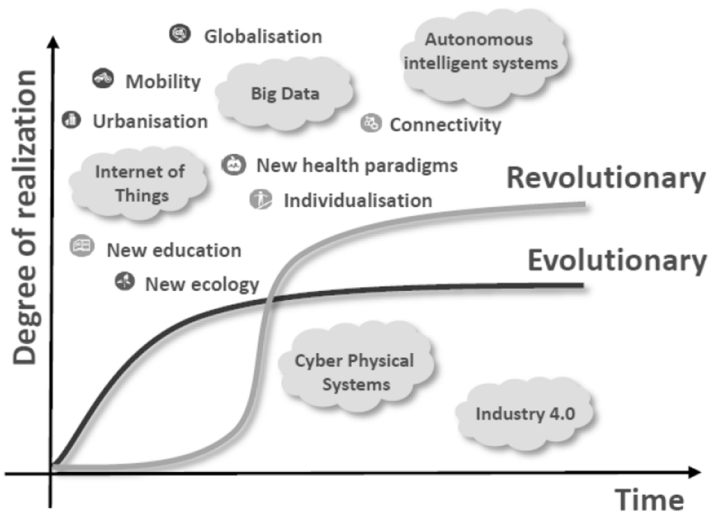
Fuente: Bosch

En cambio, en el modelo finalmente adoptado por la ACATECH se plantean cuatro revoluciones industriales, tal como se puede observar en el siguiente diagrama.



Fuente: ACATECH

Como vemos, actualmente todavía hay una cierta discusión sobre si se trata de una verdadera revolución o si es simplemente una evolución de las tecnologías propias de la Industria 3.0. Por un lado Sabina Jeshcke, de la Universidad de Aachen, apunta que las revoluciones siguen el patrón de la «curva S» de Foster, por lo que la decisión de utilizar la denominación «revolución» debe obedecer únicamente a la hipótesis de un tramo de aceleración exponencial (Jeshcke, 2013). En cambio, Peter Troxler, estudioso de las revoluciones industriales, apunta que, a diferencia de las revoluciones políticas, en las revoluciones industriales no se producen desplazamientos completos de las anteriores, sino que siempre hay un reaprovechamiento de buena parte de las mismas (Troxler, 2013) y, por lo tanto, no se puede considerar una revolución. Finalmente, para Jorge Wagensberg, en las evoluciones cambian las respuestas, mientras que en las revoluciones cambian las preguntas.



Fuente: Jeshcke

Si bien el debate sobre el número de etapas y la nomenclatura de las mismas aún está abierto a nivel académico, la realidad es que, en la actualidad, hay una fuerte demanda del mercado para la personalización de los productos que sólo se puede satisfacer mediante el uso sin precedentes de las nuevas tecnologías que faciliten el diseño y la fabricación de los mismos.

1.2. Fundamentos teóricos de la fabricación flexible

Como hemos visto en el apartado anterior, una de las claves de la Industria 4.0 es la introducción de las tecnologías digitales de nueva generación que permitan superar las limitaciones de rigidez de los sistemas de producción actuales con el objetivo de facilitar el diseño y la fabricación de nuevos productos personalizados en grandes volúmenes y con un coste marginal reducido.

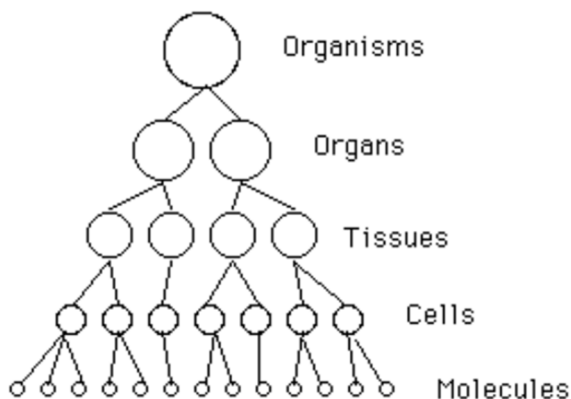
En esta dirección, se puede establecer una aproximación al concepto de la fabricación flexible a partir de la noción de holón propuesta por Arthur Koestler en 1968 (Koestler, 1968) con el objetivo de comprender la naturaleza de los

organismos en sentido amplio. Según Koestler, las partes y el todo no existen en un sentido absoluto en el dominio de la vida y, por lo tanto, un organismo puede ser considerado como una jerarquía multinivel compuesta de sub-todos semiautónomos, que se ramifican en subconjuntos de un orden inferior, y así sucesivamente.

Dichos sub-todos se conocen como holones y los conjuntos de holones del mismo nivel jerárquico se denominan holarquías. Además, de manera general, un holón puede pertenecer a múltiples holarquías de forma dinámica. Por tanto, para Koestler el concepto de holón y de holarquía permite reconciliar los enfoques atomístico y holístico propuestos por los filósofos clásicos, es decir, el mundo no está compuesto de átomos o símbolos terminales, sino que está compuesto de holones y holarquías.

Por un lado, cada holón tiene la doble tendencia de preservar y afirmar su individualidad como un todo casi autónomo y, al mismo tiempo, funcionar como una parte integrada de un sistema (más grande o envolvente). Esta polaridad entre las tendencias autoasertivas e integrativas es inherente al concepto del orden jerárquico y una característica universal de la vida. Por ejemplo, los holones biológicos son sistemas abiertos autorregulados que muestran tanto las propiedades autónomas del todo como las propiedades dependientes de las partes.

Por otro lado, una holarquía define las reglas básicas para la cooperación entre los holones y, por lo tanto, limita su autonomía. Las jerarquías son un caso particular de las holarquías y se pueden considerar como estructuras arborizadoras «verticales» cuyas ramas se entrelazan con las de otras jerarquías en una multiplicidad de niveles formando redes «horizontales». La arborización y la reticulación son principios complementarios en la arquitectura de los organismos y las sociedades. Por ejemplo, los sistemas biológicos presentan holarquías como la que se muestra en la siguiente figura, donde se puede observar como un organismo está formado por una jerarquía de órganos, tejidos, células y moléculas.



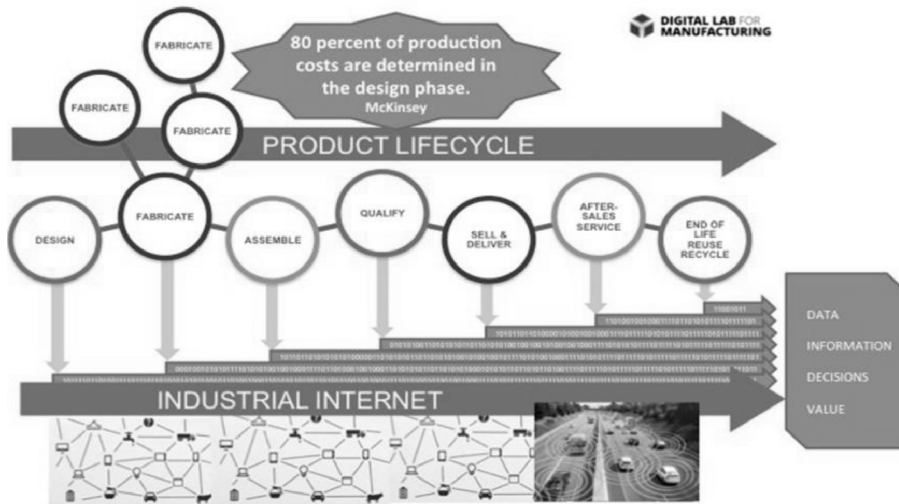
Así pues, partiendo de las ideas filosóficas planteadas por Koestler, a comienzos de los años noventa, Suda (Suda, 1990) definió el concepto *holonic manufacturing*, donde un holón es un elemento constitutivo, autónomo y cooperativo de un sistema de fabricación. La aplicación del concepto de holón a los sistemas productivos llegó años más tarde gracias al desarrollo de los agentes de software.

Por otro lado, en los años setenta se definió el concepto de *computing agent* (Milner, 1975), que combina por primera vez el ámbito de los sistemas de computación con la de los sistemas biológicos. Posteriormente, emergió la disciplina del *agent-based computing* (Wooldridge, 1997), en la que confluyen los conocimientos procedentes de la orientación de los objetos, la modelización del *software*, los sistemas distribuidos, la simulación y la inteligencia artificial (Marik, 2000). En términos generales, un agente se puede definir como un sistema autónomo de toma de decisiones que siente (recibe información vía sensores) y actúa (aplica acciones sobre el mundo físico) en un entorno determinado. Además, según Wooldridge, los agentes son sistemas que gozan de las propiedades de autonomía, reactividad, proactividad y de la capacidad de asociarse.

De este modo, combinando los conceptos de *holonic manufacturing* de Suda y el *agent-based computing* de Wooldridge nació el concepto *agent-based holonic manufacturing* de la mano de Christensen, que plantea implementar los sistemas de fabricación basados en holones mediante agentes de *software* (Christensen, 1994). Finalmente, Bussmann consolidó el uso de agentes de *software* para implementar holones en sistemas industriales (Bussmann, 1998).

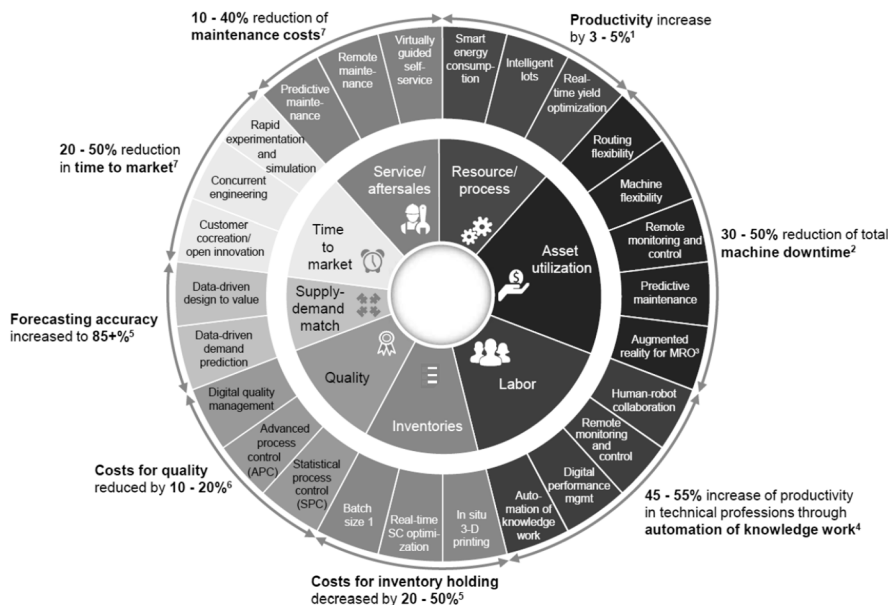
1.3. Definición de Industria 4.0

De manera general, podemos definir la Industria 4.0 como el proceso de transformación digital de todo el ciclo de vida de los bienes y servicios producidos en una sociedad industrial, que incluye el diseño, la fabricación, la distribución, la venta y el reciclaje de los mismos, tal como se muestra en la imagen de McKinsey que os presentamos a continuación.



Fuente: McKinsey

Además, la Industria 4.0 se puede caracterizar mediante un modelo de tipo *levers-drivers* (palancas-ejes directores), en el que una palanca (*lever*) se define como una tecnología o proceso cuya aplicación tiene un impacto positivo en las organizaciones y el resto de procesos, y un eje director (*driver*) se define como un conjunto de palancas orientadas al mismo tipo de impacto positivo. Estos impactos positivos pueden ser de diferente tipo, incluyendo reducciones de costes, reducciones de tiempo (de salida al mercado, de paros de máquinas, etc.), aumentos de precisión o aumentos de productividad, entre otros. En esta dirección, la firma consultora McKinsey propuso en el año 2015 un conjunto de 26 palancas agrupadas en ocho ejes directores enfocados a la Industria 4.0, tal como se representa en el siguiente diagrama circular denominado Industry 4.0 Compass (Baur y Wee, 2015).



Fuente: McKinsey

Si bien las palancas tienen como objetivo ser activadas para acelerar los logros asociados en sus respectivos ejes directores, también hay frenos y desafíos para el desarrollo de la Industria 4.0. En este sentido, en el año 2016 la firma consultora Price Waterhouse Coopers (PWC) identificó los principales frenos y desafíos de la Industria 4.0 en su informe *Industry 4.0: Building the digital enterprise* (Geissbauer y otros, 2016), realizado sobre una muestra significativa de empresas industriales de todo el mundo. En el diagrama que os mostramos a continuación se puede observar que el freno más importante para la Industria 4.0 es la falta de una visión clara de las operaciones digitales y de apoyo desde la dirección. Para contrarrestar este problema, el informe de PWC propone desarrollar proyectos piloto (prototipar) y mapear el resultado de los mismos en la arquitectura de referencia adoptada por la organización.



Note: Included as one of three possible responses

Q: Where are the biggest challenges or inhibitors for building digital operations capabilities in your company?

Fuente: PWC

2. Arquitecturas de referencia

Las arquitecturas de referencia proporcionan marcos de referencia indispensables en entornos complejos, para las discusiones relativas a la implementación de soluciones a partir de un vocabulario común.

En la introducción de la norma ISO/IEC/IEEE 42010 «Systems and software engineering architecture description» (sucesora de la norma IEEE 1471), se afirma que la complejidad de los sistemas que desarrollamos ha crecido a un nivel sin precedentes y que esto ha dado lugar a nuevas oportunidades, pero también a mayores desafíos para las organizaciones que crean y utilizan sistemas. Los conceptos, principios y procedimientos de las arquitecturas están cada vez más orientados a ayudar a administrar la complejidad a la que se enfrentan las partes interesadas en los sistemas (*stakeholders*).

2.1. Definición de arquitectura de referencia

El estándar ISO/IEC/IEEE 42010, elaborado por el comité técnico del ámbito de la ingeniería de sistemas y de software ISO/IEC JTC 1/SC 7, propone las siguientes definiciones vinculadas al concepto de arquitectura de referencia:

- **Arquitectura:** Conceptos fundamentales o propiedades de un sistema considerando su entorno, los elementos que lo componen, las relaciones entre ellos y los principios de su diseño y evolución.
- **Descripción de arquitectura:** Entregable operativo utilizado para expresar una arquitectura.
- **Marco de arquitectura (*Architecture framework*):** Convenciones, principios y prácticas para la descripción de una arquitectura dentro de un dominio específico de aplicación o comunidad de partes interesadas en un sistema (*stakeholders*).
- **Vista de una arquitectura (*Architecture view*):** Entregable operativo que expresa la arquitectura de un sistema desde la perspectiva de un conjunto de intereses o preocupaciones (*concerns*) respecto a un sistema.
- **Punto de vista en una arquitectura (*Architecture viewpoint*):** Entregable operativo que expresa las convenciones para la construcción, interpretación y uso de las vistas de una arquitectura para encuadrar intereses o preocupaciones (*concerns*) respecto a un sistema.

- **Interés o preocupación (*concern*):** Interés o preocupación respecto a un sistema relevante para una o más partes interesadas.

2.2. Características de una arquitectura de referencia

Según el Open Group, las arquitecturas de referencia tienen como objetivo definir y comprender los distintos elementos que componen la empresa y cómo esos elementos están interrelacionados entre sí. Para ello tienen las siguientes características:

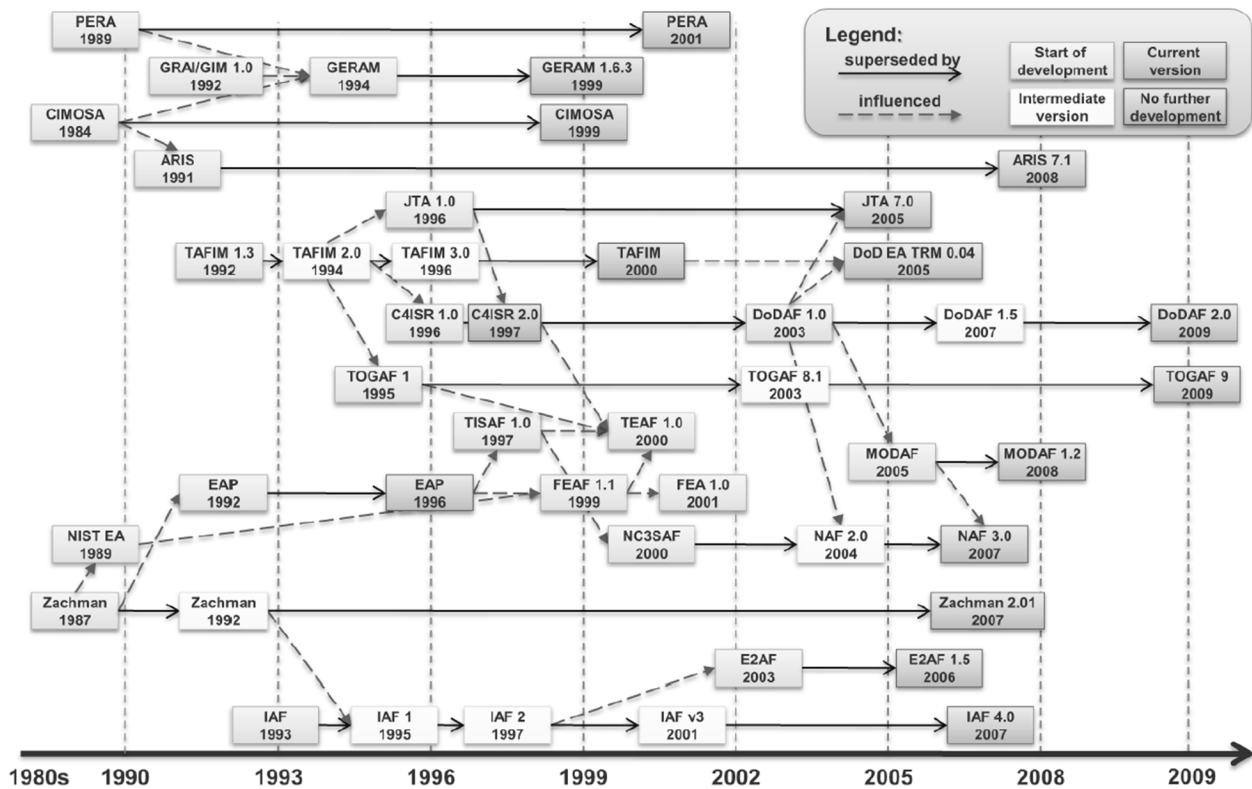
- **Holísticas:** Las arquitecturas de referencia son la expresión holística del negocio clave de una organización: estrategias de información, aplicaciones y tecnología, y su impacto en las funciones de negocios y procesos. El enfoque analiza los procesos de negocios, la estructura de la organización y qué tipo de tecnología se utiliza para llevar a cabo estos procesos.
- **Simples:** Una arquitectura de referencia es un modelo, un marco relativamente simple y directo, o una plantilla que pueda ser utilizada por toda la empresa para evaluar cómo están yendo, para facilitar su trabajo y para diseñar nuevos proyectos.
- **Representativas:** Una arquitectura de referencia es el conjunto de representaciones requeridas para describir un sistema o empresa con respecto a su construcción, mantenimiento y evolución.
- **Estratégicas:** Una arquitectura de referencia es una base de activos de información estratégica que define la misión del negocio, la información necesaria para realizarla, las tecnologías necesarias para llevar a cabo la misión y los procesos de transición para implementar nuevas tecnologías en respuesta a las necesidades cambiantes de la misión.
- **Completas:** Una arquitectura de referencia es una expresión completa de la misma; un plan maestro que «actúa como una fuerza de colaboración» entre los aspectos de la planificación empresarial, como los objetivos, visiones, estrategias y los principios de gobernanza; aspectos de las operaciones tales como términos comerciales, estructuras de organización, procesos y datos; aspectos de la automatización como por ejemplo sistemas de información y bases de datos, y la infraestructura tecnológica habilitadora del negocio, tales como computadoras, sistemas operativos y redes.

Open Group

El Open Group es un consorcio internacional formado a mediados de los años noventa por empresas y organizaciones gubernamentales que se encarga de definir estándares abiertos para la industria del software.

2.3. Historia y evolución de las arquitecturas de referencia

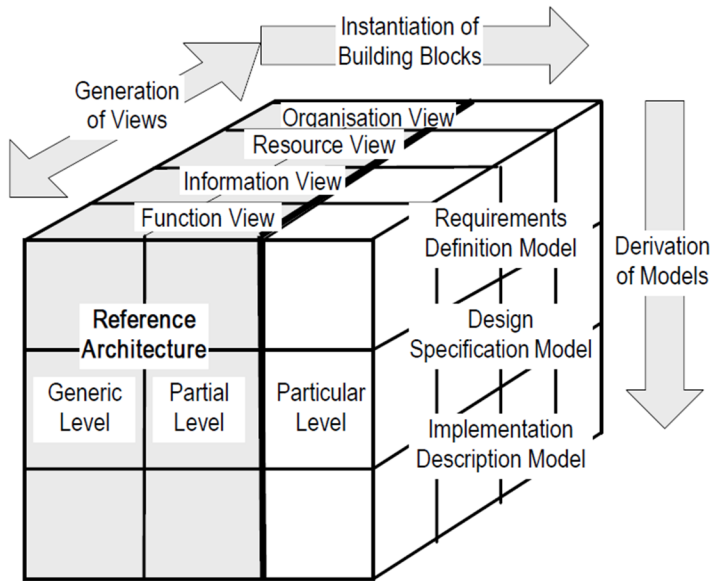
Desde la aparición en los años ochenta de las primeras arquitecturas de referencia, se ha producido un fenómeno darwiniano de creación y abandono de propuestas que aún continúa actualmente. El diagrama siguiente es una muestra de este fenómeno evolutivo y demuestra que todavía no se ha identificado la arquitectura definitiva, si es que ésta existe.



Fuente: Sebis

Los orígenes de las *enterprise architectures* (EA) se remontan a los años 80 con los trabajos de Zachman, la iniciativa CIMOSA (del inglés, *Computer Integrated Manufacturing Open System Architecture*) y la propuesta PERA (del inglés, *Purdue Enterprise Reference Architecture*) de la Universidad de Purdue.

La arquitectura CIMOSA, objeto del proyecto europeo AMICE del Esprit Consortium iniciado en 1984, se caracterizaba por su diseño tridimensional en el que se combinan los ejes del ciclo de vida, de vistas y de genericidad o nivel de abstracción (Kosanke, 1992), tal como se muestra en la figura siguiente:



En la figura se observa como el eje de derivación de modelos (ciclo de vida) se basa en la secuencia análisis-diseño- implementación de la teoría clásica de sistemas. Por otra parte, el eje de vistas y genericidad propone las vistas de función, información, recursos y organización. Finalmente, el eje de instanciación (abstracción) propone los niveles genérico, parcial o particular, proponiendo empezar por el primero.
Fuente: Kosanke

A continuación la arquitectura de Zachman, aparecida en 1987, se basa en dos ejes, el de perspectivas y el de abstracciones, tal y como se muestra en la siguiente figura (la primera versión sólo tenía las tres primeras columnas) (Zachman, 1987):

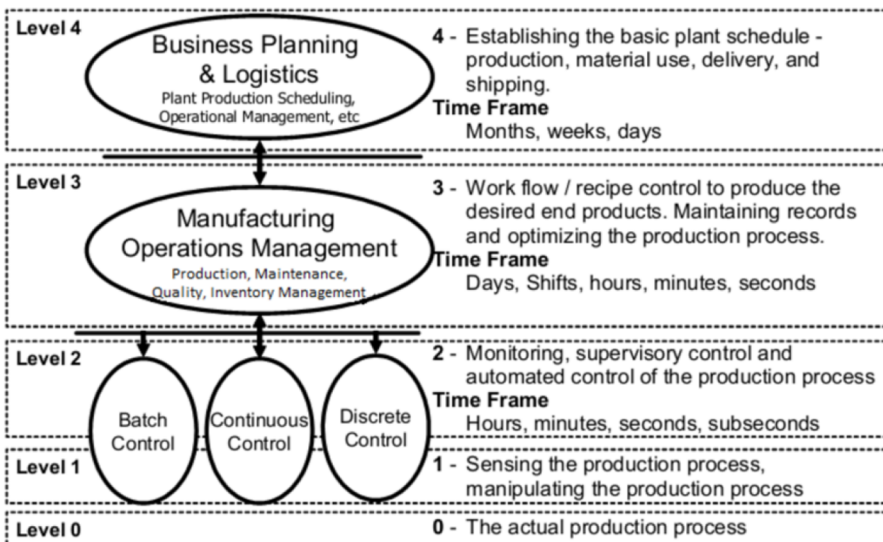
abstractions perspectives	DATA What	FUNCTION How	NETWORK Where	PEOPLE Who	TIME When	MOTIVATION Why
SCOPE Planner contextual	List of Things - Important to the Business 	List of Processes - the Business Performs 	List of Locations - in which the Business Operates 	List of Organizations - Important to the Business 	List of Events - Significant to the Business 	List of Business Goals and Strategies
ENTERPRISE MODEL Owner conceptual	e.g., Semantic Model 	e.g., Business Process Model 	e.g., Logistics Network 	e.g., Work Flow Model 	e.g., Master Schedule 	e.g., Business Plan
SYSTEM MODEL Designer logical	e.g., Logical Data Model 	e.g., Application Architecture 	e.g., Distributed System Architecture 	e.g., Human Interface Architecture 	e.g., Processing Structure 	e.g., Business Rule Model
TECHNOLOGY CONSTRAINED MODEL Builder physical	e.g., Physical Data Model 	e.g., System Design 	e.g., Technical Architecture 	e.g., Presentation Architecture 	e.g., Control Structure 	e.g., Rule Design
DETAILED REPRESENTATIONS Subcontractor out-of-context	e.g. Data Definition 	e.g. Program 	e.g. Network Architecture 	e.g. Security Architecture 	e.g. Timing Definition 	e.g. Rule Specification
FUNCTIONING ENTERPRISE	DATA Implementation	FUNCTION Implementation	NETWORK Implementation	ORGANIZATION Implementation	SCHEDULE Implementation	STRATEGY Implementation

Fuente: Zachman International

El *framework* de Zachman no es una metodología ya que no implica ningún método o proceso específico para recopilar, gestionar o utilizar la información que describe. Se trata de una ontología mediante la cual se crea un esquema para organizar los artefactos arquitectónicos (es decir, documentos de diseño, especificaciones y modelos).

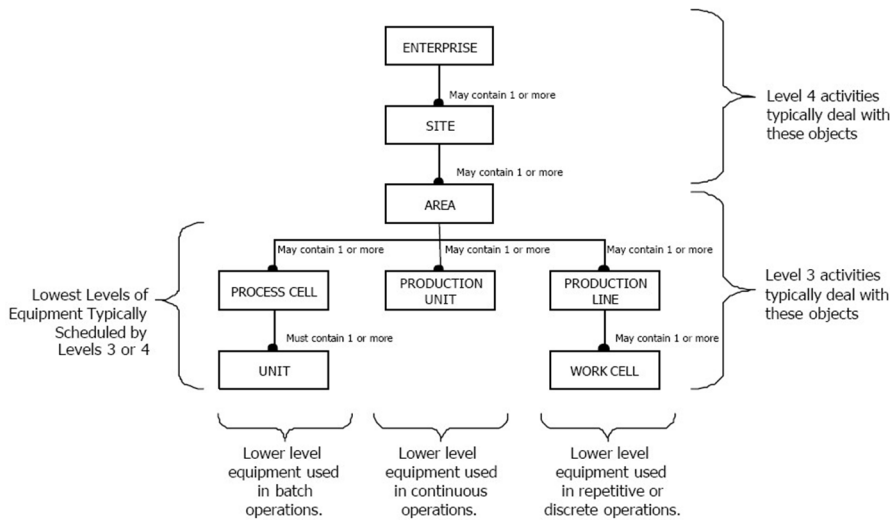
Se utiliza para tener en cuenta los *stakeholders* a los que se dirige el artefacto y qué problema en particular (por ejemplo, datos y funcionalidad) se está abordando.

En 1992 Theodore Williams (Williams, 1993) desarrolló la PERA (del inglés, *Purdue Enterprise Reference Architecture*), que dio lugar a la norma ISA-95, que es la base del estándar IEC 62264. La arquitectura utiliza un patrón de capas, que van desde la capa del sensor/actuador hasta la capa de negocio, tal como se muestra en la figura siguiente:



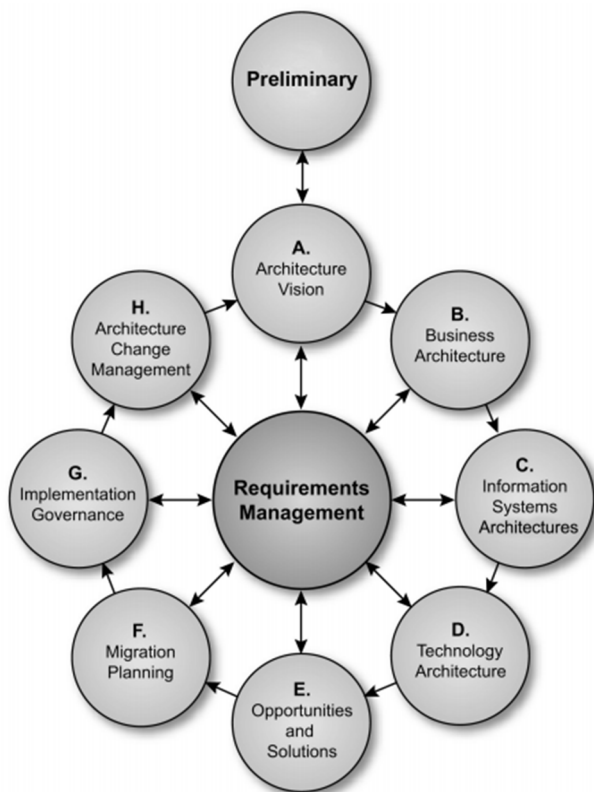
Fuente: IEC 62264 (ISA 95)

Asimismo, el estándar ISA-95 define un modelo conceptual (usando todavía la notación entidad-relación en lugar de UML) donde establece que una *enterprise* (empresa) tiene uno o más localizaciones, una localización tiene una o más áreas, una área tiene una o más células de proceso, una o más unidades de proceso y una o más líneas de producción. Finalmente, cada célula de proceso tiene una o más unidades y cada línea de producción tiene una o más células de trabajo, tal como se muestra en el diagrama siguiente.



Fuente: IEC 62264 (ISA 95)

En 1995 se presenta la primera versión de la arquitectura TOGAF (del inglés, *The Open Group Architecture Framework*), una iniciativa impulsada por The Open Group, en el que todo gira alrededor de los requerimientos, tal como se muestra en la figura siguiente.



Fuente: The Open Group

A mediados de la primera década de 2000, aparece la versión 8.1, que incorpora las características de una arquitectura orientada a los servicios SOA (del inglés, *Service Oriented Architecture*) (The Open Group, 2003).

Los fundamentos teóricos de la orientación a los servicios fueron establecidos por Lusch y Vargo en 2004 en su artículo «Evolving to a New Dominant Logic for Marketing» (Lusch y Vargo, 2006). Habiendo emergido una área de conocimiento alrededor del servicio como consecuencia de la potencia de su aplicación en el ámbito digital. A medida que se generalizan los procesos de digitalización dicho potencial va en aumento, hasta el punto que se planteó la creación de una nueva «ciencia de los servicios» bajo las siglas de SSME (del inglés, *Service Science, Management and Engineering*).

En 2004 el W3C (del inglés, *World Wide Web Consortium*) publicó un documento titulado «Web Services Architecture» (Booth y otros, 2004) donde se sientan las bases de los llamados *web services*, que se basan en el protocolo SOAP (del inglés, *Simple Object Access Protocol*) desarrollado en 1998 por Microsoft.

Por su parte, IBM dispone de una iniciativa académica orientada al desarrollo de la SSME debido a la interpretación de que la «servitización» es uno de los procesos clave de la nueva revolución industrial que derivará en una nueva generación de modelos de negocio basados, por ejemplo, en el «pago por uso», gracias a la conectividad con los servicios *online* y a las posibilidades de manejar grandes volúmenes de datos.

Los principios de las arquitecturas SOA se recogen en el llamado «SOA Manifesto», publicado en 2009, y en el que se dan las definiciones, los objetivos a priorizar y unos principios rectores. En general, una arquitectura orientada a servicios (SOA, *Service Oriented Architecture*) es aquella donde el diseño de la funcionalidad de cada componente se enfoca a los servicios que presta a sus respectivos clientes y tiene en cuenta los procesos de negocio en los distintos niveles. Para ello la arquitectura SOA se basa, entre otros, en la transparencia (mediante el uso de interfaces bien definidos) y la interoperabilidad (mediante el uso de estándares abiertos).

Ante la proliferación de tantas arquitecturas, a mediados de los noventa aparecen iniciativas de unificación y fusión de las mismas. En 1994, apareció GERAM con el objetivo de unificar las arquitecturas PERA y CIMOSA. Y en la misma línea, en 1999, se pone en marcha una iniciativa que intenta unificar las arquitecturas PERA, CIMOSA, ARIS, GRAI/GIM, entre otras, dando lugar a la norma ISO 15704.

La proliferación de arquitecturas y las dinámicas de unificación se reflejan en el libro de Schekkerman *How to survive in the jungle of Enterprise Architectures* (Schekkerman, 2004).

2.4. Situación actual

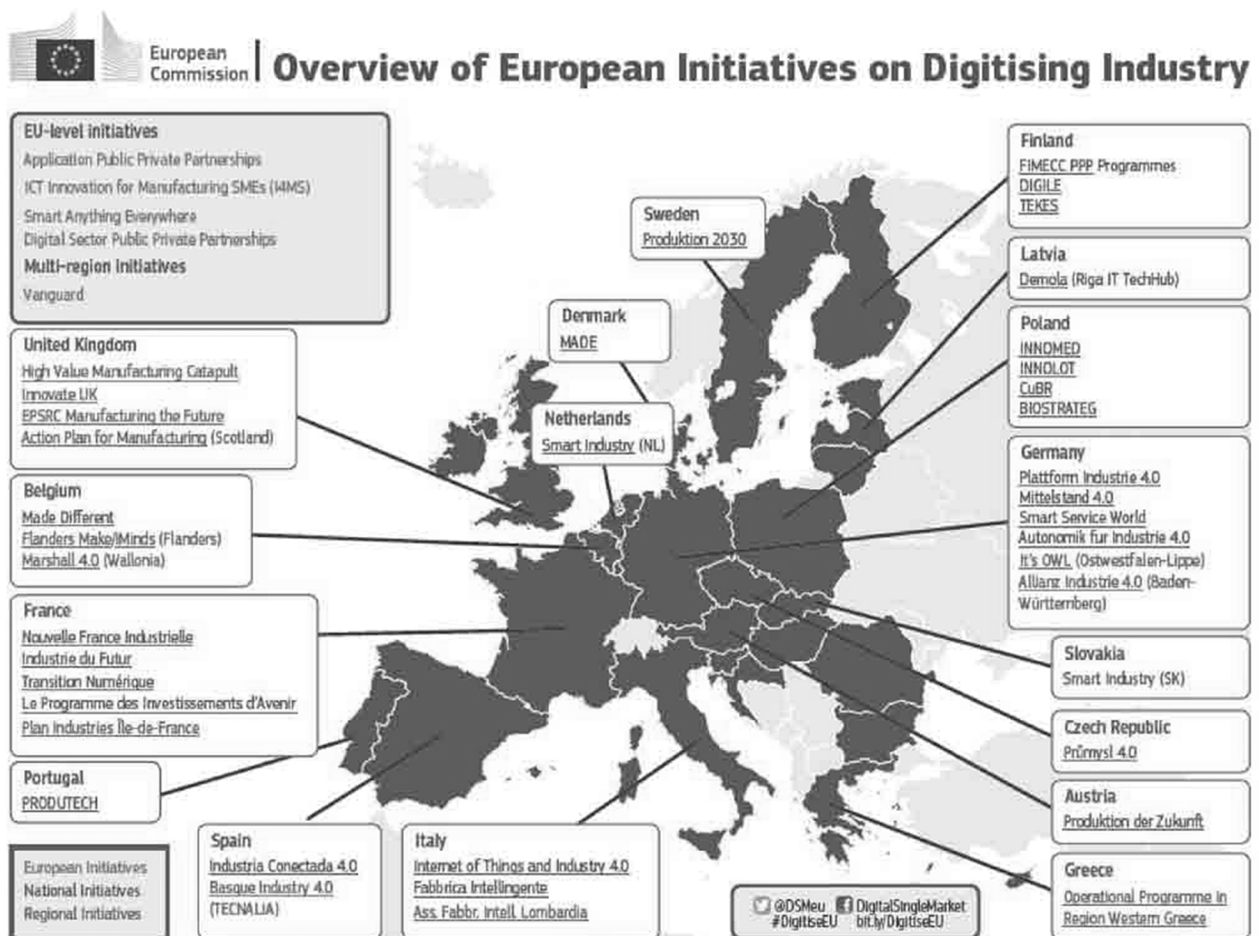
Actualmente hay dos tendencias emergentes en cuanto a las arquitecturas de referencia para la Industria 4.0. Por una parte, hay las arquitecturas que provienen del mundo de las tecnologías de las operaciones (OT, *Operation Techno-*

logies) y que siguen el modelo alemán y, por otra parte, hay las que provienen del mundo de las tecnologías de la información (IT, *Information Technologies*) y que siguen el modelo anglosajón.

El modelo europeo consiste en iniciativas gubernamentales para el impulso y el desarrollo de nuevos sistemas productivos, en el que se involucran las empresas, el mundo académico, los sindicatos, las asociaciones profesionales y los comités de estandarización y administración pública de cada país. La transversalidad entre ellas se logra mediante acuerdos de armonización.

El caso de referencia es el programa Industrie 4.0 iniciado en Alemania en 2013, que ha dado como resultado la arquitectura RAMI 4.0 (del inglés, *Reference Architecture Industrie 4.0*) liderada por la organización Plattform Industrie 4.0. Otros países han seguido iniciativas similares como Francia con el programa «Industrie du Futur», China con el programa «Made in China 2025» o España con el programa «Industria Conectada 4.0». En los dos primeros programas, las arquitecturas de referencia son derivadas del RAMI 4.0.

En la imagen siguiente se muestran distintas iniciativas europeas según este modelo público-privado.



En cambio, el modelo anglosajón consiste en consorcios globales impulsados por las empresas. La transversalidad se consigue por el carácter global de los mismos y se contemplan diferentes cuotas para formar parte del consorcio cuyos importes dependen de la dimensión de la organización.

El caso de referencia es el IIC (del inglés, *Industrial Internet Consortium*), fundado por General Electric, IBM, Intel, AT&T y Cisco, que actualmente cuenta con más de 250 organizaciones miembros y que ha dado como resultado la arquitectura IIRA (del inglés, *Industrial Internet Reference Architecture*) (IIC, 2005).

3. Modelo IIRA

3.1. Introducción

El IIRA (del inglés, *Industrial Internet Reference Architecture*) es una arquitectura abierta basada en estándares para sistemas del IIoT (del inglés, *Industrial Internet of Things*) desarrollada por el IIC (del inglés, *Industrial Internet Consortium*). Para maximizar su valor, el IIRA tiene una amplia aplicabilidad industrial para impulsar la interoperabilidad, la seguridad, para mapear las tecnologías aplicables y para guiar la tecnología y el desarrollo de estándares. La descripción y representación de la arquitectura son genéricas y con un alto nivel de abstracción, para soportar la amplia aplicabilidad requerida de la industria. El IIRA recoge características comunes y patrones a partir de casos de uso bien comprendidos, muchos de ellos definidos en los «testbeds» del IIC. El diseño del IIRA tiene como objetivo trascender las tecnologías disponibles de hoy y, cuando lo hace, ser capaz de identificar *gaps* tecnológicos basados en los requerimientos arquitectónicos, con la intención de impulsar los nuevos esfuerzos de desarrollo tecnológico de la comunidad de organizaciones que forman el IIC. Asimismo provee un marco integral de ciberseguridad mediante la arquitectura propuesta.

3.2. Origen y motivaciones

El IIC (del inglés, *Industrial Internet Consortium*) es una organización abierta, con más de 250 miembros (2016), que se formó para acelerar el desarrollo, la adopción y el uso generalizado de las tecnologías industriales de Internet, reuniendo a los actores de la industria, desde empresas multinacionales, pequeños y grandes innovadores tecnológicos, el mundo académico y los gobiernos. El IIC fue fundado el 27 de marzo de 2014 por AT & T, Cisco, General Electric, IBM e Intel y su empresa matriz es la OMG (del inglés, *Object Management Group*).



Fuente: IIC

El origen de IIRA y IIC es el OMG, un consorcio internacional de estándares de tecnología sin ánimo de lucro, fundado en 1989 por once compañías entre las que se encontraban Hewlett-Packard, IBM, Sun Microsystems, Apple Computer, American Airlines y Data General, entre otros. Los grupos de trabajo de OMG desarrollan estándares de integración empresarial para una amplia gama de tecnologías e industrias. Las normas de modelización de OMG permiten el diseño visual, ejecución y mantenimiento del *software* y otros procesos. Originalmente destinada a la estandarización de sistemas orientados a objetos distribuidos, la organización ha ampliado el ámbito al modelado en un sentido amplio (programas, sistemas y procesos de negocio) y estándares basados en modelos.

La OMG es conocido por el estándar UML (del inglés, *Unified Modeling Language*), lenguaje de modelado que adoptó en 1997, y actualmente está formalizado como norma ISO/IEC 19505.

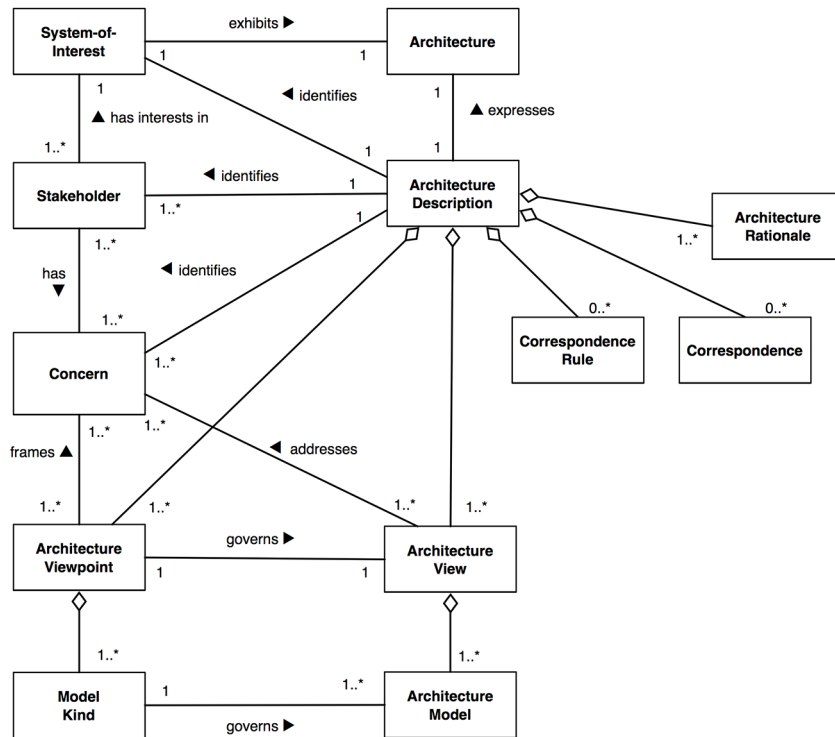
Aunque su empresa matriz es el OMG, el IIC no es una organización de normalización. El consorcio se formó con la idea de impulsar un ecosistema desde una posición de liderazgo de pensamiento, la interoperabilidad y la seguridad mediante arquitecturas de referencia, marcos de seguridad y estándares abiertos, fomentando implementaciones del mundo real e impulsar innovaciones. El grupo de trabajo de tecnología del IIC ratificó la primera versión de la IIRA en Junio de 2015. Esta primera versión de IIRA define las áreas funcionales y las tecnologías y normas para ellos, desde los sensores hasta la analítica de datos y las aplicaciones empresariales.

UML

UML (*unified modeling language*) es un lenguaje de modelado, resultado de la unificación en 1997 de los lenguajes de modelado de Booch, Rumbaugh y Jacobson. La masa crítica alcanzada por la unificación fue suficiente para atraer el interés general de la comunidad en detrimento de otros lenguajes de modelado que también pugnaban por su adopción. Es muy utilizado en el campo de los sistemas de información dado que aplica los principios teóricos del modelo entidad-relación desarrollado por Peter Chen en 1976, en la escuela de negocios Sloan del MIT.

3.3. Arquitectura IIRA

La arquitectura IIRA se define en base al metamodelo UML propuesto por la ISO/IEC/IEEE 42010 que se muestra en la figura adjunta.



Fuente: ISO/IEC/IEEE 42010

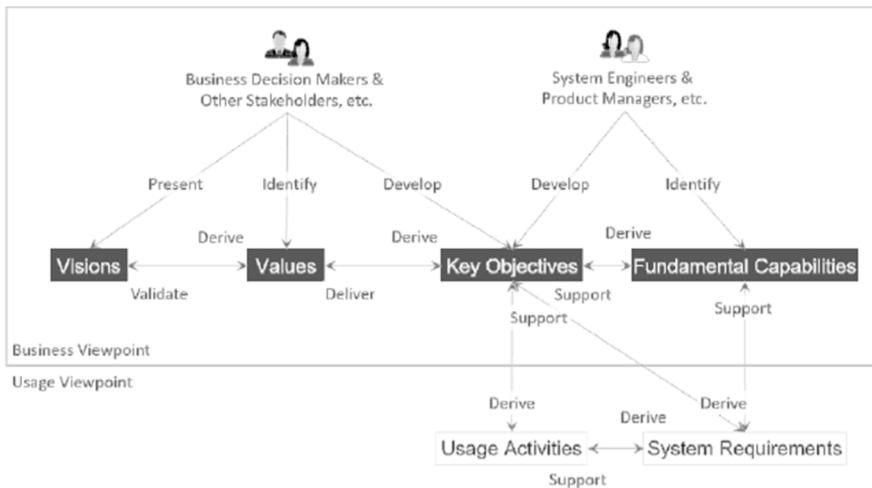
En este modelo UML se representan los conceptos fundamentales de la arquitectura y cómo se relacionan entre ellos. Según el diagrama, una arquitectura se expresa mediante la descripción de la arquitectura, que se compone de puntos de vista de la arquitectura, vistas, una base lógica (*rationale*), unas reglas de correspondencia y unas correspondencias.

Así pues, la arquitectura IIRA se define a partir del modelo genérico (metamodelo) de la norma ISO/IEC/IEEE 42010, y define los siguientes *viewpoints* (puntos de vista):

- **Negocio (*business*):** El punto de vista del negocio atiende a las preocupaciones (*concerns*) de la identificación de las partes interesadas (*stakeholders*) y su visión de negocio, valores y objetivos en el establecimiento de un sistema IIoT en su contexto empresarial y regulatorio. Además, identifica cómo el sistema IIoT alcanza los objetivos establecidos mediante las capacidades clave del sistema. Estas preocupaciones están orientadas al negocio y son de particular interés para quien debe tomar decisiones empresariales, gerentes de producto e ingenieros de sistemas.
- **Uso (*usage*):** El punto de vista del uso se preocupa de cómo el sistema IIoT realiza las capacidades clave identificadas en el *viewpoint* de negocio. Describe las actividades que coordinan varias unidades de trabajo sobre

varios componentes del sistema. Estas actividades, que describen cómo se utiliza el sistema, sirven como entrada para los requisitos del sistema, incluyendo las características clave del sistema, y orientan el diseño, la implementación, el despliegue, las operaciones y la evolución del sistema.

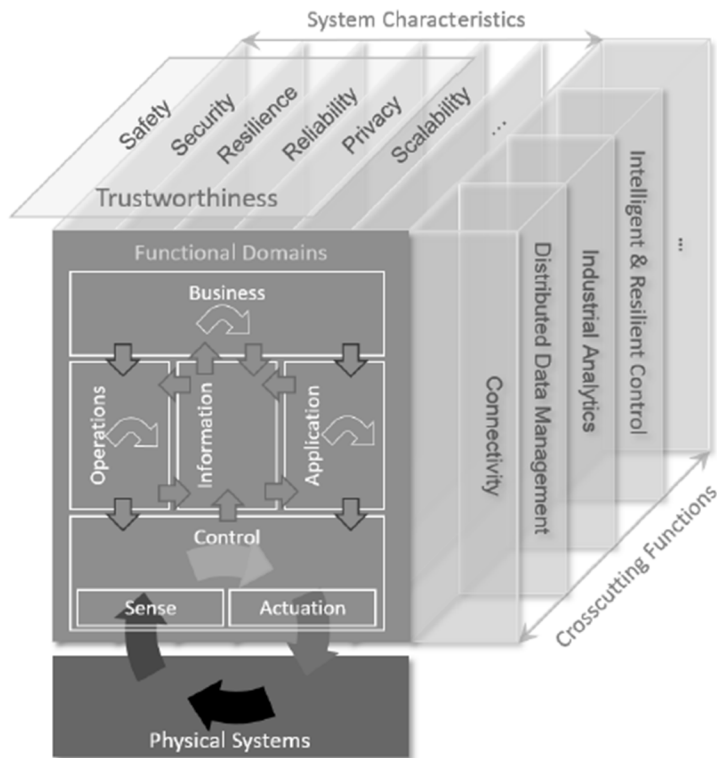
La relación entre los puntos de vista de negocio y de uso se muestra en el siguiente diagrama.



Fuente: IIC

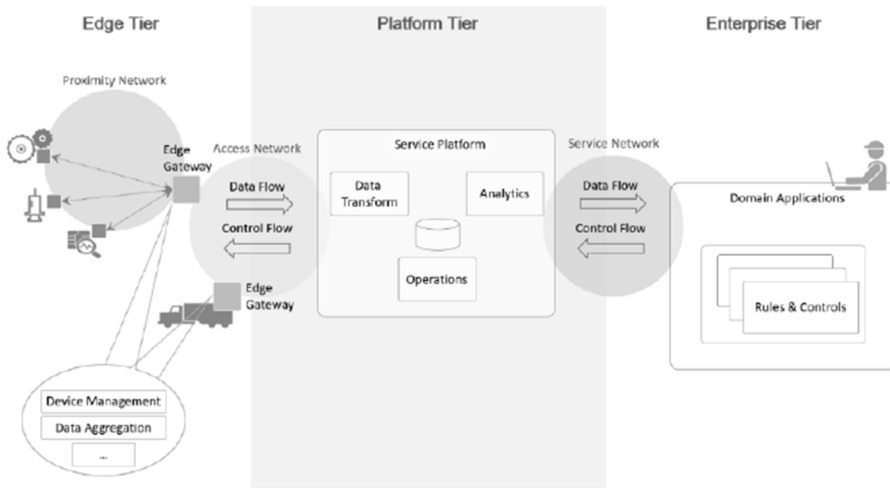
Además de los puntos de vista de negocio y uso, IIRA también define los puntos de vista funcional y de implementación, tal como se describe a continuación.

- **Funcional (*functional*):** Desde el punto de vista funcional se puede observar que los bloques funcionales se definen como un modelo tridimensional, con un primer eje de las características del sistema, un segundo de los bloques funcionales descritos en un «tablero de juego funcional», y finalmente las interconexiones entre las funciones y las características del sistema, con un énfasis importante en la ciberseguridad, tal como se muestra en la figura siguiente.



Fuente: IIC

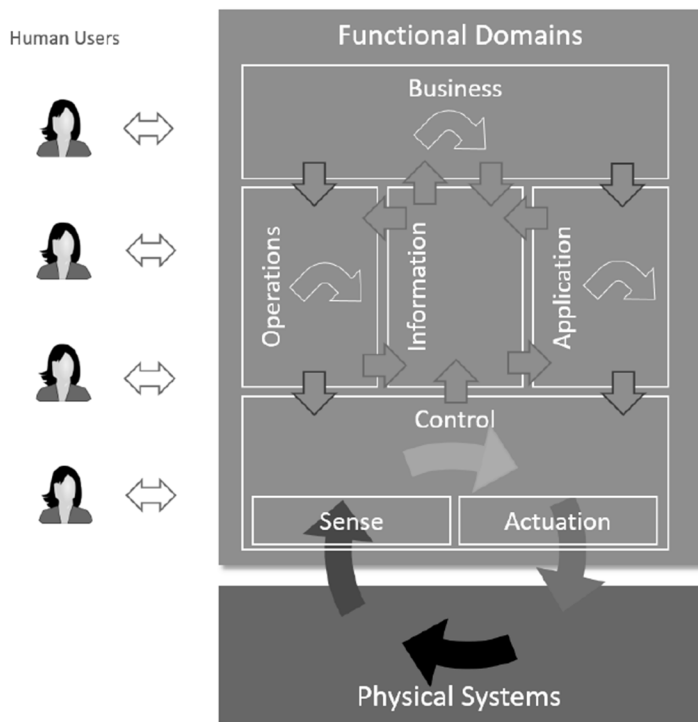
- Implementación (*implementation*):** El punto de vista de implementación se ocupa de las tecnologías necesarias para implementar componentes funcionales (punto de vista funcional), sus esquemas de comunicación y sus procedimientos del ciclo de vida. Estos elementos son coordinados por actividades (punto de vista de uso) y apoyan las capacidades del sistema (punto de vista de negocio). Estas preocupaciones son de particular interés para los arquitectos de sistemas y componentes, desarrolladores e integradores y operadores de sistemas. El *viewpoint* de implementación define las capas de la empresa (*enterprise tier*), de la plataforma y del *edge*, que representan sistemas de información cercanos a los sistemas productivos. La capa de la plataforma conecta el *edge* con la capa negocio, tal como se muestra en la siguiente figura.



Fuente: IIC

3.4. Descripción funcional de IIRA

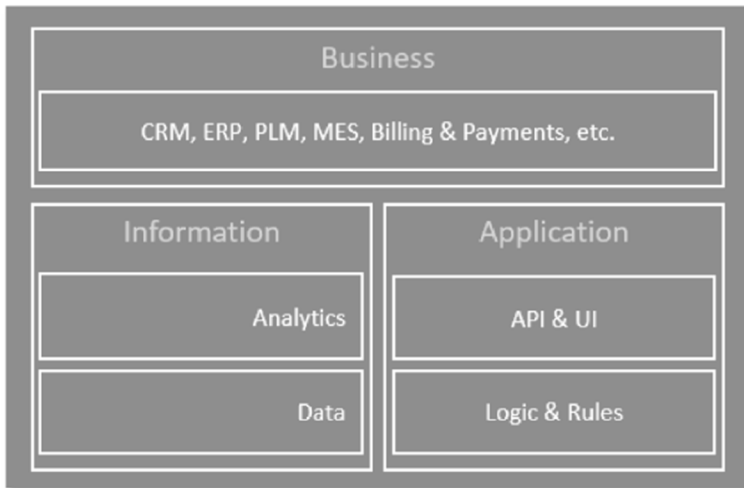
El tablero funcional de IIRA se representa en la siguiente figura. Como vemos, los pilares sobre los que se sustenta la capa de negocio (*business*) son tres bloques funcionales: aplicación (*application*), información (*information*) y operaciones (*operations*). Además, hay tres tipos de flecha no sólidas, que representan los tres tipos de flujo: flujos de datos/información (contorno de flecha suave), flujos de decisión (contorno de flecha blanco) y flujos de comandos/peticiones (contorno de flecha fuerte).



Green Arrows: Data/Information Flows
 Grey/White Arrows: Decision Flows
 Red Arrows: Command/Request Flows

Fuente: IIC

A continuación describimos los elementos que forman cada bloque funcional. En primer lugar, el bloque funcional de negocio incluye los sistemas de información correspondientes a la parte alta de la pirámide CIM descrita en el punto 1.1. Además, el bloque funcional de negocio también incluye los subbloques de información y de aplicaciones.



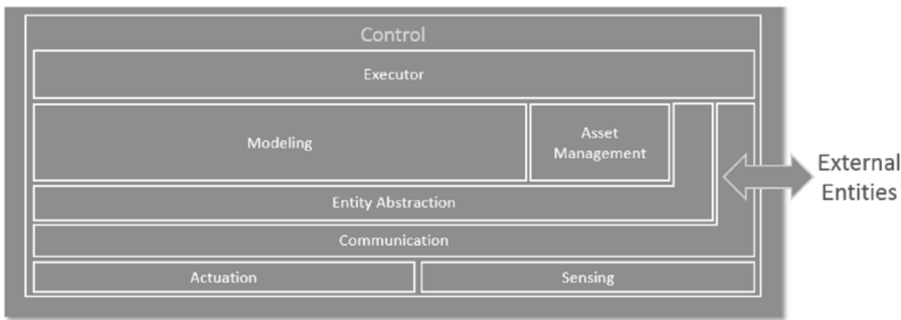
Fuente: IIC

En segundo lugar, el bloque funcional de operaciones incluye el *prognostics* (sistemas de predicción), la monitorización, la optimización, el despliegue y la gestión de las operaciones, tal como se muestra en la figura siguiente.



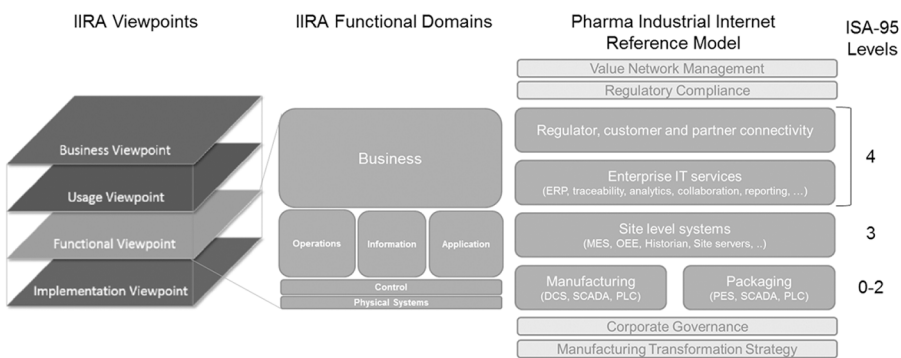
Fuente: IIC

En tercer lugar, el bloque funcional de control, incluye el modelaje que permite trabajar en modo simulado, y también contiene los sensores y los actuadores, tal y como podemos apreciar en la figura siguiente.



Fuente: IIC

Finalmente, el tablero funcional de IIRA, que tiene su origen en el estándar ISA-95, reparte los niveles 2 y 3 en los tres pilares ya vistos: aplicaciones (*information technologies*), operaciones (*operation technologies*) e información (*corporate data*), visualizando la necesidad de la convergencia entre el ámbito de las operaciones y el ámbito de las tecnologías de la información y las comunicaciones.



Fuente: Kempainen

3.5. Marco de ciberseguridad

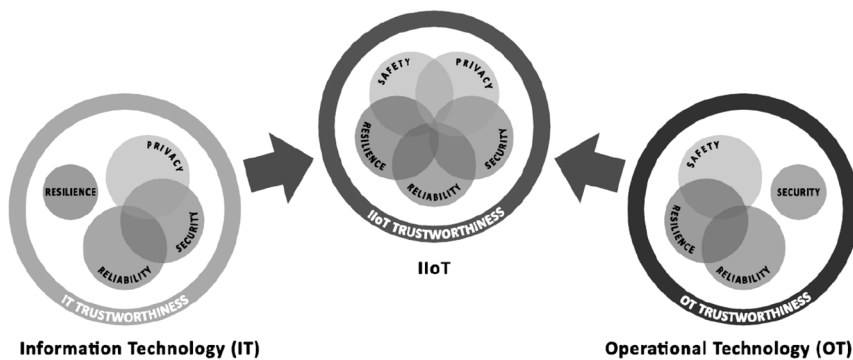
La ciberseguridad dispone de un capítulo propio dentro del IIC, al que se le da una gran importancia. La integración de las tecnologías digitales traslada los retos de la ciberseguridad propios del ámbito de las tecnologías de la información y las comunicaciones al mundo de las operaciones. Debido a ello, el IIC ha propuesto un marco de ciberseguridad completo diseñado para ser integrado con IIRA.

El marco de ciberseguridad propuesto por el IIC (IIC, 2016) se define mediante los *viewpoints* que propone la arquitectura IIRA:

- El punto de vista de negocio (*business viewpoint*) establece el retorno de la inversión en seguridad, en el contexto de otras consideraciones como el rendimiento o la satisfacción del consumidor. También define los requisitos para el cumplimiento de la seguridad respaldados por una recopilación de métricas de seguridad.

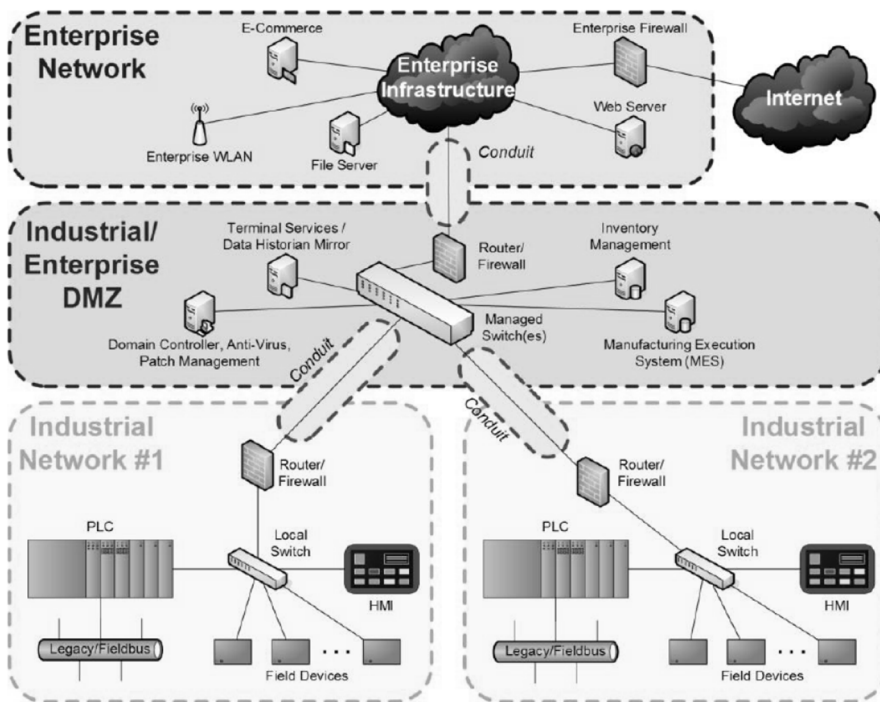
- El punto de vista de uso (*usage viewpoint*) se esfuerza para que la seguridad sea transparente para el usuario, minimizando su participación y estableciendo una diferenciación entre los protocolos máquina-máquina y la interacción humana.
- El punto de vista funcional (*functional viewpoint*) define qué funciones de seguridad se deben proporcionar para cada dominio funcional y cómo funcionan en conjunto para facilitar una seguridad consistente para el sistema como un todo.
- El punto de vista de implementación (*implementation viewpoint*) aplica las tecnologías de seguridad con respecto a los patrones de arquitectura comunes y los componentes del sistema.

Así pues, IIRA propone una visión de la convergencia, basada en la integridad de la seguridad, conjugando los ámbitos de la seguridad informática (*security*) con la seguridad funcional (*safety*), tal como se muestra en la figura siguiente.



Fuente: IIC

Técnicamente, el marco de ciberseguridad del IIC para IIRA toma como punto de partida el estándar IEC 62443, derivado de la ISA-99, que define un modelo basado en zonas y en conductos seguros (*conduits*) para entornos industriales. La versión del estándar publicada en el año 2014 propone el diagrama de la figura siguiente donde se observan las zonas y los *conduits* que las interconectan.



Fuente: IEC 62443 (ISA 99)

Las zonas están delimitadas por sus perímetros y los *conduits* son vigilados por los respectivos cortafuegos (*firewalls*). Además, en la figura también se observa el diseño de capas propuesto por la IEC 62443 (ISA-99), definiendo una zona llamada DMZ (del inglés, *DeMilitarized Zone*) entre las capas de la informática y las comunicaciones (*enterprise network*) y las capas de las redes industriales (*industrial networks*).

A pesar de que la norma propone un modelo de seguridad amplio y potente, la realidad es que el grado de implantación de la misma es muy diferente; en general, cuanto más antiguas son las instalaciones menor es el grado de cumplimiento. Ello se plasma en el análisis de los componentes antiguos ya existentes, o *brownfield*, que describe un entorno donde las nuevas soluciones y componentes deben coexistir e interoperar con las soluciones heredadas existentes. El término *brownfield* se utiliza en contraste con el término *greenfield*, que define a los entornos en los que no hay sistemas heredados, eliminando así tales restricciones.

Así pues, los sistemas del ámbito de las operaciones se desarrollan a menudo como un *brownfield* debido al volumen de las inversiones implicadas en la construcción y readaptación de los procesos industriales que abarcan. Los activos suelen ser de muy larga vida y reflejan inversiones masivas en pruebas operacionales, de fiabilidad y de seguridad. Por lo tanto, en estos casos no es económicamente ni técnicamente factible reemplazar a corto plazo equipos y aplicaciones existentes.

Firewall

Elemento de seguridad compuesto de software y hardware que tiene por finalidad monitorizar y filtrar el tráfico de la red que pasa a través de él en función de las políticas de seguridad.

La mayoría de las instalaciones industriales contienen equipos que según las normas del ámbito de la seguridad de las tecnologías de la información son antiguos o anticuados. Estos equipos corren un mayor riesgo de ataques que los equipos con las últimas versiones del software con las últimas actualizaciones de seguridad.

Esto es debido a que los sistemas del ámbito de las operaciones tradicionales fueron diseñados para operar en procesos industriales de forma segura y confiable sin ninguna comunicación a ninguna red externa. Así pues, los profesionales del ámbito IIoT deben considerar cuidadosamente las interacciones de los sistemas con el mundo exterior abordar los nuevos retos de seguridad.

Muchos sistemas hoy todavía dependen de la seguridad física (puertas cerradas y guardias) y la oscuridad de los protocolos industriales para compensar la falta de seguridad informática. Pero esta aproximación a la seguridad ya no es aplicable debido a la conectividad masiva. Por ejemplo, las redes cableadas e inalámbricas evitan los controles físicos tradicionales como puertas y muros, porque la red se extiende más allá de los límites físicos. Desde el punto de vista del atacante, los sistemas de operaciones heredados (*legacy*) son ahora un objetivo deseable. Muchos sistemas industriales son sistemáticamente vulnerados debido a las protecciones obsoletas de seguridad. Eventualmente, los atacantes diseñarán planos para monetizar las violaciones del ámbito de las operaciones y la tasa de ataques aumentará previsiblemente.

La implementación de la seguridad para los ambientes de *brownfield* existentes debe ser tan no invasiva como sea posible. Las protecciones perimetrales de la red, como *routers* y *firewalls*, así como las tecnologías de detecciones de intrusos, tanto pasivas como activas, deben implementarse cuidadosamente para reforzar el aislamiento entre el entorno de los sistemas de control y las redes externas a ellos.

Por otro lado, las tecnologías IIoT ofrecen la posibilidad de análisis y control de los sistemas de control utilizando la potencia de la red externa de computación. Esta práctica de usar servidores remotos para almacenar, administrar y procesar datos, en lugar de un servidor o computadora local, se conoce como computación en la nube (del inglés, *cloud computing*). Organizaciones como Cloud Standards Council y Cloud Security Alliance ofrecen una amplia orientación sobre la arquitectura y la seguridad de la computación en la nube. Nos centraremos aquí en los aspectos distintivos que los sistemas de nube de datos deben tener en cuenta en los sistemas IIoT.

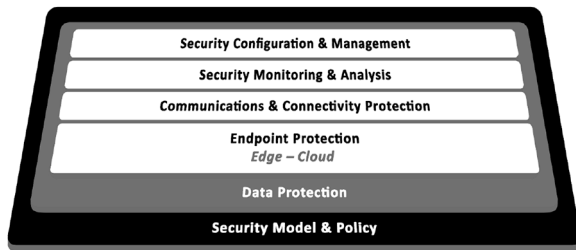
Según el marco de ciberseguridad propuesto por el IIC para IIRA, en un sistema IIoT típico, miles de dispositivos se comunican con un sistema de nube y, posiblemente, almacenan datos sobre ellos. El uso de proveedores de servicios compartidos de terceros crea una serie de límites de confianza que pueden afectar la seguridad y la privacidad. La información que fluye hacia los sistemas de control debe estar adecuadamente asegurada para proteger la seguri-

Router

Elemento compuesto de hardware y software que tiene por finalidad interconectar diferentes redes. Para ello los routers cooperan con otros routers para establecer los caminos óptimos por los cuales reenviar los paquetes entre origen y destino.

dad y la resiliencia de los procesos físicos. Por ejemplo, las credenciales robadas pueden permitir a los atacantes controlar la infraestructura física de forma remota y facilitar ataques simultáneos a muchos de los clientes del proveedor. Por otra parte, los ataques a otros clientes de la nube o la plataforma se pueden propagar, lo que permite ataques contra el propietario del proceso.

Para hacer frente a los retos que plantean el legado del pasado y los retos que plantea el futuro, la IIRA presenta un marco de cuatro capas que se resume en la siguiente figura.

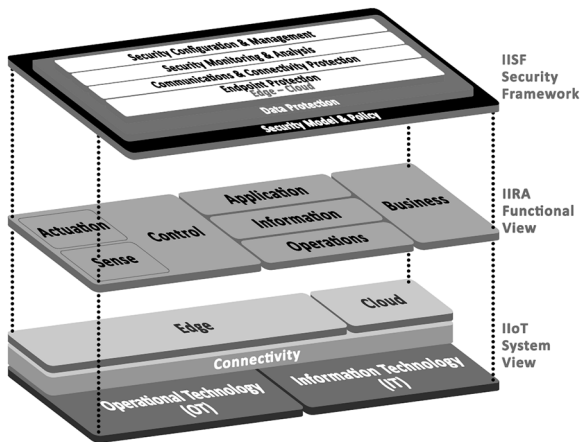


Fuente: IIC

El marco de seguridad contempla los ámbitos siguientes de protección de los datos:

- **Protección de los *endpoints*:** IIRA define el *endpoint* como cualquier elemento de un sistema IIoT que tiene capacidades de computación y comunicación, y expone las capacidades funcionales. Éstos pueden ser dispositivos del *edge*, infraestructuras de comunicaciones, servidores de nube o cualquier otro elemento. La protección de los *endpoints* implementa capacidades defensivas en dispositivos del *edge* y en la nube. Las preocupaciones principales incluyen funciones de seguridad física, técnicas de seguridad cibernética y una identidad autorizada. La protección del *endpoint* por sí sola es insuficiente, ya que los extremos deben comunicarse entre sí y las comunicaciones pueden ser una fuente de vulnerabilidad.
- **Protección de las comunicaciones:** La protección de las comunicaciones y la conectividad utiliza la capacidad de utilizar una identidad autorizada de la protección *endpoint* para implementar la autenticación y la autorización del tráfico. Las técnicas criptográficas de integridad y confidencialidad, así como las técnicas de control del flujo de información, protegen las comunicaciones y la conectividad.
- **Configuración, monitorización y gestión de la seguridad:** Una vez que los puntos finales están protegidos y las comunicaciones aseguradas, el estado del sistema debe ser preservado durante todo el ciclo de vida operacional mediante la monitorización y análisis de seguridad, y la administración controlada de la configuración de seguridad para todos los componentes del sistema.

IIRA propone el mapeo del marco de seguridad con el *viewpoint* funcional y con el *viewpoint* de implementación según se muestra en la figura siguiente.

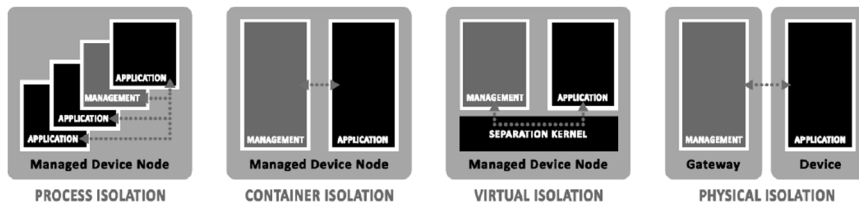


Fuente: IIC

El marco de seguridad para los *endpoints* contempla cuatro modalidades de aislamiento entre el *software* y el *hardware*: de proceso, de contenedor, virtual y físico, tal como describimos a continuación y se muestra en la figura siguiente.

- **Aislamiento del proceso:** Consiste en un aislamiento puramente del *software* gestionado por el sistema operativo para gestionar el aislamiento mediante los privilegios de los procesos. Es el sistema más extendido en la industria actualmente.
- **Aislamiento del contenedor:** Consiste en un aislamiento híbrido *hardware/software* en el que hay CPU (del inglés, *Central Processing Unit*) con distintos niveles de privilegio. Aparece la noción de coprocesador de seguridad y requiere una extensión de *software* para que el sistema operativo pueda integrar este modelo de aislamiento.
- **Aislamiento virtual:** Consiste en un aislamiento de la capa de *hardware* y de la capa de *software* a nivel del sistema operativo. Aparece la noción de hipervisor, que consiste en una capa de aislamiento del núcleo (kernel) de los sistemas operativos. En la práctica, los sistemas operativos creen que están instalados sobre un *hardware* real pero en realidad lo están sobre un *hardware* emulado por el hipervisor. Ello permite realizar cambios en el *hardware* físico sin que los sistemas operativos se den cuenta. Este tipo de aislamiento se conoce como «virtualización».
- **Aislamiento físico:** Consiste en un aislamiento basado en un principio físico que impide una comunicación no deseada. Un ejemplo son los llamados «diodos de datos» o *gateways* unidireccionales, según la terminología de los estándares IEC 62443 y la NIST 800-82. Los diodos de datos sólo permiten físicamente la comunicación en un sentido. Las primeras implementaciones se basaban en eliminar el cable físico del canal de retorno. Actualmente hay implementaciones basadas en un sistema óptico unidi-

reccional donde los fotones sólo pueden ir en un sentido. Hoy es considerado el sistema más seguro de aplicación industrial y se utiliza en activos críticos como plantas nucleares.



Fuente: IIC

El marco de seguridad para los *endpoints* que define la IIRA es aplicable directamente a los componentes de la Industria 4.0, formalizados en la arquitectura de referencia RAMI 4.0, que se describe en el capítulo 4.

3.6. Casos de uso y *testbeds*

El IIC fomenta el desarrollo de casos de uso y *testbeds* desarrollados por los miembros del consorcio. Para ello, gestiona un catálogo de *testbeds* disponibles *online* organizados en categorías y, además, en el Internet of Things Solutions IoTSWC (del inglés, *Internet of Things Solutions World Congress*), que cada año se organiza durante el mes de octubre en Barcelona, se habilita una zona de *testbeds* donde los casos de uso y *testbeds* pueden ser contemplados por el público asistente.



Fuente: DOKENSIP

A nivel de demostración, uno de los ejemplos más interesantes para la Industria 4.0 es el *testbed* llamado TSN (del inglés, *Time Sensitive Networking*), también presente en la Feria de Hannover. En la ficha del *testbed* del IIC se especifica el desafío y la solución del mismo.

En cuanto al desafío, las operaciones de fabricación requieren una estrecha coordinación de detección y actuación para realizar de forma segura y eficiente el control del circuito cerrado. Por lo general, estos sistemas se han implementado utilizando una infraestructura de red no estándar o redes estándar

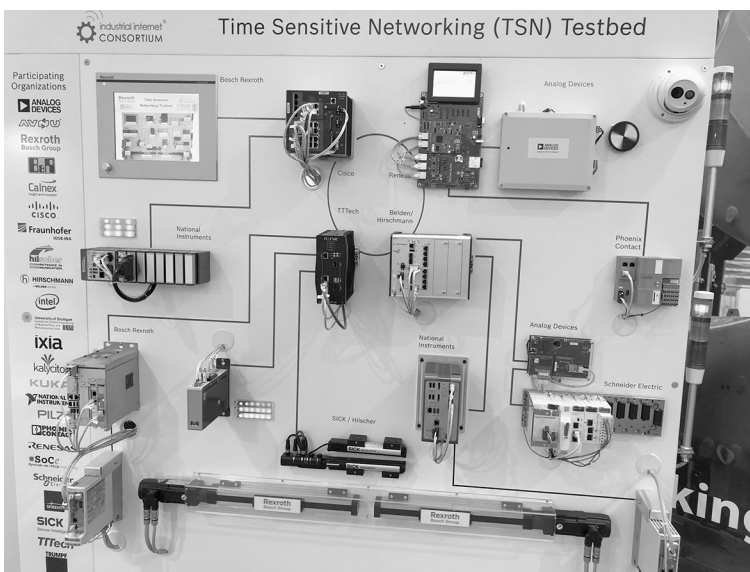
Ved también

Podéis encontrar los casos de uso y los *testbeds* gestionados por la IIC en el siguiente enlace: <https://www.iiconsortium.org/testbeds.htm>

aisladas entre sí (no conectadas). Este enfoque imbrica los dispositivos y los datos para que sean mucho más difíciles de acceder y crea una barrera técnica para IIoT que se basa en la capacidad de consumir datos desde cualquier parte de la infraestructura.

Como solución a esta problemática, las organizaciones IEEE (del inglés, *Institute of Electric and Electronic Engineers*) e IETF (del inglés, *Internet Engineering Task Force*) han estado trabajando para actualizar los estándares de Ethernet (IEEE 802) y la pila TCP/IP (del inglés, *Transmission Control Protocol/Internet Protocol*) permitir el funcionamiento determinista de la red. La tecnología se podrá utilizar para admitir el control y la sincronización en tiempo real de máquinas de alto rendimiento en una única red Ethernet estándar, compatible con la interoperabilidad e integración de múltiples y protocolos de comunicación.

En el desarrollo del *testbed* TSN del IIC han participado empresas como Analog Devices, Bosch-Rexroth, B&R, Cisco, Intel, KUKA, National Instruments, Renesas, SICK AG, TTTech, Xilinx, Schneider Electric, Phoenix Contact, y organizaciones como Avnu o la OPC Foundation, siendo este el *testbed* premiado en el IoTSWC de 2017.

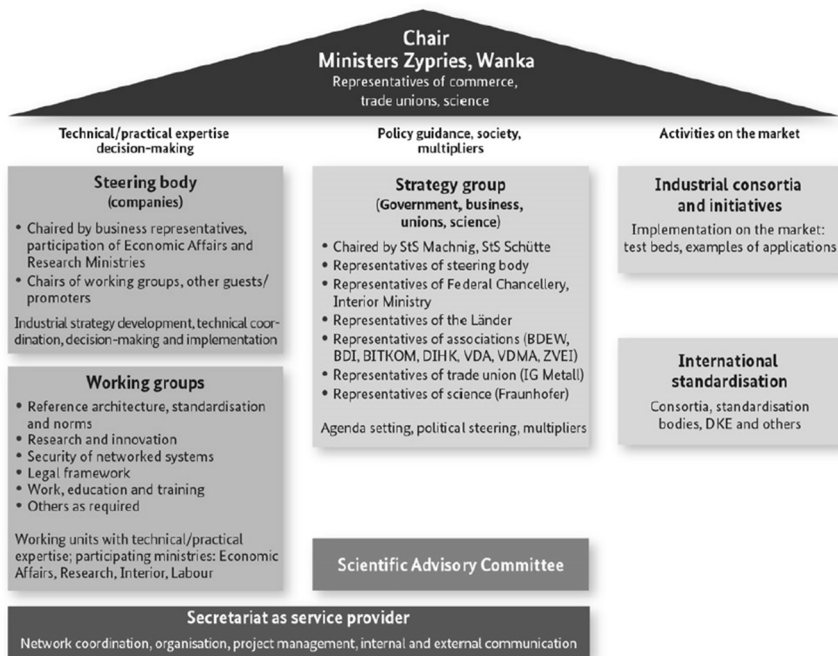


Fuente: Avnu

4. Modelo RAMI 4.0

4.1. Introducción

RAMI 4.0 (del inglés, *Reference Architecture Model for Industry 4.0*) es una iniciativa del gobierno alemán conjuntamente con las organizaciones principales del ámbito de la ingeniería del país para impulsar la Industria 4.0. Fruto del trabajo de desarrollo y estandarización, RAMI 4.0 se presentó como norma DIN 91345 en la feria de Hannover de 2016, y un año más tarde como norma IEC/PAS 63088 en la Feria de Hannover de 2017.



Fuente: Plattform Industrie 4.0

A nivel técnico RAMI 4.0 define dos aspectos fundamentales: una arquitectura multicapa tridimensional (cúbica) que describe la integración de los denominados objetos técnicos (en adelante *assets*, refiriéndose a activos) y la noción de componente i4.0 (*i4.0 component*) que describe el funcionamiento de dichos componentes dentro de la propia arquitectura.

Por un lado, la arquitectura presenta un conjunto de puntos de vista (o contextos) suficientemente rico para afrontar cualquier problema de concepción de un sistema industrial en el marco de la Industria 4.0. Todos los objetos técnicos modelados como componentes i4.0 serán susceptibles de ser analizados bajo los puntos de vista o contextos contemplados por la arquitectura.

Por otro lado, un componente i4.0 es un objeto técnico, tangible o intangible, que tiene valor para la organización. También se denominan activos técnicos, que tenderán a ser activos inteligentes como consecuencia de la implementación de las tecnologías IIoT.

Así pues, RAMI 4.0 se basa en el uso de los denominados componentes i4.0, los cuales son definidos por la IEC/PAS 63088 como elementos con conectividad, capacidad de ejecutar *software* y que pueden operar con cierta autonomía. Al mismo tiempo, los *assets* son susceptibles de ser modelados como componentes i4.0.

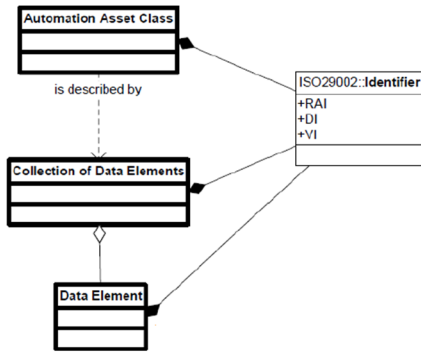
De este modo, el propósito fundamental de la arquitectura es facilitar la cooperación y la colaboración entre *assets*, lo que significa que tienen que estar digitalmente representados y conectados, tanto objetos físicamente tangibles como objetos intangibles, tales como ideas, archivos y *software*.

Así pues, la arquitectura pretende crear reglas de descripción digital para un objeto técnico a lo largo de todo su ciclo de vida, desde su desarrollo y producción, hasta su reciclaje o eliminación. Los componentes i4.0 proporcionan una descripción del objeto, haciendo posible representar virtualmente ese objeto. Para ello se han combinado estándares existentes, tanto para definir la noción de componente i4.0 como para definir los tres ejes del cubo de la arquitectura donde encajarán los distintos tipos de *assets*.

4.2. Origen y motivaciones

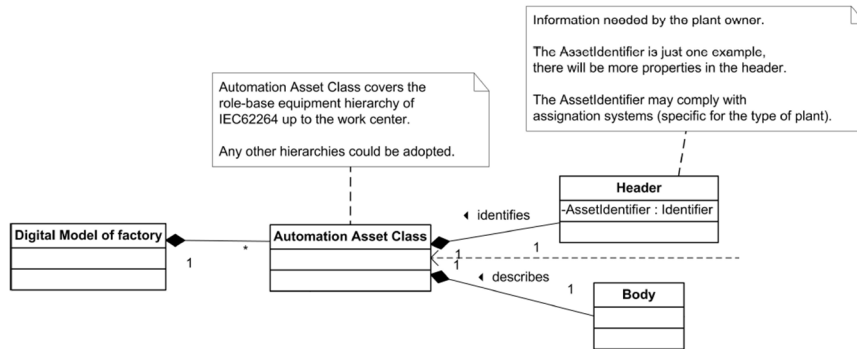
El origen de la arquitectura RAMI se encuentra en la norma IEC 62794 publicada en 2012 (y que fue reemplazada por la norma IEC 62932 en 2016) que propuso una primera definición del componente industrial denominado *automation asset*. Este *automation asset* está orientado a la factoría digital (en inglés, *digital factory*) y se define como un elemento con conectividad, capaz de ejecutar operaciones locales y remotas gestionando un estado definido por un conjunto de atributos.

Para la representación digital de los *automation asset* la norma IEC 62832 utiliza el lenguaje UML, tal como se muestra en el diagrama siguiente. Como vemos, la estructura del metamodelo inicial es simple: cada *automation asset* está descrito por una colección de objetos del tipo *DataElement*. Tanto los *automation assets*, como la colección de *DataElements*, como cada uno de los *DataElements*, están asociados a un identificador ISO 29002.



Fuente: IEC 62832

Así pues, la idea final del estándar IEC 62832 sobre *digital factory* es crear una gran librería llamada DFL (del inglés, *Digital Factory Library*) de modelos estándar de *automation assets*, que se definen mediante una cabecera y un cuerpo, tal como se muestra en la figura siguiente.



Fuente: IEC 62832

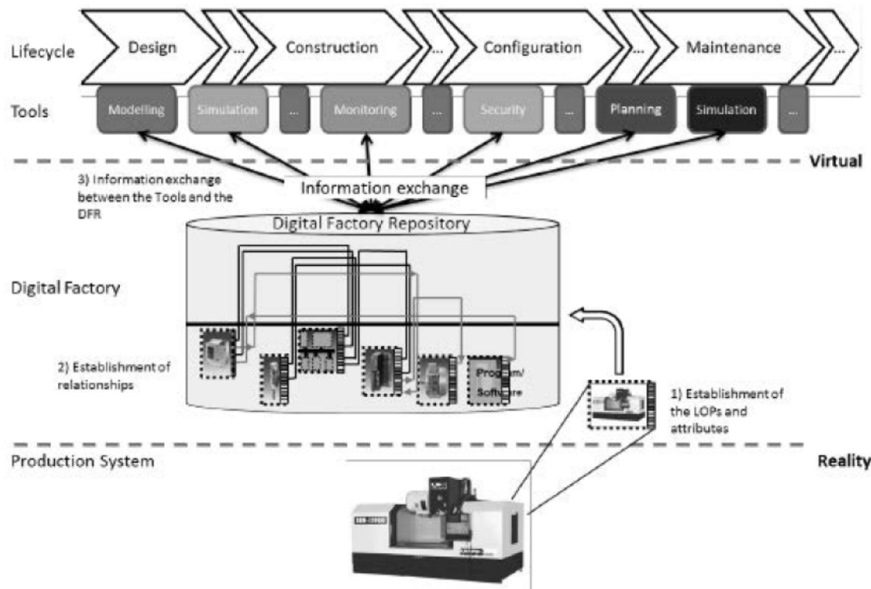
Tomando esta definición, un ejemplo de instancia de un componente *automation asset* se muestra en la figura siguiente.

Automation asset	data elements identifier	Value	Elements
Name of the asset	AAA063	Sensor 29	ID
Name inside the Installation	AAB864	BehTank	Label
Installation date	AAC945	12.24.2013	Reference
Status	AAA019	IO	Reference
	AAB418	17	Reference
	AAB529	230	Reference
	AAC603	3,5	Reference
	AAC019	5,22	Reference
	AAA529	2413	Reference
	AAC529	True	Reference
	AAC113	True	Reference
	AAB305	True	Reference
	AAA530	20	Reference
	AAB719	28	Reference
	AAB805	24	Reference
	AAC017	True	Reference

The table is accompanied by a photograph of a sensor device and a diagram showing the mapping of data elements to a structured format with 'Header' (ID, Label) and 'Body' (Reference) sections.

Fuente: IEC 62832

Así pues, la norma IEC 62832 define la noción de repositorio de componentes digitales, que pueden implementarse tanto en el mundo real como en el mundo virtual, y que se pueden utilizar en cualquier fase del ciclo de vida, tal como podemos observar en el diagrama siguiente. Además, la norma contempla tanto los activos que son medios de producción como los activos correspondientes a los productos producidos.



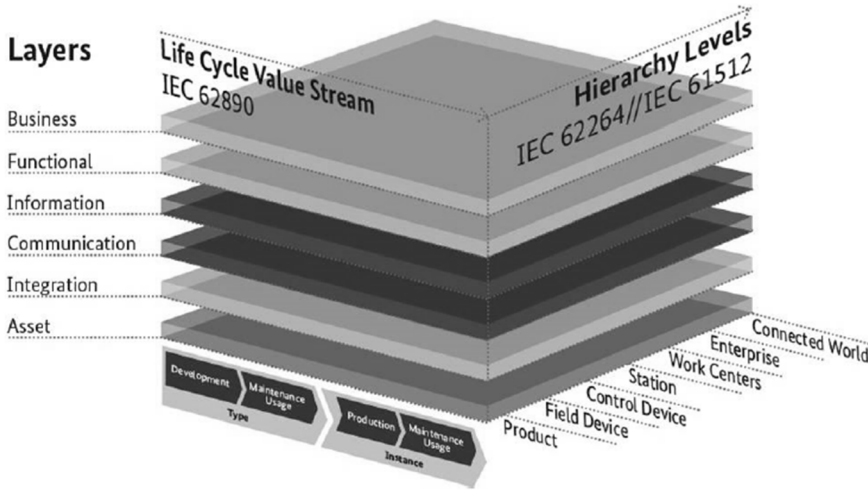
Fuente: IEC 62832

4.3. Arquitectura RAMI

El modelo RAMI 4.0 incorpora conceptos presentes en la norma IEC 62832, que presenta una arquitectura tridimensional con los ejes del ciclo de vida y las capas de interoperabilidad y de niveles de jerarquía, tal como se muestra en la imagen siguiente y describimos a continuación:

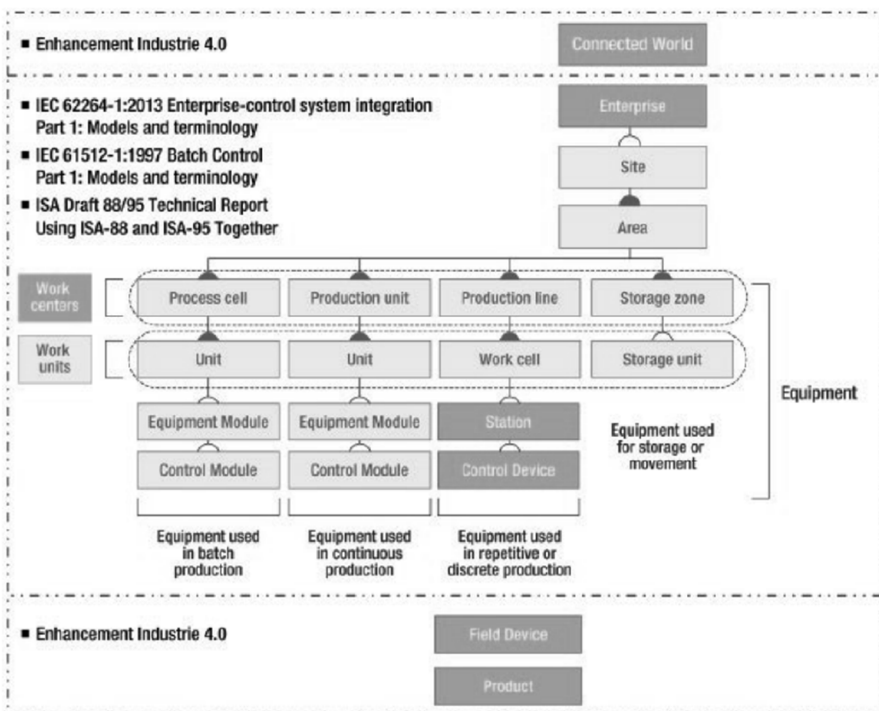
- **Eje del ciclo de vida:** Basado en la norma IEC 62890 que define un modelo de ciclo de vida que combina los ciclos de vida definidos en la IEC 62264 (ISA-95) y la IEC 61512 (ISA-88), es decir, combina los mundos de la fabricación discreta con el mundo de la fabricación por lotes (*batch*), integrando la industria de proceso. El eje del ciclo de vida incluye los campos desarrollo, producción, mantenimiento y uso.
- **Eje de las capas de interoperabilidad:** Basado en el mandato de estandarización europea M490, que versa sobre la producción y distribución de la energía eléctrica bajo el modelo de Smart Grid, y que se basa en la arquitectura SGAM (del inglés, *Smart Grid Architecture Model*). El eje de las capas de interoperabilidad incluye los conceptos negocio, funcional, información, comunicación, integración y dispositivo.
- **Eje de los niveles de jerarquía:** Basado en las normas IEC 62224 e IEC 61512, que corresponden respectivamente a las normas ISA-95 y ISA-88, la primera sobre sistemas de producción discretos y la segunda sobre sistemas

de producción por lotes (*batch*). El eje de los niveles de jerarquía incluye los conceptos: mundo conectado, empresa, centro de trabajo, estaciones, dispositivos de control, dispositivos de campo y producto.



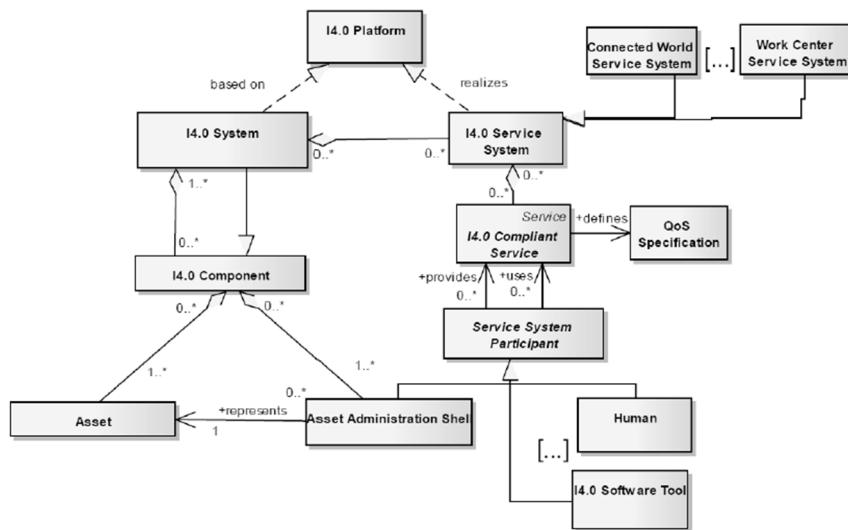
Fuente: IEC/PAS 63088

Como vemos en la figura siguiente, RAMI 4.0 se basa en las propuestas organizativas de ISA-95 e ISA-88, integrando respectivamente los estándares IEC 62264 (basada en la ISA-95) e IEC 61512 (basada en la ISA-88). El bloque central tradicional que define a la Industria 3.0 se ve complementado por las mejoras de la Industria 4.0 tanto en la parte inferior con las mejoras tecnológicas en los dispositivos y productos, así como en la parte superior por la conectividad global.



Fuente: IEC/PAS 63088

Por último, el *status report* «Industrie 4.0 Service Architecture» (Bangemann y otros, 2016) publicado por el VDI/VDE, define un metamodelo UML para formalizar la orientación a los servicios de la arquitectura RAMI 4.0, tal y como se muestra en la figura siguiente. Según el modelo, un sistema i4.0 se puede componer de varios i4.0 *service systems*, distinguiendo dos subtipos. Por una parte los conectados a una red global y por otro lado los conectados al sistema de producción local. Además, el modelo también establece que un componente i4.0 se compone de un activo (*asset*) el cual se representa mediante una *asset administration shell*.



Fuente: VDI

4.4. i4.0 Components

RAMI 4.0 presenta en la norma IEC/PAS 63088 la noción de componente i4.0 (*i4.0 component*), que se caracteriza por estar definido por cuatro conceptos: el activo físico o digital en sí mismo, la *administration shell*, el *manifest* y el *component/resource manager*.

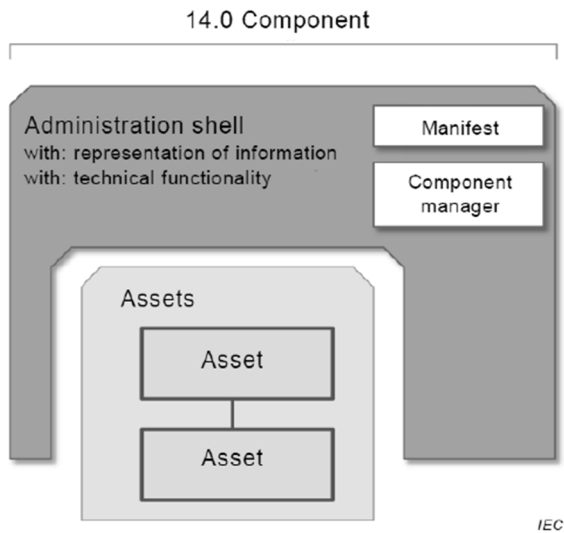
A continuación, se presentan y describen cada uno de estos conceptos, pero es importante destacar que a nivel funcional tanto la *administration shell*, el *manifest* y el *component manager* pueden estar integrados en el propio componente i4.0 (por ejemplo, en un sistema embebido), en un sistema IT de más alto nivel (por ejemplo, en un sistema de computación en la nube) o bien de forma distribuida.

4.4.1. Administration shell

Todo componente i4.0 dispone de una *administration shell*, que se puede traducir como un «caparazón digital» del activo que representa. Así pues, la forma de digitalizar la realidad que la forma de digitalizar la realidad en RAMI 4.0 consiste en colocar «caparazones digitales» a los activos físicos que deben ser digitalizados. El nivel de granularidad del activo susceptible de tener una

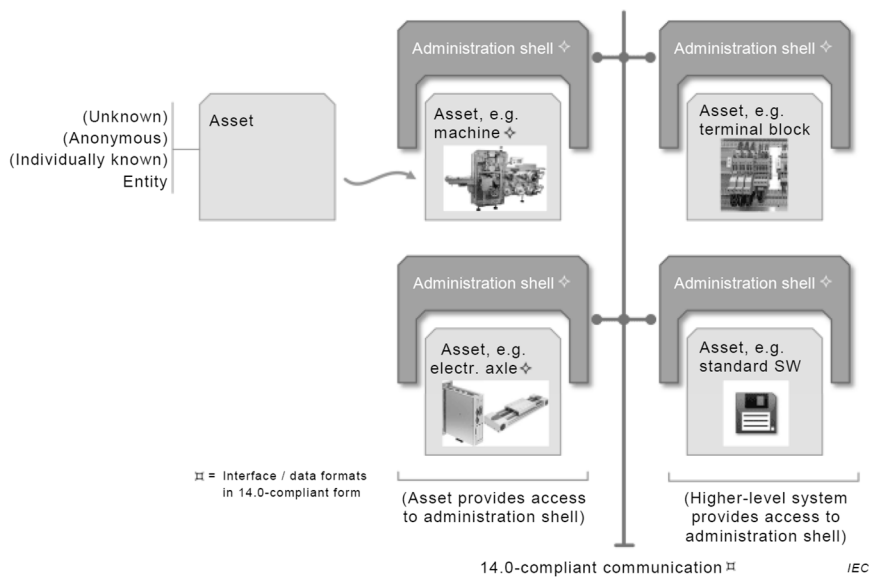
administration shell no tiene límites teóricos. Puede ser desde una simple válvula, un motor eléctrico, una máquina, una celda de fabricación, una línea de fabricación, una planta entera, una organización entera o un intangible como el *software*.

Un componente i4.0 se representa de forma genérica tal como se muestra a continuación:



Fuente: IEC/PAS 63088

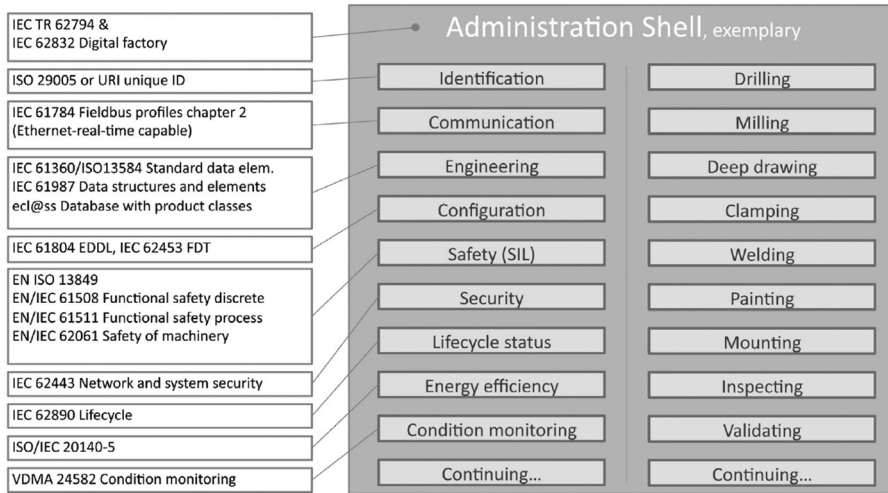
De esta forma, cualquier activo existente es candidato a ser convertido en un componente i4.0 mediante la incorporación de la *administration shell*, de modo que una vez adquirida tiene la capacidad de comunicarse con otros componentes i4.0, tal como vemos en la imagen siguiente.



Fuente: IEC/PAS 63088

De modo genérico RAMI 4.0 identifica un conjunto de funcionalidades que una *administration shell* puede realizar, entre las que destacan la identificación, la comunicación y la configuración. Asimismo, éstas funcionalidades se pue-

den relacionar con estándares ya existentes, tal como se muestra en la figura siguiente. Por ejemplo, la funcionalidad de identificación se podría implementar siguiendo la norma ISO 29005, mientras que la funcionalidad de comunicación se podría implementar mediante la norma IEC 61784.

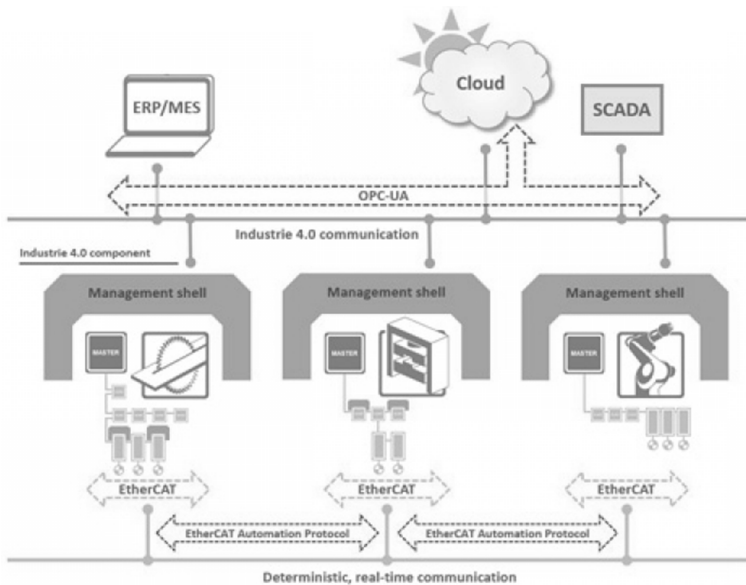


Source: ZVEI

Fuente: ZVEI

Los requerimientos de las comunicaciones en las que participa un componente i4.0 dependen de en qué nivel se está actuando. En niveles cercanos a los dispositivos y al mundo físico se utilizarán con frecuencia protocolos con características de tiempo real. Por contra, en niveles altos, cercanos a las capas de gestión, se utilizarán protocolos con capacidades de modelado de datos.

Además de la capacidad de comunicación, otra de las características de los componentes i4.0 es la capacidad de componerse de forma anidada (*composability*), siguiendo el patrón de diseño *composite*, según el cual un componente puede agregar subcomponentes, y así sucesivamente, tal como se muestra en la figura siguiente. En este caso, las comunicaciones a bajo nivel se podrían realizar con el protocolo EtherCAT y las de alto nivel con OPC-UA, tal y como se muestra en la figura siguiente.

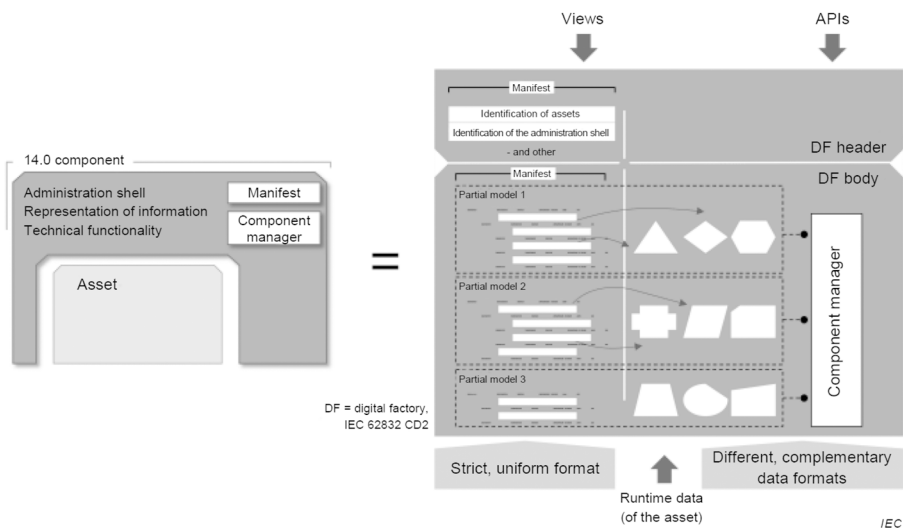


Fuente: OPC Foundation (EtherCAT Technology Group - ETG)

4.4.2. El *manifest*

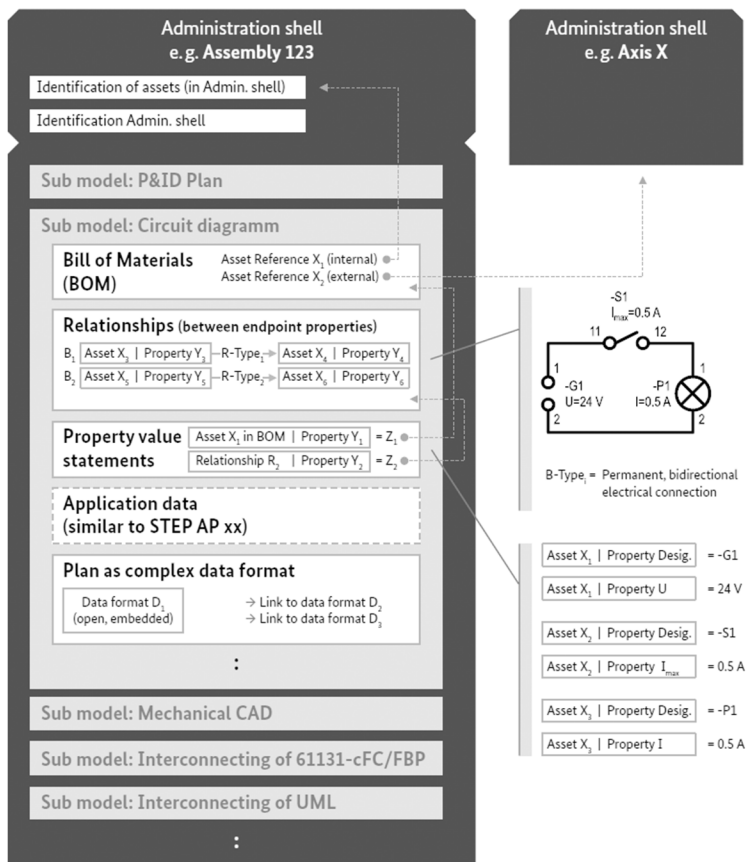
La noción de *manifest* de un componente i4.0 es un puntero a un repositorio (local o remoto) con toda la información, funcional y no funcional, relacionada con el propio componente. Esta información incluye el identificador, así como la documentación técnica, modelos matemáticos, lista de materiales (del inglés, *Bill of Materials* o BoM), modelos digitales como el CAD (del inglés, *Computer-Aided Design*), o modelos de simulación del componente que pueden cubrir distintos aspectos del comportamiento del mismo. En este sentido, el modelo de simulación define formalmente el comportamiento del sistema, y ésta lo puede hacer desde cualquier punto de vista, como el mecánico, electromagnético, térmico, energético, o incluso económico. La simulación multifísica permite el modelado simultáneo de varios puntos de vista. Si el juego de modelos disponible vía el *manifest* es suficientemente completo puede definir el gemelo digital del activo, llamado *digital twin* (Grieves, 2014).

Por tanto, podemos decir que un *i4.0 component* es una versión evolucionada del *automation asset* definido en la IEC 62832, que también dispone de una cabecera y de un cuerpo, el cual puede tantos modelos parciales o submodelos como sea necesario, cada uno de ellos con su parte correspondiente del *manifest*, tal como se muestra en la figura siguiente.



Fuente: IEC/PAS 63088

A partir del modelo de un i4.0 *component* podemos tener varias instancias del mismo que pueden incluir submodelos como el P & ID Plan (*Pipe connection, sensor and actuators connection*), diagramas de circuito, BOM, CAD, programación y comunicaciones de PLC (IEC 61131) o UML. En la figura siguiente se muestra un ejemplo de una instancia de un i4.0 *component*.



Fuente: ZVEI

4.4.3. El *component manager*

El *component manager* (anteriormente denominado *resource manager*) se define como el conjunto de los elementos necesarios para ejecutar el *software* y para comunicarse. Formalmente, el *component manager* son los elementos necesarios para garantizar que el componente i4.0 se pueda conectar a una arquitectura SOA.

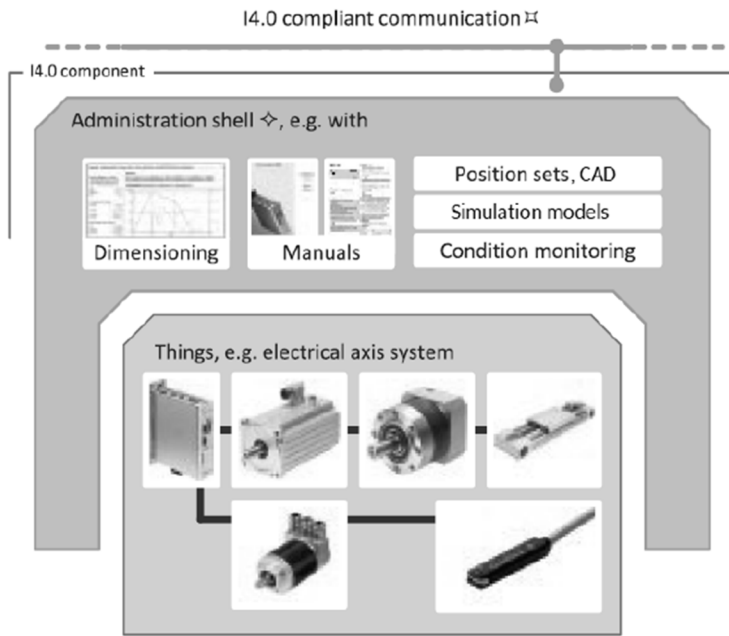
4.4.4. El *asset*

A la noción de *automation asset* el i4.0 *component* añade la capacidad de composición recursiva, incorporando conceptos del mundo de la ingeniería del *software* como los patrones de diseño para objetos y agentes. Así pues, un *asset* puede tener varias *administration shells* y una *administration shell* puede englobar a más de un *asset*.

Teniendo en cuenta la arquitectura propuesta en el apartado anterior, los *assets* pueden clasificarse según sus capacidades de comunicarse, siendo de máximo nivel en un componente i4.0. A continuación, proponemos una descripción de cada nivel de comunicación de un *asset*:

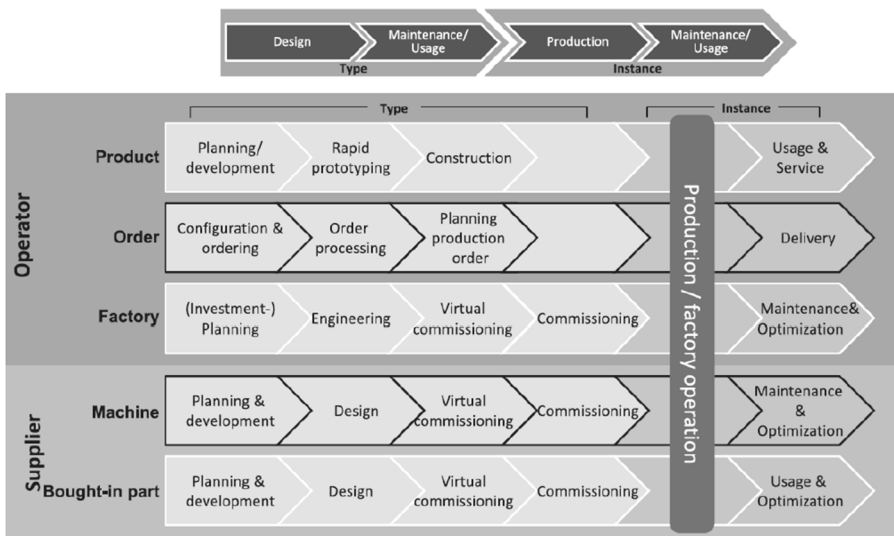
- **Assets sin capacidad de comunicación:** Se trata de i4.0 *components* que no tienen la capacidad de comunicarse.
- **Assets con capacidad de comunicación pasiva:** El propio portador de la información es pasivo, pero permite que sus datos sean leídos y el activo sea identificado (por ejemplo: códigos de barras, etiquetas RFID, etc.).
- **Assets con capacidad de comunicación activa:** El *asset* físico que es capaz de participar activamente en la comunicación en red se considera como un componente básico en términos de comunicación digital. Se identifica activamente al tener contacto con la red y se conecta para participar en la comunicación.
- **Assets con capacidad de comunicación i4.0:** El *asset* que tiene todas las capacidades de satisfacer las demandas de un usuario del sistema de servicio i4.0 también se considera un componente i4.0, que es autónomo, puede jugar todos los roles posibles y puede ser pasivo, activo, enviar y recibir a la vez. Para que un *asset* i4.0 sea capaz de proporcionar información, al menos deberá tener una conexión con el activo mediante un sistema de información. Esto significa que la capacidad de comunicación pasiva es un requisito previo mínimo. Así pues, para ayudar a implementar la Industria 4.0 se pueden completar las funciones de cada activo mediante la incorporación de servicios en la nube, mediante servicios que actúan como *proxy* de servicios de una arquitectura SOA.

Es importante destacar que RAMI 4.0 no entra a definir los aspectos tecnológicos de la implementación, de modo que los i4.0 *components* se pueden comunicar mediante un sistema de comunicaciones concretado en la fase denominada *technology mapping*, en la que se especifica la tecnología a utilizar, como por ejemplo OPC-UA o MQTT, entre otros.



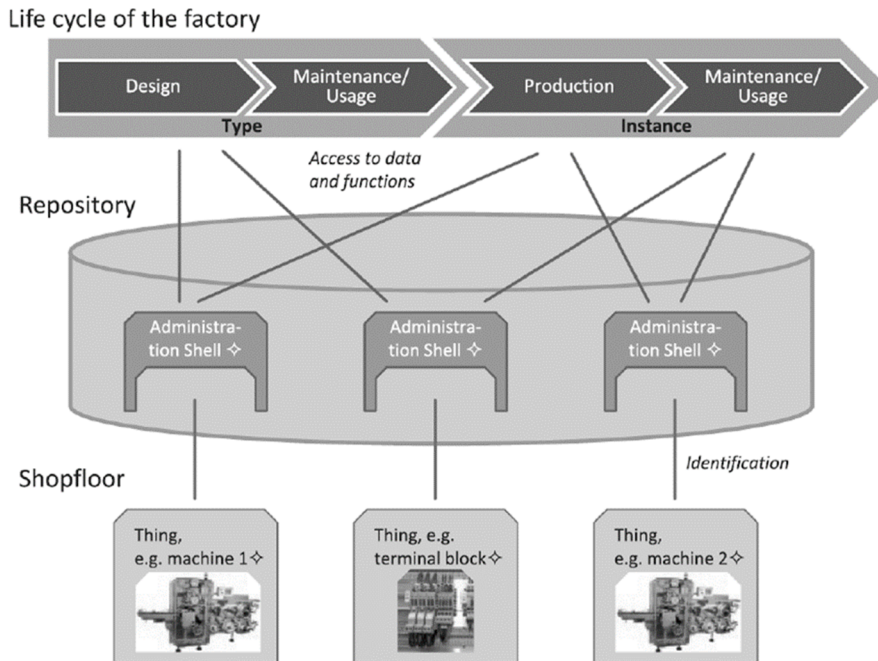
Fuente: VDI

Otro punto a tener en cuenta, son los ciclos de vida previstos en RAMI 4.0, que se dividen en los del operador (propios) y los del suministrador (ajenos). Como vemos en la imagen siguiente, dentro de los ciclos de vida del operador se contemplan los ciclos de fábrica, de producto y de pedido, mientras que en la parte del suministrador se contemplan los ciclos de vida de las máquinas y los bienes de equipo adquiridos a terceros.



Fuente: VDI

Por último es importante destacar que RAMI 4.0 plantea el concepto de repositorio de i4.0 *components* como una versión evolucionada del *Digital factory repository* de la IEC 62832. En la figura siguiente se muestra un repositorio de i4.0 *components* y cómo es compartido a lo largo de todo el ciclo de vida de la factoría.



Fuente: VDI

4.4.5. *Virtual commissioning*

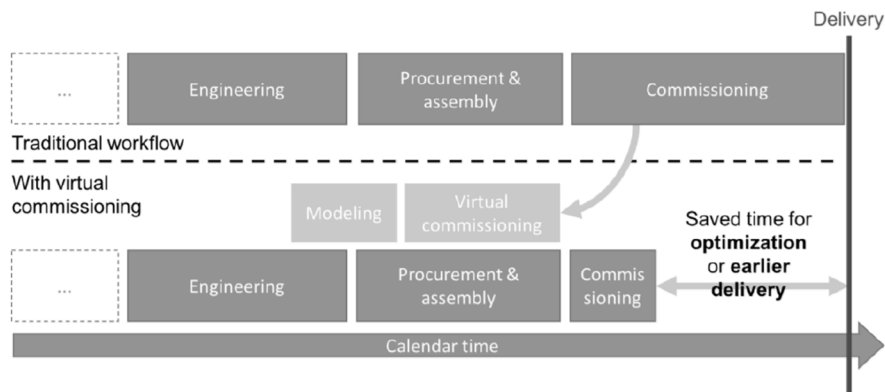
Dentro de una factoría digital (*digital factory*) los i4.0 *components* pueden operar en modo real o en modo simulado. Si todos los i4.0 *components* operan en modo real, las *administration shells* ofrecen servicios de monitoreo de la condición, gestión de la energía, etc. En cambio, si todos los i4.0 *components* operan en modo simulado, estamos ante una fábrica virtual (*virtual factory*), muy útil por ejemplo en tareas de entrenamiento y formación. Además, también hay la posibilidad de funcionar en modo híbrido, mezclando algunos componentes en modo real y otros en modo simulado, por ejemplo para desarrollar o poner en marcha nuevos i4.0 *components*.

Así pues, la existencia de un repositorio de i4.0 *components* con la capacidad de actuar tanto en modo real como en modo simulado, ofrece la posibilidad de implementar puestas en marcha virtuales de sistemas, dando lugar al denominado *virtual commissioning*.

Desde el punto de vista de los sistemas de producción para la Industria 4.0 el *virtual commissioning* juega un papel fundamental, apareciendo en los ciclos de vida de los bienes de equipo descritos en RAMI 4.0, las máquinas y la propia fábrica. En Industria 4.0, el *virtual commissioning* consiste en la puesta en

marcha de los componentes i4.0 reales interactuando con los *digital twin* de otros componentes, es decir, cuyos comportamientos obedecen a modelos de simulación de los sistemas.

La justificación económica inmediata del *virtual commissioning* es debida a que proporciona una reducción directa de los tiempos de entrega (*delivery time*) tal como se muestra en el gráfico siguiente:



Fuente: Visual Components

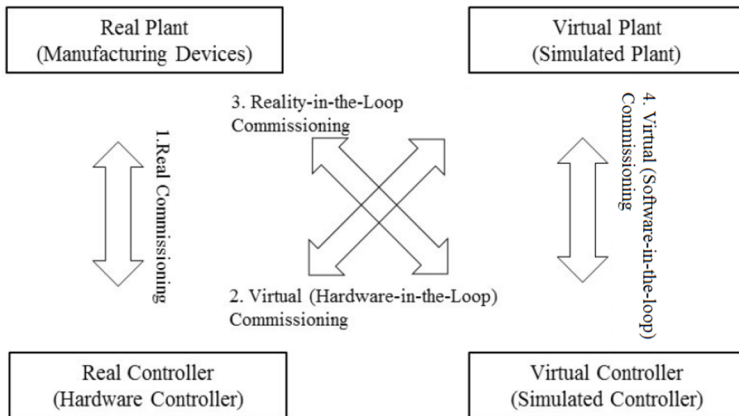
Cabe destacar que la puesta en marcha o *commissioning* puede presentar diferentes variantes según la naturaleza del sistema de control y la naturaleza de la planta. A continuación, enumeramos los tipos de *commissioning* según las distintas combinaciones:

- **Real commissioning:** Combinación de controlador real y planta real. Es la situación más habitual. En este caso se dispone del controlador real (*hardware* y *software*) y la planta dispone de los dispositivos y equipos de fabricación reales.
- **Reality in the loop commissioning:** Combinación de controlador simulado y planta real. En este caso se dispone de un simulador del controlador y de los dispositivos y equipos de fabricación reales. Permite comprobar el funcionamiento de los dispositivos y equipos de fabricación reales.
- **Virtual commissioning (hardware in the loop):** Combinación de controlador real y planta simulada. Se dispone de un controlador real y de los dispositivos y equipos de fabricación simulados. Esto permite el desarrollo del *software* del controlador cuyas entradas/salidas provienen de un simulador¹. El *hardware in the loop* es uno de los campos con más potencial de la Industrial 4.0.
- **Virtual commissioning (software in the loop):** Combinación de controlador simulado y planta simulada. Se dispone de un controlador simulado y de los dispositivos y equipos de fabricación simulados. Esta es la situación ideal para el desarrollo del *software* del controlador. Este modelo de

⁽¹⁾Si el simulador se conecta físicamente igual que el sistema de producción real entonces tenemos un emulador.

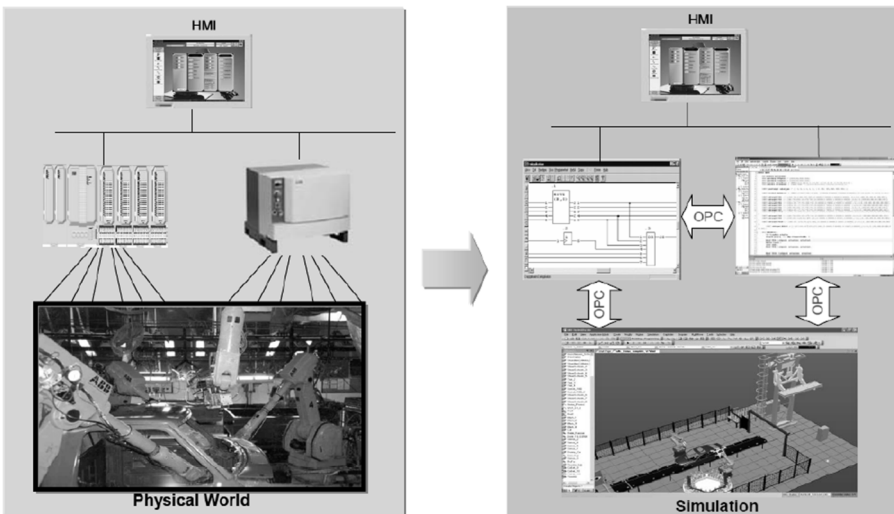
virtual commissioning se puede utilizar como paso previo de un *hardware in the loop*.

En el caso de trabajar con la planta simulada se utiliza el término *model in the loop*, por lo que el *virtual commissioning*, tanto en *hardware in the loop* como en *software in the loop* se engloban en el *model in the Loop*. La figura siguiente, que se basa en la propuesta de Lee (Lee y Park, 2014), ilustra las diferentes variantes existentes:



Fuente: Lee y Park

En la imagen siguiente se muestra un ejemplo de *software in the loop*, ya que tanto la planta como el control son virtuales.



Fuente: Drath

4.5. Casos de uso y *testbeds*

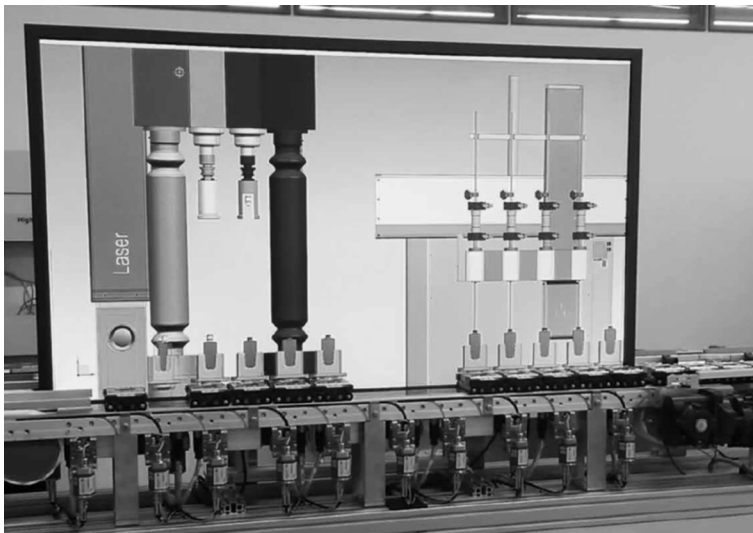
Al igual que el IIC, la Plattform Industrie 4.0 (organización que desde Alemania impulsa la formalización de la Industria 4.0) realiza una tarea de vigilancia tecnológica para identificar casos reales de aplicación de la Industria 4.0, en particular de la utilización de RAMI 4.0. Para ello gestiona un catálogo de casos de uso y *testbeds* organizados por localización geográfica y consultables *online*.

A nivel de demostración, en el contexto de la Feria de Hannover de 2017 la Industrie 4.0 Plattform presentó un prototipo de sistema ciberfísico desarrollado por Siemens llamado «i4.0 Demonstrator», consistente en una línea de transferencia (*transfer*) típica de sectores como la farmacia o la cosmética, de llenado de frascos, montaje del tapón y serigrafiado final de la botella, que tenía una parte implementada físicamente y el resto desarrollado en modo virtual.

La idea de este *testbed* es mostrar las posibilidades del desarrollo de un sistema de producción a partir de su definición digital previa (*digital twin*), que incluye la geometría física y los modelos de simulación de su comportamiento de los planos mecánico (resistencia de materiales, comportamiento dinámico), eléctrico, térmico y energético, entre otros. En este caso, dos equipos de ingeniería podrían estar trabajando en paralelo en la construcción física de una mitad del sistema, integrándolo y validándolo con el modelo digital de la otra mitad, tal como se muestra en la imagen siguiente.

Ved también

Podéis encontrar los casos de uso y los *testbeds* gestionados por la Plattform Industrie 4.0 en el enlace siguiente: <https://www.plattform-i40.de/I40/Navigacion/EN/InPractice/Map/map.html>

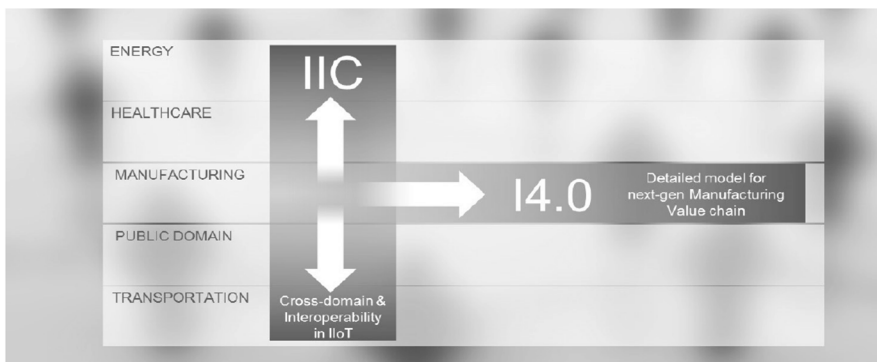


Fuente: VDI

5. Integración IIRA/RAMI

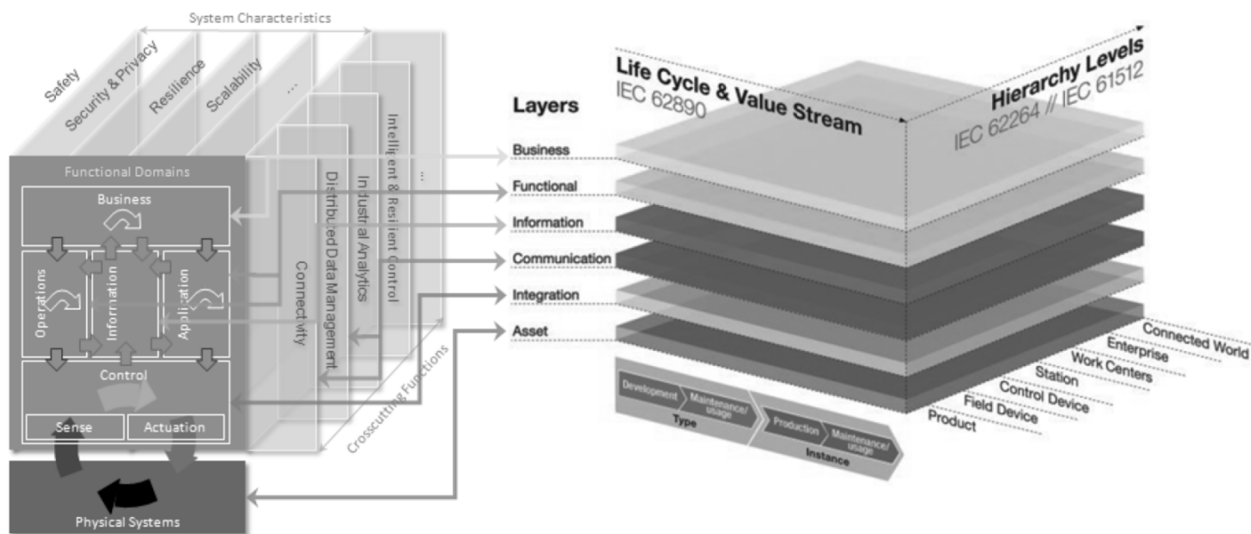
A finales de 2015, se inició un proceso de aproximación entre los grupos de trabajo de las respectivas arquitecturas RAMI 4.0 e IIRA, que se hizo evidente durante la Feria de Hannover de 2016 en una presentación conjunta de la cancillera Merkel y el presidente Obama (en esta edición Estados Unidos era el país invitado) en la que se comunicó la voluntad política de armonizar los estándares. La integración se muestra en el diagrama siguiente en el que podemos apreciar el encaje de IIRA con RAMI 4.0, donde se observa como IIRA plantea una integración vertical global en diferentes sectores (desde el transporte hasta la energía), mientras que RAMI 4.0 propone una integración horizontal centrada en el ámbito del *manufacturing*.

Industrial Internet Consortium and Plattform Industrie 4.0 Collaboration for Interoperability



Fuente: IIC

Siguiendo este camino de colaboración enfocada a la interoperabilidad de las arquitecturas, durante 2016 se sucedieron distintos encuentros de miembros de los diferentes grupos de trabajo y se inició una dinámica de trabajo conjunto. Esta colaboración comenzó a producir los primeros resultados a comienzos del año 2017, tal como se muestra en la figura siguiente donde se observa un mapeo de las capas de ambas arquitecturas (Lin y Murphy, 2017). Como se puede observar, ambas arquitecturas presentan modelos tridimensionales como marcos de trabajo en los que se pueden ubicar los diferentes conceptos abordados. La descomposición de los ámbitos se realiza por la intersección de tres ejes, siguiendo el esquema iniciado por CIMOSA en los años ochenta.



Fuente: IIC y Plattform Industrie 4.0 Joint Whitepaper

Por otro lado, el documento de la ACATECH «Industrie 4.0 in a Global Context» publicado en el año 2016 (Kagermann y otros, 2016) analiza las dinámicas de competición/cooperación desde la perspectiva de la Industria 4.0. En el documento, los expertos de todos los países de la encuesta identifican la creación de redes y la digitalización como las áreas tecnológicas clave donde hay una necesidad de cooperación, tomando especial relevancia la adquisición de datos, su transmisión a través de las redes de comunicación, el procesamiento y análisis de los mismos para la obtención de conocimiento. En todos estos ámbitos se destaca la importancia de la utilización de estándares para facilitar la interoperabilidad de las diferentes tecnologías.

Además, los expertos también apuntan que el reto principal de establecer normas y estándares para la Industria 4.0 es la cooperación entre los países, las instituciones y las empresas. En esta dirección, los expertos identifican diferentes maneras de cooperar para impulsar la normalización y desarrollar soluciones innovadoras, incluyendo la cooperación sectorial e intersectorial, la cooperación con proveedores y con competidores, y, finalmente, la cooperación con empresas globales.

Para fomentar esta cooperación, los expertos consideran que los instrumentos más eficaces son los bancos de pruebas (del inglés, *testbeds*) para el desarrollo de prototipos y la implementación pragmática de nuevas soluciones, junto con plataformas de integración específicas de la industria para facilitar la adopción generalizada de las soluciones. Siguiendo esta recomendación, tanto en Europa como en Estados Unidos se pone especial énfasis en el desarrollo de bancos de pruebas, como es el caso de IIRA y RAMI. En cambio, vemos como China, Japón y Corea del Sur se centran más en las plataformas de integración específicas de la industria.

Los bancos de pruebas son, por tanto, una buena manera para que las pymes y *start-ups* cooperen con otras grandes corporaciones, ya que permiten que las innovaciones se transformen rápidamente y pragmáticamente en soluciones comercialmente viables. A continuación, las empresas difunden los estándares técnicos establecidos en los bancos de pruebas mediante sus extensas redes de proveedores y clientes. Debido a los amplios recursos a su disposición, las grandes corporaciones pueden participar en una variedad de organizaciones y redes internacionales de normalización.

En consecuencia, es importante garantizar que las empresas y en particular las *pymes* de cada país se involucren en los debates internacionales sobre la normalización desde una fase temprana. Además de los bancos de pruebas, las soluciones de plataforma específicas de la industria pueden ayudar a estas empresas y pymes a reducir los riesgos de inversión, aprovechar las sinergias en el establecimiento de estándares y comunicar con éxito sus estándares a sus clientes.

Por último, las organizaciones académicas y las asociaciones profesionales también pueden desempeñar un papel valioso en la orquestación de la cooperación en las plataformas específicas de integración de la industria. En general, los expertos que participaron en la encuesta esperan que la cooperación permita mejorar los conocimientos técnicos, especialmente en lo que respecta a la seguridad de los datos y los modelos de negocio, así como reducir los tiempos de desarrollo y evitar soluciones redundantes.

Bibliografía

- Anderson, C.** (2012). *Makers: The New Industrial Revolution*. Nueva York: Crown Publishing Group.
- Bajer, M.** (2014). «Dataflow in Modern Industrial Automation Systems. Theory and Practice». *International Journal of Applied Control, Electrical and Electronics Engineering (IJACEEE)* (vol. 2, núm. 4).
- Bangemann, T.; Bauer, C. y otros** (2016). *Industrie 4.0 Service Architecture: Basic concepts for interoperability*. Status Report. Düsseldorf: VDI.
- Baur, C.; Wee, D.** (2015). «Manufacturing's Next Act» [en línea]. Nueva York: McKinsey & Company, Inc. <https://www.mckinsey.com/business-functions/operations/our-insights/manufacturings-next-act>
- Boër, C. R.; Dulio, S.** (2007). *Mass Customization and Footwear: Myth, Salvation or Reality?* Londres: Springer-Verlag. DOI 10.1007/978-1-84628-865-4
- Booth, D; Haas, H.** (2004). *Web Services Architecture*. W3C Working Group Note 11 February 2004 [en línea]. <https://www.w3.org/tr/ws-arch>
- Bussmann, S.** (1998). «An Agent-Oriented Architecture for Holonic Manufacturing Control». *Proceedings of the First Open Workshop of IMS Europe*. Lausana, Suiza.
- Christensen, J.** (1994). «Holonic Manufacturing Systems: Initial Architecture and Standards Directions». *First European Conference on Holonic Manufacturing Systems, European HMS Consortium*. Hannover, Alemania.
- Funch, F.** (1995). «Holarchies». *World Transformation* [en línea]. <http://www.worldtrans.org/essay/holarchies.html>
- Geissbauer, R.; Vedso, J.; Schrauf, S.** (2016). *Industry 4.0: Building the digital enterprise*. 2016 Global Industry 4.0 Survey. Londres: PwC.
- Gershenfeld, N.** (2005). *Fab: The Coming Revolution on Your Desktop--From Personal Computers to Personal Fabrication*. Nueva York: Basic Books.
- Grievés, M.** (2014). «Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication». Michael W. Grievés, LLC Whitepaper.
- IIC** (2015). *Industrial Internet Reference Architecture – IIRA*. Industrial Internet Consortium Specification.
- IIC** (2016). *Industrial Internet of Things. Volume G4: Security Framework*. Industrial Internet Consortium.
- Jeschke, S.** (2013). *Cyber-Physical Systems – History, Presence and Future*. Aquisgrán: RWTH Aachen University / Industrial Advisory Board / Faculty of Mechanical Engineering.
- Kagermann, H.; Anderl, R.; Gausemeier, J.; Schuh, G.; Wahlster, W.** (ed.) (2016). *Industrie 4.0 in a Global Context Strategies for Cooperating with International Partners*. Múnich: Herbert Utz Verlag.
- Kagermann, H.; Wahlster, W.; Helbig, J.** (2013). *Recommendations for Implementing the Strategic Initiative INDUSTRIE 4.0*. Final Report of the Industrie 4.0 Working Group. Berlín: Forschungsunion / Acatech.
- Kemppainen, P.** (2016). «Pharma Industrial Internet: A Reference Model Based on 5G Public Private Partnership Infrastructure, Industrial Internet Consortium Reference Architecture and Pharma Industry Standards». *Nordic and Baltic Journal of Information and Communications Technologies (NBICT)* (vol. 1, pág. 141–162). Doi: 10.13052/NBICT.2016.008
- Koestler, A.** (1968). *The Ghost in the Machine*. Nueva York: Macmillan.
- Kosanke, K.; Vernadat, F.** (1992). «CIM-OSA: A Reference Architecture for CIM». *Proceedings of the IFIP TC5/WG 5.3 Eight International PROLAMAT Conference, Man in CIM, -Tokio, Japón, 24-26 de junio de 1992*.

Lee, C. G.; Park, S. C. (2014). «Survey on the virtual commissioning of manufacturing systems». *Journal of Computational Design and Engineering* (vol. 1, núm. 3, pág. 213-222). Doi:<https://doi.org/10.7315/jcde.2014.021>.

Lin, S-H.; Murphy, B. y otros (2017). «Architecture Alignment and Interoperability». An Industrial Internet Consortium and Plattform Industrie 4.0 Joint Whitepaper. IIC:WHT:IN3:V1.0:PB:20171205.

Lusch, R. F.; Vargo, S. L. (2006). «Service-dominant logic as a foundation for a general theory». A: R. F. Lusch; S. L. Vargo (ed.). *The service-dominant logic of marketing: Dialog, debat, and directions* (pág. 406-420). Armonk / Nueva York: EM Sharpe.

Marik, V., Pechoucek, M. (ed.) (2000). *Proceedings of Holomas 2000 – First International Workshop on Industrial Applications of Holonic and Multi Agent Systems*. Londres.

Milner, R. (1975). «Processes: A Mathematical Model of Computing Agents». *Studies in Logic and the Foundations of Mathematics* (vol. 80, pág. 157-173).

OMG (2006). *The OMG and Service Oriented Architecture*. Object Management Group.

Rifkin, J. (2011). *The Third Industrial Revolution: How Lateral Power Is Transforming Energy, the Economy, and the World*. Londres: St. Martin's Press.

Schekkerman, J. (2004). *How to Survive in the Jungle of Enterprise Architecture Frameworks: Creating or Choosing an Enterprise Architecture Framework*. Bloomington / Indiana: Trafford Publishing.

Sifakis, J.; Henzinger, T. A. (2006). «The Embedded Systems Design Challenge». *Proceedings of the 14th international conference on Formal Methods* (pág. 1-15). Hamilton / Canada, 21-27 de agosto de 2006. Berlín: Springer-Verlag.

Sua, H. (1990). «Future Factory System Formulated in Japan (2)». *Techno Japan* (vol. 23, núm. 3, pág. 51-61).

The Open Group (2003). *The Open Group Architectural Framework (TOGAF)*. Enterprise Edition, Version 8.1.

Troxler, P. (2013). «Making the 3rd Industrial Revolution». A: J. Walter-Herrmann; C. Büchling (ed.). *FabLabs: Of Machines, Makers and Inventors*. Bielefeld: Transcrip Verlag.

Williams, T. J. (1992). *The Purdue Enterprise Reference Architecture*. Research Triangle Park, NC: Instrument Society of America.

Wooldridge, M. (1997). «Agent-Based Computing». *Baltzer Journals* (29 de septiembre de 1997). Ámsterdam.

Zachman, J. A. (1987). «A Framework for Information Systems Architecture». *IBM Systems Journal* (vol. 26, núm. 3, pág. 276-292).