

# INDUSTRIA 4.0. UNA PERSPECTIVA DESDE LA CONSTRUCCIÓN NAVAL MILITAR

Ángel RECAMÁN  
Director del Centro Tecnológico de Navantia

## Introducción



E ha hablado y escrito mucho desde que, en mayo de 2012, la Comisión Europea reconoció, con cierto dramatismo, que «Europa no podría sobrevivir de forma sostenible sin una base industrial fuerte y profundamente transformada» (1) y proclamó que *Therefore, we need an industrial revolution*. Esta declaración recogía el resultado de los trabajos que venían desarrollándose en la propia Comisión y en otros ámbitos interesados desde años antes, que recibieron un importante impulso con este reconocimiento.

Las actuaciones se sucedieron de forma creciente, no solo en Europa (2), pudiendo destacarse momentos con especial relevancia, como fueron: la presentación, en abril de 2013 por el Grupo de Trabajo Platform Industrie 4.0 (3) constituido en Alemania, del informe *Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0*, que marcó un hito en la difusión del modelo alemán;

---

(1) Los textos entrecomillados o en cursiva están tomados literalmente de las referencias. En su caso, el autor del artículo ha hecho las traducciones de los textos originales en inglés.

(2) El Gobierno de Estados Unidos hizo una reflexión similar, a la vista de la pérdida de protagonismo de la industria manufacturera en este país, y lanzó la *National Network for Manufacturing Innovation (NNMI)*. El 16 de diciembre de 2014, el Congreso firmó la ley *Revitalize American Manufacturing and Innovation (RAMI) Act*.

(3) Las asociaciones profesionales alemanas BITKOM, VDMA y ZVEI establecieron la Plataforma *Industrie 4.0* para desarrollar la transformación digital de la industria, asegurando un enfoque coordinado polifacético y multisectorial. En la preparación del documento colaboraron representantes de las empresas alemanas importantes, asociaciones, universidades, centros de investigación, sindicatos y Gobierno.



el lanzamiento por el Gobierno de España de la iniciativa «Industria Conectada 4.0; la transformación digital de la industria española», en octubre de 2015; la reunión anual de 2016 del Foro Económico Mundial, que puso en el centro de la agenda la Cuarta Revolución Industrial, y la presencia conjunta de Merkel

y Obama en la Feria de Hannover de 2016, que dio un impulso definitivo a su difusión con carácter global. En el entorno en el que se desarrolla nuestra actividad, la aparición de las Estrategias Regionales de Especialización Inteligente (RIS3) de Galicia, Andalucía y Murcia, en las que se reconocía la construcción naval como sector estratégico y se la incluía entre las prioridades de dichas estrategias, supuso un impulso directo al nacimiento del Astillero 4.0. Más tarde, la firma en abril de 2017 del acuerdo entre el Gobierno de Australia y la Plataforma alemana se recibió como un reconocimiento de Industria 4.0 a escala mundial. Y en el ámbito mucho más cercano de la construcción naval española, Navantia presentó el embrión del Astillero 4.0 en la Jornada Tecnológica de la Semana Naval de la Armada de septiembre de 2015, que recibió un nuevo impulso con la publicación por el EMA, en julio de 2017, del nuevo Concepto del Apoyo Logístico.

Desde entonces, los conceptos Cuarta Revolución Industrial, Industria 4.0 y Astillero 4.0 se han consolidado apreciablemente y se ha comenzado el proceso de implantación de los mismos, de forma que ya es posible echar la vista atrás y poner el foco sobre aspectos esenciales que es necesario asentar ante el enorme reto que tenemos por delante.

Desde la perspectiva de estos primeros años, está claro que el modelo alemán *Industrie 4.0* adoptado por Navantia pone el foco en la fábrica como centro del universo ciberfísico formado por las cosas materiales y la información digitalizada.

Esta característica esencial es totalmente aplicable a la construcción naval. Sin embargo, aunque se establece claramente la orientación al cliente o al usuario final, se hace de forma insuficiente para dar respuesta a los requisitos específicos de un producto de propiedades tan específicas como es el barco de guerra, que tiene asociados servicios igualmente muy concretos. De ahí la necesidad de complementar y enriquecer el modelo alemán con contribuciones que permitan que el Astillero 4.0 proporcione respuesta a los requisitos mencionados.

Con este objetivo, este artículo, tras un sencillo resumen del concepto de Industria 4.0, presenta tres contribuciones: el espacio tridimensional de Asti-

llo 4.0, la integración horizontal más allá de la cadena de valor económico (introduciendo la idea de la *big* colaboración necesaria) y el dúo conectado que forman el buque inteligente y su gemelo digital.

Para tener una visión completa de la Industria 4.0 en el contexto de la construcción de buques de guerra, es imprescindible leer el excelente artículo «Una versión del Astillero 4.0 de Navantia», de Carlos Merino y Antonio Criado, que se publica en este número.

### Resumen del concepto de Industria 4.0 (*Industrie 4.0*) (4)

La extensa literatura ya desarrollada permite encontrar muchas definiciones, todas enriquecedoras y complementarias entre sí, de Industria 4.0, asociándola a las nuevas tecnologías características de la Cuarta Revolución Industrial, como son el Internet de las Cosas (IoT), el *big data* o la inteligencia artificial. Para mantener la coherencia con la adopción del modelo alemán hecha por Navantia, se prefiere mantener las definiciones extraídas de las referencias canónicas *Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0* e *Implementation strategy Industrie 4.0*.

Así, en la primera de ellas se introducía la Cuarta Revolución Industrial: «Las tres primeras revoluciones industriales se produjeron como consecuencia de la mecanización, la electricidad y las tecnologías de la información. Ahora, la introducción del Internet de las Cosas y los Servicios en el ámbito de la fabricación está impulsando una cuarta revolución industrial. En el futuro, las empresas establecerán redes globales que incorporarán

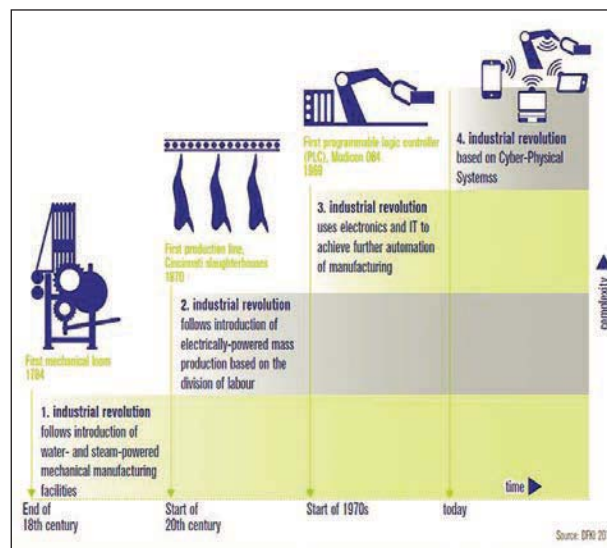


Figura 1.

(4) La iniciativa *Industrie 4.0* fue adoptada como parte del *High-Tech Strategy 2020 Action Plan* en noviembre de 2011; por tanto, está en su séptimo año de desarrollo.

sus máquinas, sistemas de almacenamiento e infraestructuras productivas en forma de *Sistemas Ciberfísicos (CPS)*». La figura anterior sobre *Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0* se ha convertido en un icono de la difusión de la Cuarta Revolución Industrial, y su aparición en la reunión anual de la JECKU (5), celebrada en China en noviembre de 2015, se tomó como una clara advertencia de la seriedad de la apuesta de la construcción naval china por la tecnología y la transformación digital. La información disponible en la actualidad, con la iniciativa gubernamental *Made in China 2025* cogiendo forma, indica que aquellos temores eran totalmente fundados (6).

Tras varios años de trabajo, la Plataforma *Implementation strategy Industrie 4.0* dio una definición madura de Industria 4.0: «El término Industria 4.0 está asociado a la cuarta revolución industrial, el próximo estadio en la organización y control de la cadena de valor completa durante todo el ciclo de vida de un producto. Este ciclo se basa en los deseos de clientes crecientemente individualizados y abarca la concepción, el pedido, el desarrollo, la producción y la entrega al cliente final hasta el reciclado del producto, incluyendo los servicios relacionados con este». Y en ambas referencias se presentan las ocho áreas sobre las que se considera que hay que actuar para la implementación de la Industria 4.0:

- Estandarización.
- Gestión de sistemas complejos.
- Infraestructura de banda ancha para la industria.
- Seguridad.
- Organización del trabajo y diseño del taller.
- Adiestramiento continuo.
- Marco legal.
- Eficiencia de los recursos.

*Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0* e *Implementation strategy Industrie 4.0* introdujeron los cuatro aspectos que son

---

(5) JECKU es el foro más importante de la construcción naval (mercante) mundial, al que asisten los representantes de Japón (J), Europa (E), China (C), Corea (K) y Estados Unidos (U).

(6) El 19 de marzo de 2017, el *Financial Times* publicaba, en su artículo *China's push to become a tech superpower triggers alarms abroad*: «Made in China 2015, launched two years ago, is one of a patchwork of schemes designed to advance the country's tech goals. Modelled on Germany's Industrie 4.0, it forms a blueprint for diverting manufacturing away from the low-value labour intensive plants for which the country is best known into the age of smart technology-doubly useful as the cost of labour rises. Leveraging big data, cloud computing and robotics, it proposes vast automation of industry and aims to lift the domestically produced content of components used in China to 70 percent by 2025, from between zero and 30 percent today».



Figura 2.

necesarios implementar para desarrollar todo el potencial de la Industria 4.0, y que se representan en las cuatro imágenes de la figura 2:

- *Horizontal integration through value networks.*
- *Vertical integration, e. g. within a factory/ or production shop.*
- *Life cycle management, end-to-end engineering.*
- *Human beings orchestrating the value stream.*

Desde su concepción, la *smart factory* se situó en el centro de la Industria 4.0 orientada a la creación de *smart products, procedures and processes*, como muestra la figura 3. En pocas palabras, todo se vuelve *smart* por la capacidad de crear, procesar e intercambiar datos.

En *Smart service welt. Final report* se desarrolla el gran potencial que tiene Industria 4.0 más allá de la propia fabricación, especialmente en el área de los servicios, y se explica que «la fábrica inteligente elabora productos inteligentes, que forman parte de redes compuestas por objetos y máquinas que impulsan el mundo de los servicios inteligentes, para satisfacer las necesidades de los clientes. Después de que los productos salen de la fábrica, se mantienen conectados vía internet, e intercambian cantidades crecientes de datos durante su uso, montañas de datos (*big data*) que constituyen la materia prima más importante del siglo XXI. Estos *big data* se analizan, interpretan,

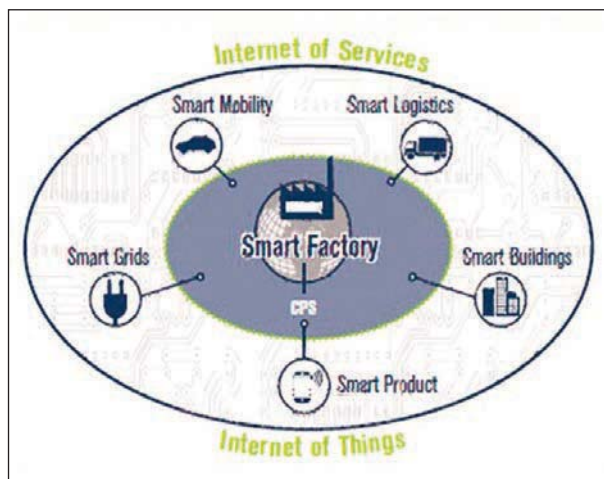


Figura 3.

correlacionan y suplementan para convertirse en *smart data*, que pueden usarse para controlar, mantener y mejorar los productos y servicios inteligentes».

Toda la Industria 4.0 se asienta en la utilización de las nuevas tecnologías digitales que permiten explotar el potencial de los datos. La Comisión Europea estableció en 2012 una estrategia para el desarrollo de dichas tecnologías, que se denominaron «habilitadoras». En

este relevante comunicado, la Comisión definió las KET (7) como «intensivas en conocimiento y asociadas a elevada I + D, con ciclos rápidos de innovación, alta inversión en capital y empleo altamente cualificado. De carácter multidisciplinar y transversal, las KET tienden a la convergencia y la integración». E identificó las siguientes tecnologías habilitadoras clave: micro/nano-electrónica, nanotecnología, fotónica, materiales avanzados, biotecnología industrial y fabricación avanzada (*advanced manufacturing*). Naturalmente, las tecnologías asociadas a la fabricación avanzada tienen la mayor aplicación en Industria 4.0 (8).

Conviene resaltar que junto a la documentación producida por organismos como los citados en referencias anteriores, otras entidades de índole diversa han contribuido de manera importante a desarrollar y consolidar los contenidos de Industria 4.0, y Navantia lo aprovechó para adaptarlos a sus necesidades específicas, pudiendo mencionarse el trabajo hecho por las principales consul-

(7) KET es el acrónimo de *Key Enabling Technologies*.

(8) No hay una relación precisa de estas KET, y Navantia, en su adaptación de Industria 4.0, identificó las trece siguientes: robótica, modelización y simulación, Internet de las Cosas, *big data* y analítica, inteligencia artificial, plataformas digitales, nube, ciberseguridad, realidad virtual y aumentada, impresión 3D, vehículos autónomos, nuevos materiales, y *blockchain*. Los expertos coinciden al señalar que el mayor aprovechamiento de estas tecnologías se produce cuando se consigue aplicarlas simultáneamente, por lo que no hay interés en priorizar unas sobre otras. No obstante, hay opiniones relevantes que señalan la inteligencia artificial como la tecnología que dará todo el sentido a la Cuarta Revolución Industrial.



toras tecnológicas que con sus publicaciones ayudaron a comprender los aspectos más complejos de dichas referencias.

Así, por ejemplo, McKinsey definió en *Industry 4.0. How to navigate digitization of the manufacturing sector* la Industria 4.0 como «la digitalización del sector manufacturero, con sensores embebidos en virtualmente todos los componentes de los productos y de los sistemas de fabricación, sistemas ciberfísicos ubicuos y análisis de todos los datos generados relevantes». Identificó «cuatro grupos de tecnología habilitadoras: I) datos, capacidad de computación, y conectividad; II) analítica e inteligencia artificial; III) interacción persona-máquina; IV) conversión digital a física (robótica e impresión 3D)». Y planteó «cinco pilares de la transformación digital: I) construcción de las empresas de sus capacidades digitales propias; II) potenciación de la colaboración dentro de su ecosistema mediante alianzas, acuerdos estratégicos y cooperación en comunidades; III) gestión de los datos como un activo valioso del negocio; IV) gestión de la ciberseguridad para proteger la propiedad sobre los datos; V) implementación de una arquitectura digital de dos capacidades».

Sin embargo, pese al carácter esencial que tienen las tecnologías digitales, en la Cuarta Revolución Industrial, a diferencia de lo que sucedió en las anteriores, estas tecnologías habilitadoras estarán al alcance de todos los sectores de la economía en todos los países del mundo, por lo que la verdadera clave del éxito estará en las personas que las utilicen. Este es un aspecto que todos los expertos enfatizan y que ya se definía muy tempranamente en *Factories of the future PPP, Strategic multi-annual roadmap*, donde se decía que «la tecnología, aunque juega un rol muy importante, es solamente un término en la ecuación que conduce al éxito económico y al crecimiento sostenible de Europa. Las habilidades de las personas, la estructura organizativa, los objetivos estratégicos a medio y largo plazo y las normas para decisiones financieras son, por lo menos, igual de importantes. La innovación basada en el conocimiento en procesos, productos y sistemas es el elemento clave: innovación orientada a nuevos productos y servicios para todo el ciclo de vida, fabricados de forma sostenible y que den respuesta a las demandas de los clientes y de la sociedad». Así que si los datos son el combustible de la Cuarta Revolución Industrial, las personas son, somos, su alma. Tanto más cuanto la inteligencia ya es una cualidad compartida entre personas y máquinas. Y serán, seremos, las personas las que consigamos, o no, integrar estos ingredientes tecnológicos para alcanzar el éxito.

Naturalmente, todo lo expuesto tiene que contemplarse desde la perspectiva de la educación, comenzando en la enseñanza infantil, continuando con la formación profesional y la universitaria, y manteniéndose durante toda la vida profesional de las personas. Este es un aspecto que también cuenta con el consenso generalizado de organismos y expertos, y ya se contemplaba en *Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0* entre las ocho áreas fundamentales.



En *Industria Conectada 4.0. La transformación digital de la industria española* se precisa que «las competencias requeridas por parte de las empresas industriales cambian con la transformación digital y la evolución de los medios productivos. En consecuencia, según las apreciaciones de la industria, es preciso y urgente que la formación se adapte y se aumente el nivel de la base

laboral mediante la formación en el trabajo y en el sistema educativo».

El *Informe COTEC 2018*, de la fundación para la innovación del mismo nombre, de la que S. M. el Rey es Presidente de Honor, indica que «España se encuentra en desventaja a nivel internacional en cuanto al número de graduados en formación profesional», y que «el reducido número de graduados en formación profesional constituye uno de los déficits de la estructura formativa española». Esta es una debilidad preocupante para la implementación de Industria 4.0, pues «los trabajadores con niveles educativos intermedios cumplen una función relevante en el proceso productivo al ser frecuentemente las personas responsables de aplicar innovaciones».

El informe también destaca el potencial que tiene la formación profesional dual, que «cuenta con larga tradición en países como Alemania, Francia o Austria y supone una vía prometedora para mejorar la inserción laboral y hacer más atractiva la vía vocacional».



También es preciso recordar que la Industria 4.0 tendrá importantes consecuencias en toda la sociedad, especialmente sobre el empleo, que sufrirá grandes alteraciones en su composición, con pérdidas de millones de puestos de trabajo que, al menos inicialmente, parece que no se compensarán con los millones de nuevos empleos que se crearán.

También es preciso recordar que la Industria 4.0 tendrá importantes consecuencias en toda la sociedad, especialmente sobre el empleo, que sufrirá grandes alteraciones en su composición, con pérdidas de millones de puestos de trabajo que, al menos inicialmente, parece que no se compensarán con los millones de nuevos empleos que se crearán.

Esta inquietud la expresaba en *Industria Conectada 4.0. La transformación digital de la industria española* el ministro de Industria, Energía y Turismo: «Al igual que toda revolución tecnológica, la Industria 4.0 plantea retos y



desafíos: ¿qué va a ocurrir en términos de empleo con una creciente presencia en nuestras vidas del Internet de las Cosas, de máquinas inteligentes y de capacidad cada vez mayor de gestionar millones de datos disponibles en la red? Podría pensarse que *a priori* supondría un ajuste, pero, en cambio, puede ser una extraordinaria oportunidad de incrementar el empleo cualificado, siempre que seamos capaces de orientar toda esa capacidad con la debida formación y traducirla en talento y capital humano».

También lo supieron detectar los representantes de los trabajadores, y en *La digitalización de la industria. Área de Estrategias Industriales de CC. OO. Industria*, por ejemplo, se dice que «los trabajadores y sus sindicatos debemos anticiparnos a las consecuencias perniciosas del nuevo modelo, mediante la búsqueda de los medios apropiados para garantizar que esta transformación se gestiona de manera justa, evitando gran parte de las amenazas y aprovechando las oportunidades que puedan aparecer, y para que estas mejoras sean utilizadas de una manera socialmente responsable. Todas con el mismo objetivo: impulsar el potencial de desarrollo del nuevo modelo industrial de forma integradora, generando lugares de trabajo más participativos e igualitarios, que incentiven la cooperación y generen sociedades para todos los trabajadores y ciudadanos». Y se reclama «el papel que tiene que jugar el Estado en este proceso, evitando que el acelerado proceso tecnológico que lo acompaña se produzca con crecimiento sin empleo, mediante la destrucción de más empleo que el que se crea. Debe garantizar la protección social para los que puedan resultar excluidos del mercado de trabajo; además, debe jugar un papel determinante la regulación laboral, competencia del poder legislativo y del Parlamento, y la necesidad de generar marcos de diálogo social permanente que facilite la implantación del nuevo modelo, preservando la pervivencia del estado del bienestar». Y la CEOE (*Plan digital 2020. La digitalización de la sociedad española*) y el CES (*La digitalización de la economía*) aportan contribuciones imprescindibles en el ámbito nacional español. En el *Plan digital 2020* se dice que «es fundamental que los líderes políticos estén convencidos de la importancia de la transformación digital» y «se recomienda un PACTO DE ESTADO PARA LA DIGITALIZACIÓN», apuntando un amplio abanico de estrategias y propuestas en todos los ámbitos de la sociedad. En la misma línea, en *La digitalización de la economía*, el CES aboga por «una estra-



*tegia de país* que aborde de forma integral y transversal los retos y objetivos a lograr por el conjunto de la sociedad, tanto territorial como entre los individuos por edad, renta, conocimientos o habilidades y entre empresas, sobre todo en el ámbito de las pymes». Desde una posición mucho más modesta, Navantia también ha propugnado la idea de un PACTO 4.0 desde las primeras etapas de concepción del Astillero 4.0.

Como era previsible, el Gobierno alemán actuó coordinado, y tras el lanzamiento de Industria 4.0, impulsó la iniciativa Trabajo 4.0 desde el Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales. El informe *Re-Imagining Work. White Paper Work 4.0* de marzo de 2017 recoge los resultados obtenidos tras un extenso proceso de consultas con todos los agentes sociales. La ministra Andrea Nahles concluyó su prólogo a dicho informe con una frase en la que subraya el carácter esencial de la colaboración: *I firmly believe that our model of co-determination and social partnership offers the best foundation for Germany to become a pioneer in shaping decent work in the digital age* (9).

La última fase del modelo de Industria 4.0 es la de su materialización. Aunque las *Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0* e *Implementation strategy Industrie 4.0* son en sí mismas estrategias de implementación, su contenido las hace demasiado complejas para su aplicación práctica. Como ya se ha expuesto, en este campo es especialmente notable el trabajo que están desarrollando algunas consultoras tecnológicas en colaboración con universidades y otros agentes del mundo I + D + i, preparando guías exhaustivas que están siendo instrumentos esenciales para la transformación digital, algunas de las cuales alcanzan la categoría de imprescindibles.

---

(9) La importancia de la cooperación entre todas las partes interesadas es un elemento central de Trabajo 4.0, como muestra el siguiente párrafo: «La cooperación entre agentes sociales, la cogestión y la participación democrática en el desarrollo de las condiciones laborales son elementos esenciales de la economía social de mercado de Alemania, una fuerza estabilizadora en tiempos de crisis y un factor de éxito para la competencia internacional. Para hacer frente con éxito a la transformación digital, es necesario fortalecer los procesos de negociación entre agentes sociales y dentro de las empresas. En particular, se necesita estabilizar las estructuras de negociación colectiva, una base más amplia para involucrar a los trabajadores en sus organizaciones, derechos y recursos adecuados para los comités de empresa y de personal, y una salvaguarda de los estándares de cogestión a nivel nacional y europeo.

El Ministerio Federal de Trabajo y Asuntos Sociales seguirá proponiendo una mayor flexibilidad en la aplicación de los marcos legislativos, sujetos a la existencia de acuerdos colectivos. Tomará medidas destinadas a fomentar el establecimiento de consejos de personal y hará propuestas para impulsar la capacidad de los comités de empresa de llevar a cabo una cogestión efectiva y eficiente en el mundo laboral digital».

De forma mucho más directa, el concepto norteamericano promueve la misma idea de cooperación cuando dice: *The backbone of the NNMI Program is the understanding that America is at its strongest when we work together and make full use of our human resources.*

## El espacio tridimensional 4.0

Aunque la figura 2 incorporada en el apartado anterior da una representación muy expresiva de los ejes de integración digital en la Industria 4.0, no proporciona —ni se ha encontrado en otras fuentes— una visión integrada que permita mostrar el ciclo de vida de los buques de guerra, que constituye la columna vertebral de la actividad de Navantia.

Por ello, se considera necesario definir un sistema de coordenadas que cubra esta carencia y que sirva de marco para el desarrollo de procesos y entidades complejos como los que se tratan en los apartados siguientes. Pese al esfuerzo realizado para obtener la solución más sencilla posible, el resultado es inevitablemente complejo.

Como puede verse en la figura 4, el Espacio Tridimensional 4.0 puede representarse mediante tres ejes, que definen el entorno de Industria 4.0 en el ámbito de la construcción naval militar, o sea, del Astillero 4.0, de manera que:

- El eje de integración de la cadena de valor tiene tres partes, que corresponden al cliente/usuario final (Ministerio de Defensa/Armada española), al astillero y a los proveedores que conforman su cadena de suministro. En la búsqueda de la simplicidad, no se han considerado otras partes relevantes del ecosistema de Navantia, como la Universidad, las distintas administraciones y los sindicatos y asociaciones profesionales. Este es el eje que soporta la Integración Horizontal de Industria 4.0.
- El eje de integración de la información que se intercambia dentro de cada organización, y del astillero en particular, que tiene tres niveles: el inferior corresponde a la parte material o física (talleres, gradas, diques y muelles donde se encuentran los componentes físicos o materiales que alimentan la construcción del barco); el nivel intermedio, que es el que tradicionalmente se denominaba técnico,

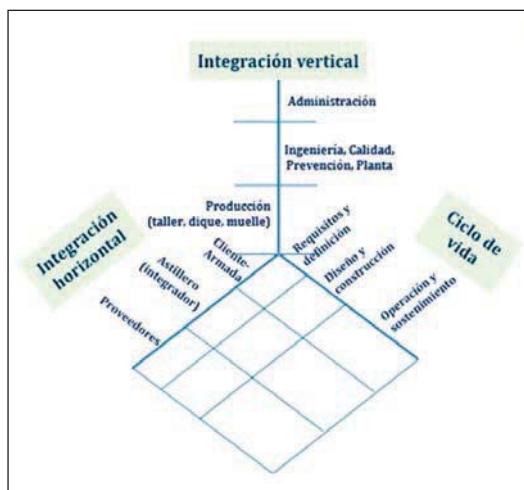


Figura 4.

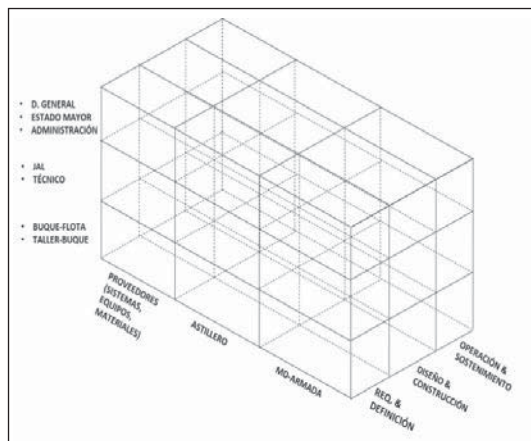


Figura 5.

contiene la ingeniería, la calidad, las compras, etc., y en él se desarrolla el producto virtual; y el nivel superior que alberga la parte de la organización que se encarga de la administración, el negocio, etc. Es el eje de la Integración Vertical de la Industria 4.0.

— El tercer eje tiene carácter temporal y corresponde al ciclo de vida del producto, en nuestro caso el buque y sus sistemas. También contiene tres partes: la de la concepción y definición del barco, a partir de la necesidad y requisitos

establecidos por el cliente; la de su diseño, construcción y pruebas hasta su entrega al cliente, y la del servicio del buque durante toda su vida.

Sobre este eje se desarrolla la ingeniería de principio a fin (*end-to-end*) que requiere la Industria 4.0, y merece destacarse la importancia que esta concede a la ingeniería de sistemas, a la que la *Implementation strategy Industrie 4.0* dedica el apartado 5.3.2 como herramienta necesaria para «gestionar la creciente complejidad de los sistemas en la Industria 4.0, así como posibilitar la ejecución efectiva y eficiente de los proyectos agrupando la ingeniería y la producción».

De esta manera, el Espacio Tridimensional 4.0 tiene 27 subespacios, dando lugar a un ámbito inevitablemente complejo en el que se mueven las personas, las cosas materiales y los datos. A partir de esta idea, conviene hacer las siguientes precisiones, empezando por el cliente, al final de la cadena de valor: en primer lugar, que toda la actividad de la Industria 4.0 se orienta al producto (en nuestro caso el buque) en manos del usuario final, siendo la prestación de servicios inteligentes el objetivo de la empresa en esta etapa; en segundo lugar, que el apartado del buque en construcción es el que corresponde a la fábrica inteligente propiamente dicha, tanto en el ámbito del astillero como en el de sus proveedores que tienen una componente de fabricación; por último, que la doctrina de Industria 4.0 presta relativamente poca atención al proceso inicial de concepción y definición, como si lo diera por resuelto, lo que supone una carencia importante en ámbitos como el de la construcción naval militar y que en el concepto Astillero 4.0 se intenta solucionar.

**La integración horizontal más allá de la cadena de valor económico**

La literatura relacionada con Industria 4.0 hace referencia constante a la cadena de valor, ahora expandida en forma de red de valor, como uno de los elementos vertebradores. En general, el valor al que se refiere el término es el económico, de forma que la satisfacción del cliente o usuario final se asocia a consumidores individuales o empresas que se mueven por motivos muy distintos al de la defensa nacional, a la que Navantia orienta la mayor parte de su actividad. Esto explica que en la literatura se contemplan generalmente escenarios B2C (*business to customer*) o B2B (*business to business*) que, aunque son válidos en gran medida, no cubren algunas necesidades específicas y esenciales de nuestro sector. Un ejemplo típico de esto puede verse en *Industry 4.0: Building the digital enterprise. PWC 2016 Global Industry 4.0 Survey*, publicación notable que muestra los resultados de la encuesta realizada entre 2.000 participantes de 26 países, en la que se observa cómo el sector aeroespacial y de defensa (en el que la construcción naval tiene solo una parte) tiene la menor contribución.

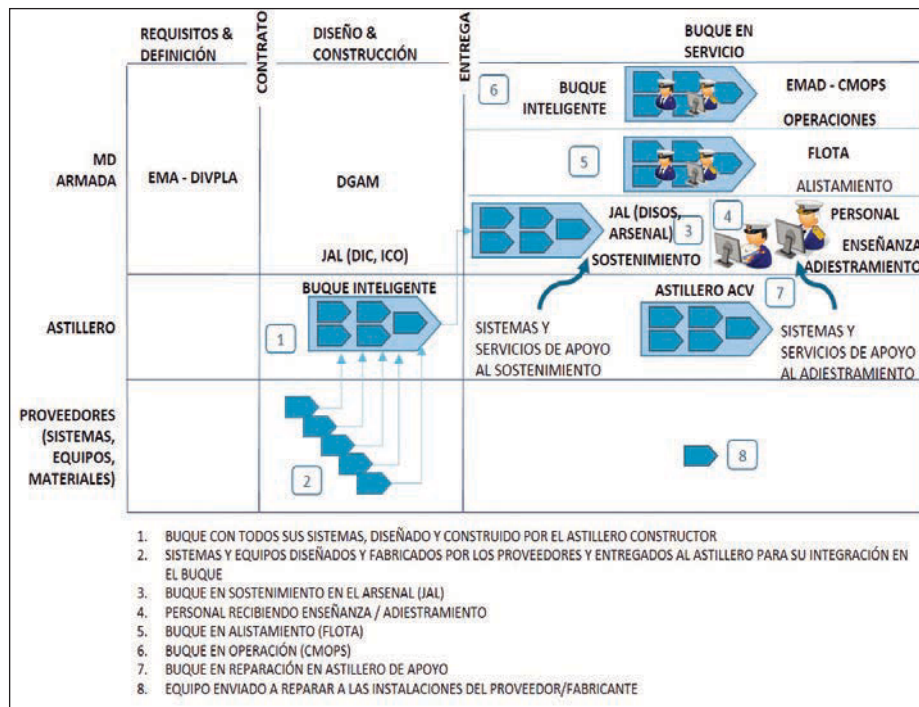


Figura 6.



Bajo este prisma, la cadena o red de valor de la construcción naval militar tiene un objetivo, la defensa nacional, conceptualmente distinto al de los demás sectores económicos, que introduce elementos muy específicos, como son el diseño frente a requisitos rigurosos, la larga vida de los buques de guerra y la unidad de acción que constituyen estos con sus dotaciones, lo que hace necesario que los conceptos generales de Industria 4.0 se adapten a dichas características propias, dando lugar a un entorno particular que afecta al cliente-usuario, al astillero (en sus facetas de diseñador, constructor y sostenedor) y a los proveedores de sistemas, equipos y materiales que completan la cadena de suministro.

En esta cadena o red de valor sui géneris, se establece el concepto de integración horizontal para hacer posible el intercambio masivo de información (datos) entre todos los componentes de la misma. E Industria 4.0 introduce el concepto esencial de que dicho intercambio se mantenga a lo largo de todo el ciclo de vida de los productos (buques), permitiendo o potenciando el desarrollo de servicios aprovechando dichos datos.

De esta manera, la combinación de cadena de valor y ciclo de vida puede representarse como un plano horizontal en el espacio tridimensional del Astillero 4.0, como se muestra en la figura 7. En ella, se representa el correspondiente al nivel inferior, de la realidad física o material, que contiene nueve espacios en los que se desarrollan el conjunto de actividades que convergen en el espacio de la esquina superior izquierda, con el barco en la mar.

No es exagerado decir que el resultado de millones de horas de trabajo de miles de personas durante varios años fructifica en la décima de segundo en la que un misil lanzado desde el barco impacta en el blanco. Hasta llegar a ese momento, el buque es el hilo conductor de todos los esfuerzos, desde el momento inicial en que el EMA prepara el *Documento de Necesidad Operativa*, en la esquina superior izquierda de la figura, dando entrada al diseñador e iniciando el proceso que conduce a la firma de la orden de ejecución y posterior diseño y construcción, hasta su entrega final. (La actividad de diseño se describe en el apartado siguiente al hablar del gemelo digital).

Tradicionalmente se produce una ruptura en el momento en que se entrega el barco, de forma que el diseñador y el constructor prácticamente desaparecen de la vida del mismo, excepto en momentos puntuales si aparecen problemas técnicos que superen la capacidad de los técnicos que intervienen en el apoyo al ciclo de vida. Esta ruptura se extiende a la mayoría de los proveedores que han diseñado y fabricado los equipos y sistemas. Y gran parte de la información que se ha elaborado durante la fase central de diseño, como resultado de la aplicación de millones de horas de ingeniería, no se vuelve a utilizar, no evoluciona, no se aprovecha.

Una de las características esenciales del Astillero 4.0 es, precisamente, el aprovechamiento, en la fase operativa, de la ingente información producida en

la fase de diseño, destacando los modelos matemáticos que han servido para el dimensionamiento de la estructura y de los sistemas del barco, o los modelos hidrodinámicos que se han usado para la obtención de la carena y elementos de propulsión y gobierno. Este aprovechamiento es óptimo cuando participan en él todos los integrantes de la cadena o red de valor; de ahí el nuevo sentido que adquiere la palabra integración se extiende, temporalmente, desde los primeros momentos de la definición del buque hasta el final de su vida y a todos las empresas y organismos que conforman la cadena o red de valor, y esta doble orientación se traduce en una capacidad potencial muy superior del buque y su dotación para cumplir sus misiones.

Como se ha reiterado, la complejidad es otra característica intrínseca de la Industria 4.0, y para afrontarla se incorpora la ingeniería de sistemas como herramienta esencial. Merece profundizar en este aspecto y destacar el carácter profundamente polifacético que debe tener la ingeniería. Así, en *Implementation strategy Industrie 4.0*, al hablar de la ingeniería de sistemas, se plantea el «desarrollo integrado de productos, procesos y sistemas productivos», y se indica que «desde el principio todos los aspectos tienen que desarrollarse en estrecha interrelación y continuar desarrollándose a lo largo de todo ciclo del producto en el mercado». Esto, en nuestro caso, se traduce en que los ingenieros tienen que contemplar los siguientes enfoques simultáneamente:

- Ingeniería para las operaciones de las unidades (misiones).
- Ingeniería para su alistamiento.
- Ingeniería para el sostenimiento de los buques.
- Ingeniería para la enseñanza y adiestramiento del personal de la Armada.
- Ingeniería para el diseño y construcción (perspectiva interna del astillero) del Buque Inteligente; este enfoque tiene que abarcar también la

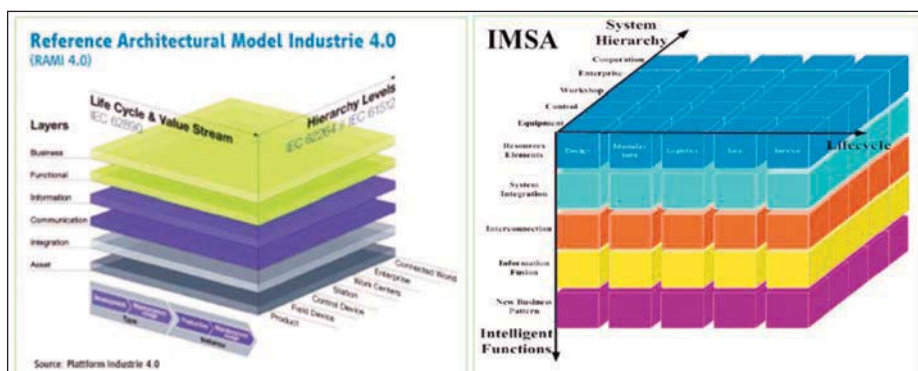


Figura 7.

adaptación de la propia planta (ingeniería de planta) y el adiestramiento del personal propio del astillero y de sus colaboradores externos.

Junto a la ingeniería de sistemas, la nueva situación requiere también nuevas formas de entender la colaboración entre todos los participantes, como se indica en *Smart service welt. Final report*: «El mundo de los servicios inteligentes, *smart service welt*, se centra alrededor de usuarios que reciben servicios en los distintos roles de consumidores, empleados, ciudadanos, pacientes y turistas. En lo que concierne a los consumidores, “servicios inteligentes” significa que pueden esperar obtener la combinación adecuada de productos y servicios para satisfacer las necesidades derivadas de su situación, en cualquier momento y en cualquier lugar. Para ello, los que prestan los servicios necesitan tener un conocimiento profundo de las preferencias y necesidades de sus clientes».

Así que estas nuevas formas de colaboración tienen su Polar en el utilizador del producto, en nuestro caso del buque, cuyo conocimiento en profundidad, superando los esquemas tradicionales, es una nueva necesidad característica de Astillero 4.0. Obviamente, es imprescindible extender este planteamiento en el otro sentido de la cadena de valor, de manera que el Astillero 4.0 también tiene que desarrollar nuevas formas de integración con su cadena de suministro.

Para llevar esto a cabo, se dispone de toda la potencia de las nuevas tecnologías digitales, entre las que en este contexto merecen destacarse la de las plataformas colaborativas, como se explica en *Industry 4.0: Building the digital enterprise*, en el apartado que dedica a las relaciones digitales más profundas e intensas con clientes, características de la Industria 4.0. Estas plataformas, en las que el sector de las TIC está invirtiendo importantes esfuerzos, utilizarán nuevas arquitecturas, que necesitarán marcos de referencia comunes, como el que se intenta establecer en la *Reference Architecture Model Industrie 4.0 (RAMI4.0)* (10) y *Alignment Report for Reference Architectural Model for Industrie 4.0/Intelligent Manufacturing System Architecture*.

---

(10) RAMI4.0 es el resultado de la cooperación entre varias instituciones alemanas relacionadas con la Industria 4.0. Como se explica en *Reference Architecture Model Industrie 4.0, ... in order to achieve a common understanding of what standards, use cases, etc., are necessary for Industrie 4.0, it became necessary to develop a uniform architecture model as a reference, serving as a basis for the discussion of its interrelationships and details. It (RAMI4.0) contains the fundamental aspects of Industrie 4.0, and expands the hierarchy levels of IEC 62264 by adding the “Product” or workpiece level at the bottom, and the “Connected World” going beyond the boundaries of the individual factory at the top. The left horizontal axis is used to represent the life cycle of systems or products, also establishing the distinction between “Type” and “Instance”. Finally, the six layers define the structure of the IT representation of an I4.0 component.*

*Sino-German Industrie 4.0/Intelligent Manufacturing Standardisation Sub-Working Group* (11).

Todo abunda en la necesidad de encontrar una nueva forma de colaboración que supere el significado tradicional de esta palabra y que es difícil caracterizar y cuantificar. Como con tantos otros términos, probablemente aparezca una nueva palabra inglesa que recoja el nuevo significado. Entre tanto, con el ánimo de entenderse, cabe establecer una analogía con la componente digital de la Industria 4.0 y razonar de la forma siguiente: si en el siglo pasado existían los datos y la colaboración, y aquellos crecieron de tal forma que se les asoció el calificativo *big* para explicar su mayor tamaño, añadámoselo también a la colaboración para dar una idea orientativa de lo que se necesita. Esta nueva *big* colaboración se caracteriza, entre otras cosas, por incorporar a los proveedores de sistemas y equipos en las etapas precontractuales de los proyectos, establecer relaciones contractuales que se extiendan más allá de la entrega de los barcos e, incluso, trabajar junto con competidores para dar respuesta a los retos que presentan las nuevas tecnologías.

Por supuesto que esta *big* colaboración tendrá que superar dificultades inherentes a la nueva situación, comenzando por las legales, como ya se anticipaba en *Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0*, donde se decía que «la naturaleza disruptiva de las nuevas tecnologías y su impacto en los aspectos legales (por ejemplo, respecto a información corporativa sensible, responsabilidades, protección de datos, restricciones comerciales, criptografía, etc.) puede suponer una amenaza para la aplicación de la legislación existente».

Pero, por encima de todo, la *big* colaboración depende de la actuación de las personas en todos los ámbitos en que actúan: dentro de cada empresa, atravesando los silos tradicionales; entre las empresas que forman la cadena o red de valor para el desarrollo de los productos inteligentes y la prestación de los nuevos servicios inteligentes asociados, utilizando las nuevas plataformas colaborativas; entre estas y los clientes-usuarios finales; entre las direcciones de las empresas y los representantes de sus trabajadores; entre todos estos y los centros de enseñanza que formarán a las personas en las nuevas materias (no solo tecnológicas)... y en las administraciones públicas, que impulsan y

---

(11) Las notas (5) y (6) a pie de página tratan de poner de manifiesto que los países líderes mundiales de la relevancia de China están apostando por la transformación digital de la industria, con el objeto de que nosotros tomemos plena conciencia de la urgencia con la que debemos actuar. El *Alignment Report for Reference Architectural Model for Industrie 4.0...* supone un fuerte aldabonazo que no debe pasar inadvertido. En ella, se explica que, en mayo 2015, China y Alemania establecieron un subgrupo de trabajo conjunto sobre Fabricación inteligente/Industria 4.0 dentro de la Comisión chino-alemana para la Cooperación en Estandarización. Desde entonces se celebraron tres conferencias, en las que se progresó hasta alcanzar la sintonía entre las arquitecturas de referencia alemana (RAMI4.0) y china (IMSA).

facilitan la gran transformación. Para alcanzar la *big* colaboración, será necesario apoyarse en los elementos de nuestra idiosincrasia y cultura que la favorecen, intentando superar, empezando por reconocerlos (recordemos que los reinos de Taifas fueron un invento español), los que la dificultan.

### **El dúo conectado buque inteligente-gemelo digital**

Aunque la doctrina que sustenta la *Industrie 4.0* está orientada al cliente a través de los productos y servicios inteligentes que se le proporciona, dedica una menor atención al desarrollo del concepto de productos inteligentes, insuficiente para los casos en los que estos son de gran complejidad, como sucede con los barcos de guerra. Sirva como muestra de lo anterior que en *Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0 e Implementation strategy Industrie 4.0* ni se mencionan los *smart products*, ni el *digital twin*.

En la *Estrategia de innovación de Andalucía 2020*, dedicada al mundo de los servicios inteligentes, se da un paso importante en la definición de los productos inteligentes: «El término “productos inteligentes” se aplica a objetos, componentes y máquinas que están equipados con sensores, controlados por *software* y conectados a Internet. Estos sensores recogen datos de todo tipo, los analizan y los comparten con otros equipos. La fábrica inteligente elabora productos inteligentes que posibilitan e impulsan los servicios inteligentes, los cuales se prestan para dar respuesta a las necesidades de los usuarios. Después de que los productos inteligentes dejan la fábrica, permanecen conectados a Internet, e intercambian datos en cantidades cada vez mayores. Puede argumentarse que estas “montañas” de datos (*big data*) son la materia prima más importante del siglo XXI. Estos datos masivos son analizados, interpretados, correlacionados y suplementados para refinarlos y obtener datos inteligentes, los cuales pueden, entonces, utilizarse para controlar, mantener y mejorar los productos y los servicios inteligentes».

Sin embargo, se sigue sin prestar atención al gemelo digital, que ni siquiera menciona. Y este planteamiento se repite en otras referencias interesantes, como el informe realizado por la Asociación de la Industria de la Ingeniería Mecánica alemana, VDMA (*Reference Architecture Model Industrie 4.0*), que aunque mira al cliente, prioriza claramente la perspectiva de la fábrica inteligente (12) y de su negocio.

---

(12) Este informe pone de relieve la importancia de la ingeniería de planta para la implementación de la fábrica inteligente. Es una disciplina poco desarrollada en la construcción naval española para enfrentar la implementación de la Industria 4.0.



Por eso, para Navantia supuso un hallazgo relevante la lectura de los artículos de *HBR*, incluídos en la bibliografía, que iluminaron el camino para la comprensión e incorporación del gemelo digital. Así, tras describirse en *How smart, connected products are transforming competition* los tres elementos *core* de los productos inteligentes (componentes físicos, componentes *smart* y componentes de conectividad), en *How smart, connected products are transforming companies* se introduce el concepto del gemelo digital: «Para entender mejor la riqueza de los datos generados por los productos inteligentes conectados, las empresas están empezando a desarrollar una herramienta llamada gemelo digital (*digital twin*).

Concebido originalmente por la Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA), un gemelo digital es una réplica en realidad virtual 3D de un producto físico. A medida que los datos alimentan el gemelo digital, este evoluciona para reflejar de qué manera se ha usado y alterado el producto físico y mostrar las condiciones ambientales a las que se ha expuesto. Como un avatar del producto real, su gemelo digital permite a la empresa visualizar el estado y condición de aquel a miles de millas de distancia. El gemelo digital también puede proporcionar nuevas perspectivas (*insights*) sobre el diseño, la fabricación, la operación y los servicios asociados al gemelo real». Y la relevancia del hallazgo estuvo no tanto en la posibilidad de visualizar el estado y condición (la salud) del barco a miles de millas de distancia —algo que en una escala moderada se viene haciendo desde hace años— como en la última frase de la transcripción, concretamente en la parte relativa a la operación del barco y sus sistemas.

Ante el gran potencial derivado de la utilización de las poderosas nuevas tecnologías digitales en el buque en operación, se profundizó en el estudio del concepto, y en *What is digital twin? Definition from Whatl's* se encontró una característica que está en la esencia del gemelo digital: «De acuerdo con el experto en PLM Michael Grieves, que fue el primero que usó el término, el concepto gemelo digital precisa tres elementos: el producto físico en un entorno real, su gemelo digital en el entorno virtual y la interfaz que conecta a ambos. Los sensores instalados sobre el producto físico pueden recoger datos y enviarlos de vuelta al gemelo digital, y esta interacción permite optimizar la *performance* del producto». Sobre esta idea, se concreta el concepto de dúo conectado que forman el buque inteligente (real), su gemelo digital y la conexión entre ambos, ya que ninguno de los dos puede existir en su plenitud sin la contribución del otro.

*Powering 2016. The Digital Transformation of Electricity* y *The Digital Twin Paradigm for Future NASA and US Air Force Vehicles* permitieron profundizar y asimilar esta idea en toda su complejidad. Así, en la primera referencia puede leerse que «un gemelo digital es una simulación probabilística, multifísica y multidimensional de un vehículo o sistema *as-built* que utiliza los mejores modelos físicos, información actualizada mediante sensores,



Figura 8.

historial en la flota, etc., para reflejar la vida de su hermano gemelo en navegación (13). [En el gemelo digital] se tienen en cuenta, se evalúan y se monitorizan las anomalías de la fabricación que puedan afectar al vehículo. Además del conjunto de modelos físicos de alta fidelidad de la estructura *as-built* del producto, el gemelo digital integra los datos recogidos por los sensores del sistema integrado de supervisión de salud del vehículo (IVHM), su historial de mantenimiento y todos los datos históricos y de la flota disponibles obtenidos utilizando minado de datos y textos».

La interpretación hecha por Navantia para el Astillero 4.0 fue que la clave del gemelo digital no está en la acumulación ordenada de información técnica que caracteriza los repositorios contenidos en los PLM actuales, sino en la posibilidad de que dicha información se integre con la realimentación recibida en tiempo real del buque físico y permita efectuar simulaciones que apoyen la toma de decisión durante el desarrollo de las operaciones.

Internamente se ha utilizado el ejemplo del casco estructural para ilustrar esta característica. Ya hace años que se hacen modelos de elementos finitos del casco completo de los buques para calcular sus escantillones. Estos modelos se utilizan en las etapas iniciales de los proyectos (como el actual de la *F-110*) y, una vez obtenidos los resultados necesarios, se guardan sin esperar otra utilidad. Únicamente si se presentan problemas posteriormente se pueden

(13) Definición original: *A Digital Twin is an integrated multiphysics, multiscale, probabilistic simulation of an as-built vehicle or system that uses the best available physical models, sensor updates, fleet history, etc., to mirror the life of its corresponding flying twin.*

rescatar para estudiarlos. Según lo explicado, por muy elevada que sea la calidad de los modelos 3D que se vienen desarrollando durante el diseño de los productos, dichos modelos o maquetas digitales no reúnen las condiciones para que se les considere gemelos digitales, y no deben confundirse con estos, puesto que:

- Lo esencial es que el gemelo físico al que corresponde el modelo 3D actual no tiene sensores que envíen a tierra información de estado en tiempo real; en consecuencia, en el ejemplo anterior, el casco no es inteligente. Es más, aunque se instalen estos sensores, cuya tecnología es muy madura, la información que generan no sale del barco de manera continua. Y aunque se envíen a tierra, no hay un sistema con las personas que los puedan explotar eficazmente.
- Estos modelos no están integrados con otros, como podrían ser los utilizados en hidrodinámica, y no forman parte de un entorno multifísico.
- Además de lo anterior, los modelos de elementos finitos citados no se actualizan al finalizar el diseño y construcción: no son *as-built*.

Otro aspecto interesante en *Powering 2016. The Digital Transformation of Electricity* es la mención que hace a la extensión del gemelo digital, que puede abarcar únicamente una selección de sistemas del gemelo físico. Esto es especialmente interesante en los primeros años de consolidación del concepto, en los que probablemente sería inviable intentar abarcar todos los sistemas o instalaciones de un buque (del orden de 200 en un barco de guerra o en un submarino). No obstante, en las reflexiones teóricas de Astillero 4.0 siempre se ha pensado que en el futuro el gemelo digital incluirá todos los sistemas del buque inteligente, aunque muchos de ellos, por ejemplo, los de carácter estático (escalas, candeleros, literas, etc.), no tengan que enviar a tierra en tiempo real información de su estado.

La construcción de un gemelo digital óptimo integra los gemelos digitales de sus sistemas y equipos, desarrollados por los diseñadores-fabricantes de los mismos, siendo imprescindible contar para ello con las plataformas colaborativas introducidas en el apartado anterior. El concepto Industria 4.0 enfatiza que esta integración se mantiene a lo largo de toda la vida del producto inteligente final, nuestro buque inteligente. De esta manera, las modernizaciones que se hacen en el gemelo real se desarrollan antes en el virtual, y es posible que toda la cadena de suministro pueda contribuir, según demande el cliente final, al sostenimiento del buque, al adiestramiento de su dotación, al alistamiento de las unidades y a las operaciones para la realización de sus misiones necesarias para la defensa nacional.

En el espacio tridimensional de Astillero 4.0, el gemelo digital se crea y mantiene en el nivel intermedio (figura 9), el del mundo virtual, en el que existen los nueve espacios que se corresponden con los del nivel inferior, el

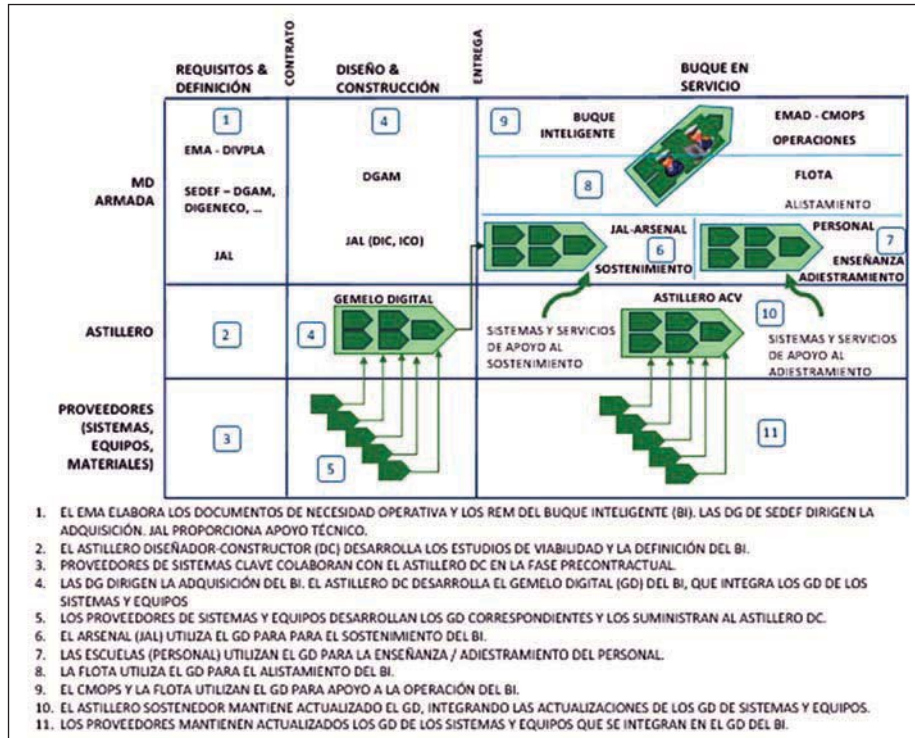


Figura 9.

del mundo real, introducido en el apartado anterior, notándose la capacidad de ubicuidad que tiene el gemelo virtual, que permite crear copias del mismo si la arquitectura digital establecida así lo requiriese.

Es necesario destacar, por último, que el desarrollo del concepto de gemelo digital de Navantia recibió un impulso esencial con la participación en los grupos de trabajo lanzados por la Armada española, en abril de 2017, en el marco del Plan de Acción para la transformación del Apoyo Logístico al concepto 4.0 del EMA.

## Conclusiones

Como parte del consenso generalizado sobre la realidad de la Cuarta Revolución Industrial, el concepto Industria 4.0 se está consolidando en todos los ámbitos de la industria y en el específico de la construcción naval de buques de guerra.

De la misma forma que se hizo con las tres revoluciones anteriores, nuestra construcción naval militar tiene que volver a reinventarse. Para esto es necesario sumarse a los esfuerzos que están haciendo todos los sectores de la economía en general y de la industria en particular, incorporando el modelo de Industria 4.0. y complementándolo para tener en cuenta los aspectos específicos de nuestro sector, lo que Navantia ha hecho con el desarrollo del Astillero 4.0.

Como contribución a este proceso de adaptación, en este artículo se introducen tres conceptos:

- El Espacio Tridimensional 4.0 como marco de referencia para la adaptación de la Industria 4.0 a su aplicación en el Astillero 4.0.
- La Integración Horizontal en la construcción naval militar española, destacándose la contribución imprescindible de las plataformas colaborativas que integran toda la cadena de valor más allá del económico. En este apartado se introduce una reflexión sobre la idea de *big* colaboración.
- El dúo conectado que forman el producto (buque) inteligente y su gemelo digital, de cuya utilización conjunta se beneficiarán todos los procesos de los clientes-usuarios.

Se resalta que las tecnologías digitales que hacen posible el aprovechamiento de los datos estarán al alcance de todo el mundo, por lo que las personas serán las que marquen la diferencia para conseguir el éxito en la implementación de la Industria 4.0. Serán el alma de la Cuarta Revolución Industrial, de la Industria 4.0 y del Astillero 4.0.

### **Agradecimiento**

A todas las personas que forman el Equipo de Astillero 4.0 de Navantia, con cuya contribución armónica es posible llevar adelante los avances teóricos y prácticos recogidos en el artículo.

### **BIBLIOGRAFÍA**

- Mission Growth: Europe at the Lead of the New Industrial Revolution*, MEMO/12/383, Bruselas, 29 mayo 2012.
- National Network for Manufacturing Innovation Program. Strategic Plan*. Febrero 2016.
- Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0*. Abril 2013.
- Industria Conectada 4.0. La transformación digital de la industria española*. Octubre 2015.
- Estratexia rexional de especialización intelixente de Galicia 2014-2020*. RIS3 Galicia. 2014.



#### APOYO LOGÍSTICO 4.0

- Estrategia de innovación de Andalucía 2020*. RIS3 Andalucía. 2015.
- Estrategia de investigación e innovación para la especialización inteligente de la Región de Murcia*. RIS3 Murcia. 2014.
- Implementation strategy Industrie 4.0*. Enero 2016.
- Smart service welt. Final report*. Long version. Marzo 2015.
- A European strategy for Key Enabling Technologies. A bridge to growth and Jobs*. COM (2012) 341 final. 26.6.2012.
- Industry 4.0. How to navigate digitization of the manufacturing sector*. McKinsey Digital. 2015.
- Factories of the future PPP, Strategic multi-annual roadmap. Prepared by the ad-hoc Industrial Advisory Group*. 2010.
- Informe CÓTEC 2018. La innovación en España*.
- La digitalización de la industria. Área de Estrategias Industriales de CC. OO. Industria*. Diciembre 2016.
- Plan digital 2020. La digitalización de la sociedad española*. CEOE. 18 de octubre de 2017.
- La digitalización de la economía*. CES. Informe 03/2017.
- Re-Imagining Work. White Paper Work 4.0. Federal Ministry of Labour and Social Affairs*. Marzo 2017.
- Leading digital: Turning Technology into Business Transformation*. George Westerman, Didier Bonnet and Andrew McAfee.
- Industry 4.0: Building the digital enterprise. PWC 2016 Global Industry 4.0 Survey. Reference Architecture Model Industrie 4.0. Status report*. Julio 2015.
- Alignment Report for Reference Architectural Model for Industrie 4.0/Intelligent Manufacturing System Architecture. Sino-German Industrie 4.0/Intelligent Manufacturing Standardisation Sub-Working Group. Published by the Federal Ministry of Economic Affairs and Energy of Germany*. Abril 2018.
- Industrie 4.0 Readiness. VDMA's IMPULS-Stiftung*. Octubre 2015.
- PORTER Michael E.; HEPPERMANN, James E.: «How smart, connected products are transforming competition». *HBR*. Noviembre 2014.
- How smart, connected products are transforming companies*. *HBR*. October 2015.
- <https://searcherp.techtarget.com/definition/digital-twin>.
- Powering 2016. The Digital Transformation of Electricity*.
- GLAESSGEN, E. H.; STARGEL, D. S.: «The Digital Twin Paradigm for Future NASA and US Air Force Vehicles». *Paper for the 53.<sup>rd</sup> Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. Special Session on the Digital Twin*.