

01-038

Methodology for developing naval projects in the field of industry 4.0

Víctor Pérez Fernández¹; Jorge Salguero Gómez¹; Francisco Abad Fraga²; Agustín Butrón Marín²; Mariano Marcos Bárcena¹

¹Universidad Cádiz; ²Navantia;

Fourth Industrial Revolution, so-called Industry 4.0 (I4.0), has been formulated on the basis of the Factory of the Future (FoF). Shipbuilding industry is currently so far from I4.0, even though it can be treated from the viewpoint of Distributed Manufacturing Systems. In this work, a FoF/I4.0 based methodology for analyzing and improving Naval Factories has been proposed. This methodology involves systems virtualization, simulation and integration through PDM (Product-Process Data Management)-PLM (Product-Process Lifecycle Management) for establishing implementation parallel and sequential phases. Preliminary analysis is focused on the shop-floor, plant, store or individual process manufacturing cell, taken as microfactories. In a second level, this study is completed with their hierarchical analysis. Starting from them, virtual process and systems improvements can be applied.

Keywords: Factory of the Future; Industry 4.0; Shipbuilding Industry; PDM; PLM

Propuesta metodológica para la realización de proyectos en el sector naval en el ámbito de la industria 4.0

Las consideraciones y pautas recogidas de forma genérica en la denominada Fábrica del Futuro (Factory of the Future, FoF) han servido de base para la puesta en marcha de la denominada Cuarta Revolución Industrial conocida bajo el término Industria 4.0. Uno de los sectores industriales que más alejados se encuentran de las ideas de FoF es el de la Construcción Naval de Grandes Buques, a pesar de responder formalmente al concepto sistemas de fabricación distribuidos. En esta comunicación se propone una Metodología para el análisis, diagnóstico y propuesta de mejoras de factoría navales en entornos de FoF e Industria 4.0. La metodología propuesta contempla la simulación y virtualización de procesos y productos, con gestión integrada tipo PDM (Product-Process Data Management)-PLM (Product-Process Lifecycle Management), que permitan establecer las etapas secuenciales y paralelas para la implementación de mejoras particulares y globales en su sistema productivo. El análisis-diagnóstico preliminar de la factoría conlleva el estudio individual de cada planta, taller, almacén, nave y/o célula considerados como microfactorías. Este estudio se complementa, en un segundo nivel, con el análisis jerárquico entre las mismas. A partir de ahí se está en condiciones de aplicar mejoras virtuales por procesos y del propio sistema de fabricación.

Palabras clave: Fábrica del Futuro; Industria 4.0; Industria Construcción Naval; PDM; PLM

Correspondencia: Víctor Pérez victor.perez@uca.es



Este obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 4.0 Internacional. <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

1. Introducción

El paradigma de Empresa Virtual está alcanzando cada vez más una creciente importancia en la concepción, integración y modelado de los sistemas de fabricación del siglo XXI como respuesta a las necesidades de agilidad y resiliencia de los mismos a los cambios bruscos del mercado. El desarrollo de las Tecnologías de la Información y de la Comunicación (TIC) ha sido el factor que ha facilitado la reconstrucción de paradigmas industriales tradicionales hacia el siguiente nivel de integración en las empresas de fabricación: nivel célula > nivel taller > nivel intra-empresa > nivel inter empresa (empresa virtual) (Camarinha-Matos & Afsarmanesh, 2005).

Además, el concepto de producto ha evolucionado, desde el producto físico a la noción de producto extendido, como resultado de un mercado de competencia global donde los fabricantes tienen que ofrecer sus productos con servicios adicionales para hacerlos más atractivos para el cliente. En este sentido, la próxima generación de productos (producto extendido) debe aportar alta calidad, soluciones personalizadas, rápidas y asequibles para el cliente, incluyendo capacidades de prestación de servicios tales como: diagnóstico en tiempo real, mantenimiento, seguridad, trazabilidad, autodirección, entretenimiento, capacidad de respuesta, reproducibilidad, etc. Finalmente, estos productos deben ser amigables con el medio ambiente, lo que implica que durante su concepción y desarrollo sea necesario considerar estrategias de diseño para el reciclaje y fabricación con bajo impacto ambiental (Myers, 2006).

Todas estas tendencias conducen y acotan los requerimientos y desarrollos de la próxima generación de sistemas de fabricación (Next Generation Manufacturing Systems, NGMS) (Christensen, 1994; Shen & Norrie, 1999; Scapolo et al., 2003; Marcos et al., 2005; Aguayo et al., 2009), que implican alcanzar seis grandes retos: (1) la simultaneidad de reducción del tiempo de mercado de productos junto al del ciclo de vida de los mismos (empresa Lean); (2) la integración de los recursos humanos y tecnológicos para mejorar el rendimiento de la fuerza de trabajo que permita funcionar como una empresa sensible al cliente, y que lleve a la mejora continua de la variedad, complejidad y procesos de fabricación del producto como una fuente de ventaja competitiva; (3) la transformación instantánea de la información obtenida de una amplia gama de fuentes en útiles conocimientos para apoyar la efectiva toma de decisiones por los recursos humanos y máquinas a través del ciclo de vida del producto. Se trata de flujos de información en tiempo real que permiten a las empresas obtener capacidades de fabricación concurrente (empresa completamente conectada); (4) la reducción de los residuos de producción (conservación de recursos) y el impacto ambiental de los productos (sustitución de sustancias y materiales peligrosos) a "casi cero", es decir, productos respetuosos con el medio ambiente, producidos en empresas con una fabricación sostenible; (5) empresas de fabricación rápidamente reconfigurables (creación de empresa virtual), en respuesta a las cambiantes necesidades y oportunidades para llegar a ser una empresa flexible con sistemas y procesos integrados, adaptables y fácilmente reconfigurables; y (6) el desarrollo innovador de procesos de fabricación y productos con un enfoque de reducción de escala dimensional (miniaturización) con el fin de diseñar y fabricar nuevos materiales y componentes que permitan la fabricación de productos innovadores, personalizados y libres de residuos.

La Empresa Virtual constituye una de las bases de la denominada Industria 4.0 y se concibe bajo el concepto de módulos con competencias autónomas pero dependientes y colaborativos, distribuidos geográficamente, pero vinculados en el ciberespacio en una única "Fábrica Virtual", reportando rapidez, montaje económico y robusto de unidades de fabricación modulares (Ávila et al., 2017; European Commission, 2013). Esto requiere la configuración o reconfiguración de su sistema de fabricación a través del diseño

colaborativo, la distribución de sus recursos y la planificación y programación de la producción para la obtención de productos con alto valor añadido (Romero et al., 2009).

La Industria 4.0 pretende ser el eje de la denominada Cuarta Revolución Industrial bajo las premisas conceptuales anteriormente expuestas, en un marco colaborativo soportado por la incorporación de tecnologías digitales en todos los niveles de la industria. Ese marco debe hacer posible la reingeniería de proceso y producto mediante el control compartido y jerarquizado de productos y procesos. Se trata de un nuevo enfoque que promueve la transformación de las organizaciones del siglo XXI hacia nuevas concepciones orientadas a sistemas de fabricación inteligente (Figura 1).

Figura 1: Integración de un Sistema de Fabricación en el marco de la Industria 4.0



Los cambios revolucionarios en la industria han ido siempre aparejados con los cambios en las tecnologías que afectan a los sistemas de producción de forma directa o mediante una reconfiguración conceptual. Así, la Primera Revolución Industrial surgió con la invención de la máquina de vapor y la mecanización del trabajo manual. Posteriormente llegó la Segunda Revolución Industrial con la producción en cadena, abanderada por Henry Ford. La tercera Revolución Industrial, más reciente, llegó de la mano de los sistemas electrónicos y las tecnologías de la información acompañando al fenómeno de la globalización (National Academy of Science and Engineering, 2014) (Figura 2).

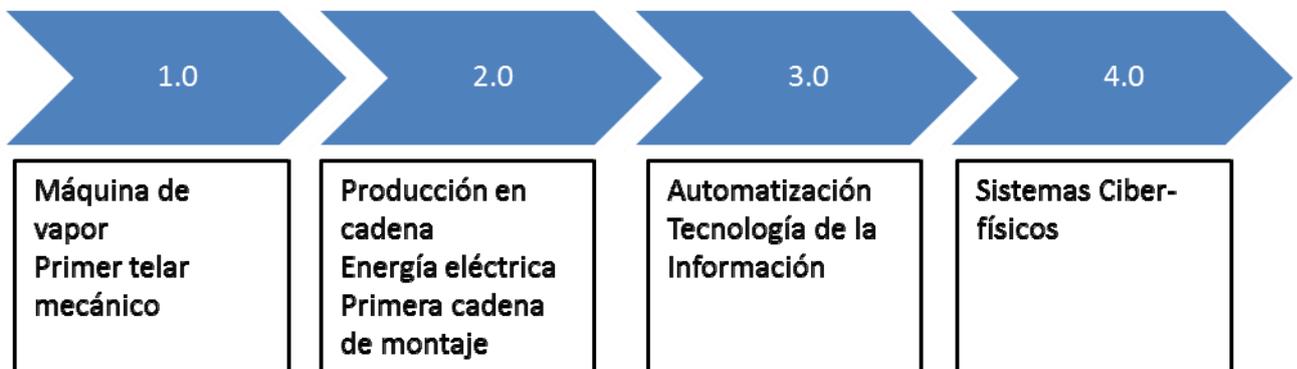
Sin embargo, el paradigma de la producción en este sentido hasta hace unos pocos años no era sostenible (Alkaya et al., 2015). Por un lado, la producción industrial contribuye en gran parte a la perturbación del medio ambiente (el calentamiento climático global y la contaminación del medio ambiente). Por otra parte, consume gran cantidad de recursos no renovables, como el petróleo y el carbón. Además, la industria, como consecuencia del envejecimiento de la población sufre un suministro de mano de obra cada vez más reducido.

En este contexto, surge la oportunidad de replantearse el sector industrial que se encuentra abocado a una transformación digital que afectará a todas las empresas y en la que todas, unas más y otras menos, tendrán la necesidad de adaptarse a esa transformación (SMART: Advanced Manufacturing Eureka Clúster, 2017).

Según EFFRA (European Factory of the Future Research Association), dentro de la denominada "Fábrica del Futuro para el H2020", los 4 paradigmas a largo plazo (visión

2030) que guiarán las transformaciones que las empresas de fabricación europea necesitan son (European Commission, 2013):

Figura 2: Etapas de la Revolución Industrial



- Fábrica y Naturaleza: verde y sostenible. Promueven las fuentes de consumo de energía menor (esbelta, limpia, verde) con ciclos cerrados de productos, producción y minimización de recursos a través de la sostenibilidad en materiales, procesos de producción y trabajadores.
- Fábrica vecina: cerca del trabajador y del cliente. Alcanzará un sistema de fabricación cercano a las personas (en ciudades y áreas metropolitanas), una fábrica integrada y aceptada por ecosistemas y medio natural, que lleve a cabo una producción orientada a la integración de los consumidores.
- Fábrica en la cadena de valor: colaborativa. Esfuerzo y lucha para conseguir fábricas distribuidas altamente competitivas (flexibles, receptivas, con alta velocidad de cambio); sus productos están adaptados a las necesidades de la sociedad. Además, fomentan la integración de los productos y la ingeniería de procesos (ágil y con la demanda dirigida), todo con la colaboración eficiente de toda la cadena de suministro.
- Fábrica y seres humanos: fabricación centrada en el ser humano. Las fábricas del futuro serán interfaces orientadas al ser humano, donde la simulación y visualización de los procesos y las formas de trabajo se lleven a cabo desde la habilidad, educación y entrenamiento del trabajador y estarán soportadas con un servicio de apoyo de tecnologías de información. Además, se buscará el equilibrio para la calidad de vida y la conciliación familiar con condiciones de trabajo en línea como forma de vida, más flexible en tiempo y salario. El desarrollo de conocimiento, dirección y capitalización será el eje para la mejora continua.

Para conseguirlos, el proyecto Fábrica del Futuro, establece los siguientes dominios de innovación e investigación: procesos avanzados de fabricación, sistemas de fabricación inteligentes y adaptativos, fábricas digitales, virtuales y eficientes en recursos, empresas colaborativas y con gestión a través del Internet de las Cosas (IoT, Internet of Things), fabricación centrada en el humano y fabricación centrada en el cliente. Las propuestas deben estar siempre dirigidas hacia (Ávila et al., 2017; Peralta et al., 2016):

- Fabricación de los productos del futuro: tener en cuenta las necesidades de la sociedad posibilitando la apertura a nuevos mercados.

- Sostenibilidad económica en la fabricación: combinar el alto rendimiento y la calidad con el coste de la productividad efectiva, creando fábricas reconfigurables, adaptativas y evolutivas capaces de producir a pequeña escala de una manera económicamente viable.
- Sostenibilidad social en la fabricación: Integrar las capacidades humanas con la tecnología.
- Sostenibilidad ambiental en la fabricación: Reducir el consumo de recursos y la generación de desechos.

Recientemente, EFFRA ha lanzado un programa de trabajo, "Factories 4.0 and Beyond", que cubre los años 18-19-20 bajo el Horizonte 2020 y proporciona un conjunto de recomendaciones para seguir implementando esta visión en sinergia con las corrientes actuales de la Industria 4.0 a través de un conjunto de prioridades clave y líneas de investigación.

Estas prioridades claves son (European Factories of the Future Research Association, 2016):

- Redes de valor ágiles. Lote de tamaño uno - Fabricación distribuida.
- Excelencia en la fabricación. Procesos y servicios avanzados de fabricación para procesos y productos sin defectos e innovadores.
- El factor humano. Desarrollo de las competencias humanas en sinergia con el progreso tecnológico.
- Redes de valor sostenible. Fabricación en una economía circular.
- Plataformas de fabricación digital interoperables. Apoyo a un ecosistema de servicios de fabricación.

Sin embargo, no todos los sectores industriales han asumido de forma inmediata la transformación indicada en el proyecto SMART. En particular, en España, la industria naval se encuentra actualmente muy distanciada de las líneas de trabajo que ya se están proponiendo en otros países y sectores industriales.

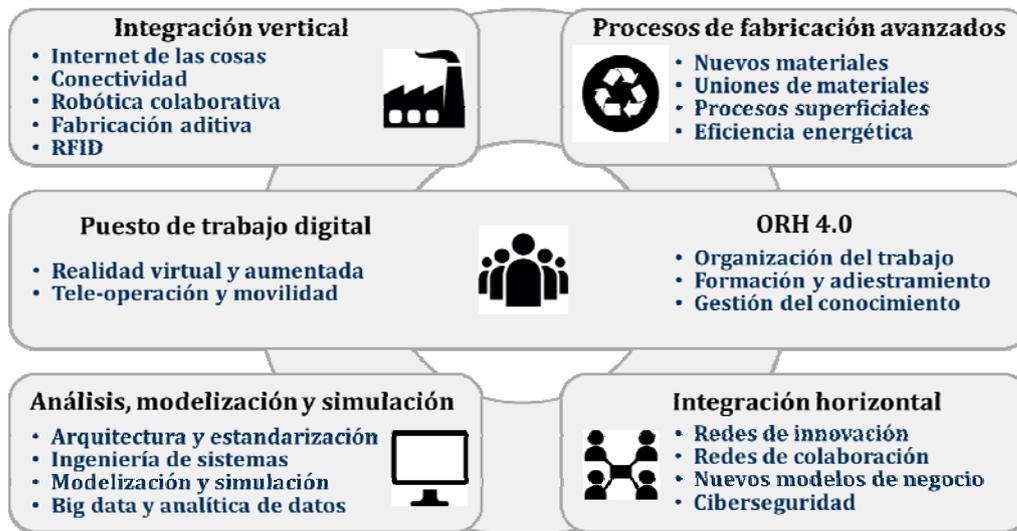
Las referencias existentes en materia de agilidad, flexibilidad, jerarquización de la información y sostenibilidad apenas permiten un mínimo acercamiento a las desarrolladas en otros sectores industriales, lo cual genera un amplio espectro de necesidades para acercar el modelo actual de un Astillero a los requisitos impuestos por el modelo de Industria 4.0, origen del denominado Astillero 4.0 (Figura 3).

Precisamente en este marco, el diseño, desarrollo y empleo de herramientas de mejoras de procesos y productos para dotar de flexibilidad, agilidad y alto rendimiento a los sistemas de fabricación de la industria de construcción naval española, especialmente de grandes buques no seriales, es prácticamente inexistente.

2. Objetivos

El planteamiento anterior lleva a la búsqueda de un diseño y desarrollo preliminar de una metodología que permita analizar, diagnosticar, proponer e implementar mejoras en un Centro de Construcción Naval. Como referencia -caso de estudio- se tomará el Astillero de Puerto Real de NAVANTIA, para analizar las condiciones de cambio, las limitaciones y las inferencias que marquen la evolución de su sistema productivo hacia un entorno de Industria 4.0 que dé lugar al denominado Astillero 4.0.

Figura 3: Análisis de necesidades para el Astillero 4.0



Para alcanzar ese objetivo general se proponen una serie de objetivos específicos como son:

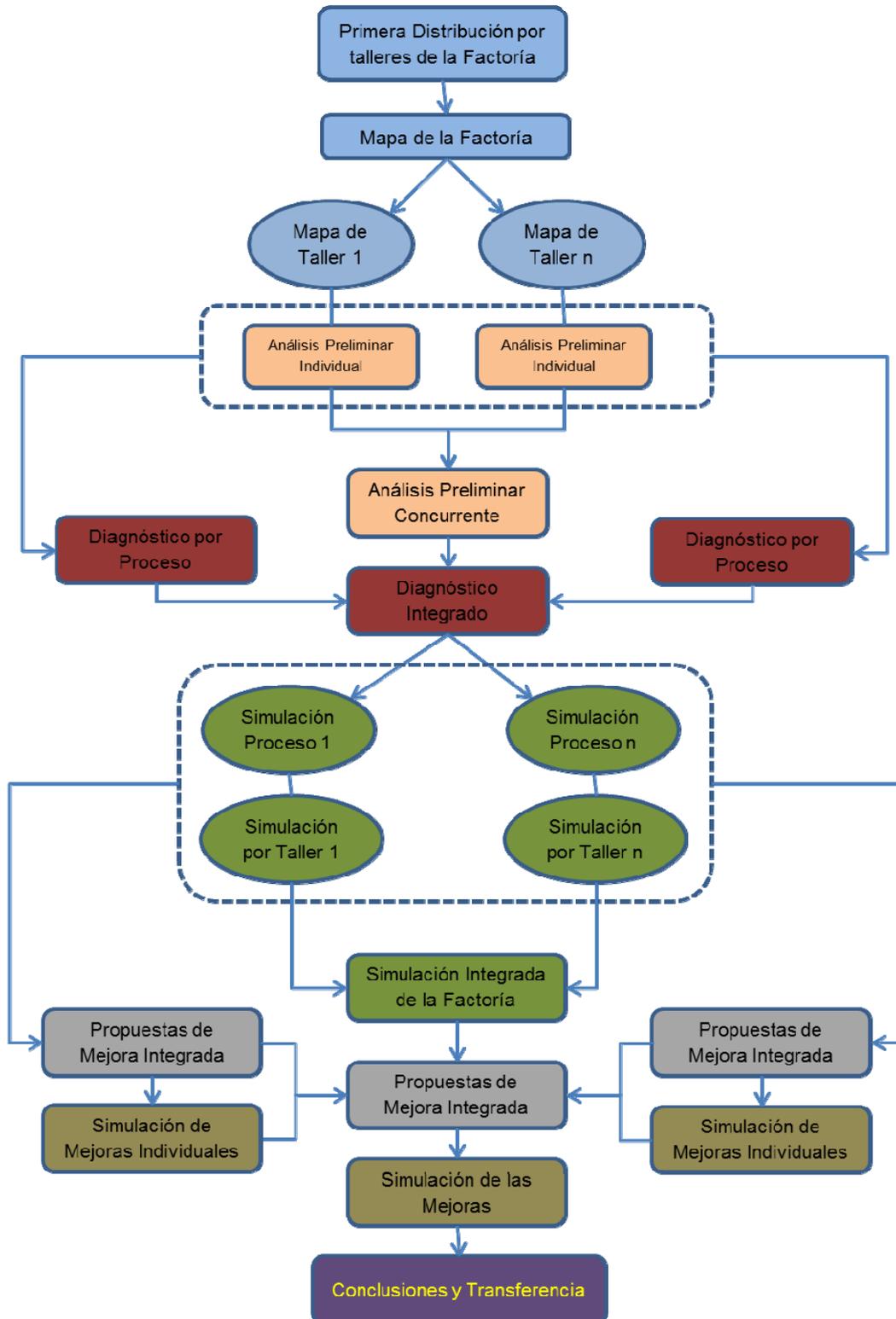
- O1. Disponer de un layout del sistema de producción actual.
- O2. Elaborar un diagrama de interferencias en las distintas etapas y talleres de fabricación de un producto naval en el Astillero de Puerto Real.
- O3. Desarrollar herramientas de simulación para obtener una virtualización 3D del Astillero de Puerto Real y establecer diagnosis de puntos de mejora basados, entre otros: parametrización de la producción (capacidades, cargas, ratios, etc.); organización: flujos de material y personas; evaluación y selección de tecnologías aplicadas; flexibilidad para producción en paralelo; flexibilidad, adaptabilidad y agilidad para reconfiguración inmediata para la fabricación de nuevos productos...
- O4. Proponer mejoras del rendimiento de procesos con criterios tales como: economía (coste y plazos); energía; medio ambiente; prevención de riesgos laborales...
- O5. Diseñar la implementación de algunas mejoras.

3. Metodología

Para alcanzar los objetivos propuestos, se ha diseñado una metodología de trabajo basada en el análisis preliminar de la factoría y en los estudios detallados de los distintos talleres y naves de producción, flujos, almacenes, etc., para preparar un diagnóstico por elementos de la misma que permitiese llevar a cabo una simulación completa y una propuesta de mejora de los procesos y del sistema de fabricación. En el contexto UCA-Bahía de Cádiz-Navantia se ha comenzado a abordar esta metodología, para lo que se ha diseñado una línea de investigación colaborativa entre el Grupo de Investigación de Ingeniería y Tecnologías de Materiales y Fabricación (TEP-027) de la Universidad de Cádiz y el Astillero Bahía de Cádiz de NAVANTIA orientada hacia la Integración de Sistemas y Procesos de Producción en toda la factoría.

En la Figura 4 se presenta el diagrama de flujo correspondiente al desarrollo metodológico de esta línea de acción.

Figura 4: Metodología propuesta



Sobre la base de la misma es posible desplegar el plan de trabajo conducente a la puesta en marcha de la adaptación de un Astillero tradicional al contexto de la Industria 4.0, de acuerdo con:

- Mapa de la planta. Definición de la situación actual a través del estudio de flujos de trabajo, layouts y establecimiento de la cadena de valor (Figura 5).

Figura 5: Vista de una imagen gráfica simulada de un Astillero



- Análisis preliminar. Detección de cuellos de botella a partir de estudios carga/capacidad y estimación del lead-time a partir de un análisis Value Stream Mapping (VSM).
- Diagnóstico por procesos. Análisis pormenorizado de los principales procesos implicados en la fabricación naval. Estimación de tiempos de procesado y transporte. Parametrización de variables de proceso.
- Simulación integrada. Creación, modelización y validación en entornos virtuales 2D y 3D que reproduzcan fielmente la situación actual y permita la simulación en diferentes escenarios (Figura 6).
- Propuestas de mejora. Los resultados obtenidos tras el análisis llevado a cabo en las etapas anteriores permitirán proponer y priorizar diferentes tipos de mejora, en términos de mejora de la eficiencia organizativa a través de la optimización de flujos de trabajo y de la minimización de tiempos de operación mediante la selección óptima de tecnologías y parámetros de procesado.
- Mejoras simuladas. A partir de la simulación en diferentes escenarios, se modelizarán las propuestas de mejora, cuantificándose el grado de mejora en comparación con el diagnóstico inicialmente obtenido, en términos de Takt-time y Lead-time. Adicionalmente, la simulación puede establecer las primeras bases para el diseño y desarrollo de reproducciones de realidad aumentada para training y verificación virtual de diseños y para la contrastación de la ergonomía de los operarios (Figura 7).

- Conclusiones y transferencia. Preparación de memoria final, así como actividades de transferencia de los resultados obtenidos.
- Líneas de actuación futuras. Establecimiento de líneas de trabajo que refuercen el carácter innovador de este proyecto, dentro de una filosofía de mejora continua.

Figura 6: Simulación de flujos inter e intra-talleres

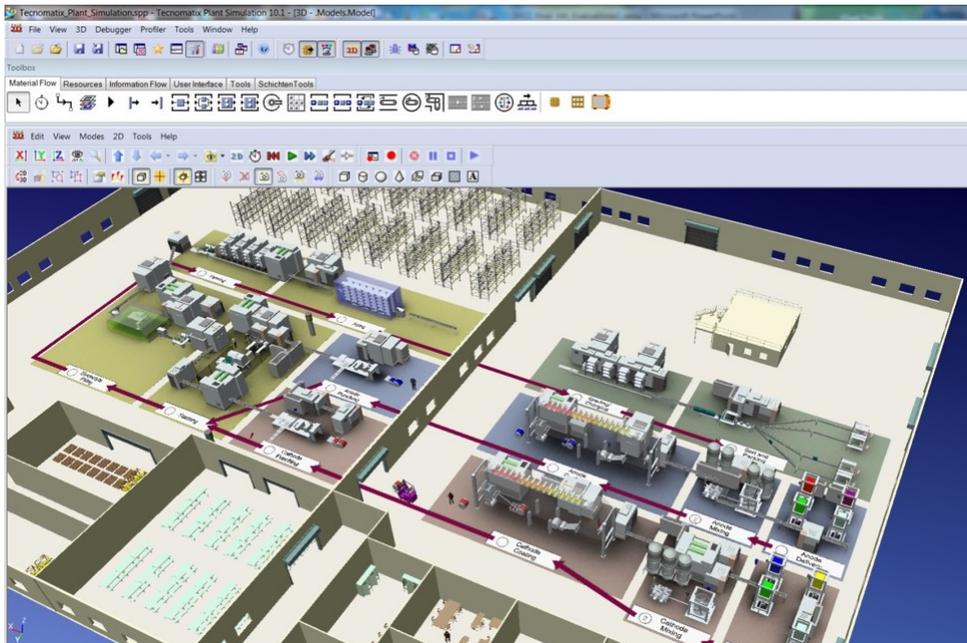
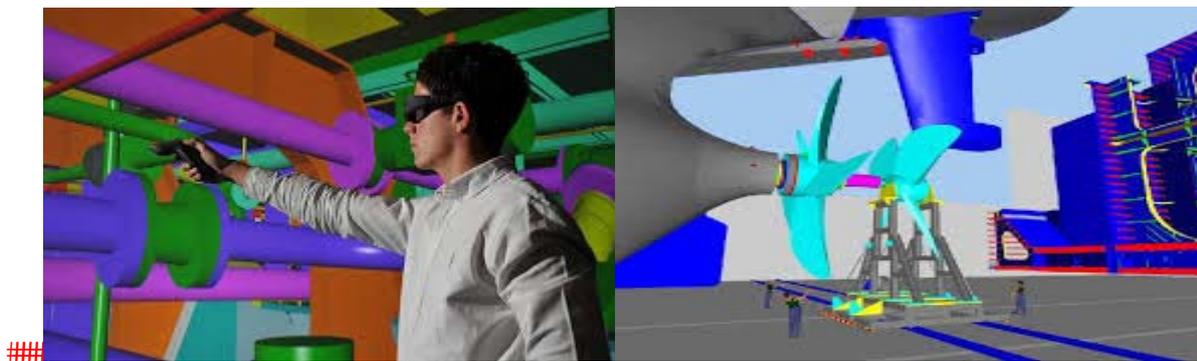


Figura 7: Simulación de condiciones ergonómicas y Realidad Aumentada



La metodología reseñada requiere el empleo de diversas técnicas de ingeniería de fabricación -incluyendo diseño- para su puesta en marcha.

Se pueden citar:

- Técnicas de elaboración del mapa de flujo de valor (VSM, *Value Stream Mapping*) para el mapa de procesos de factoría, planta y taller.
- Técnicas PDM-PLM para el análisis (ACV), control (CCV) y gestión (GCV) de los ciclos de vida del producto, el proceso y el entorno.

- Técnicas de Ingeniería Inversa (RE, *Reverse Engineering*) para el análisis de diseño y propuesta de rediseños.
- Técnicas de Simulación de Procesos, con dos vías de trabajo:
 - o Simulación CIM-MIS (Computer Integrated Manufacturing - Manufacturing Integrated Systems) para la simulación del sistema y de los procesos en el aspecto más organizativo.
 - o Simulación CAD-CAM-CAE (Computer-Aided Design, Manufacturing & Engineering) para la simulación de procesos de conformado en células de fabricación y para futuras simulaciones funcionales de productos.
- Aplicaciones de simulación ergonómica para diseño de unidades, células y puestos de trabajo con interacción hombre-máquina.
- Aplicaciones de Realidad Aumentada para el training, la verificación y validación (gestión virtual del producto).

Todo ello implica disponer de elementos TIC de altas prestaciones soportado en ordenadores con configuraciones muy especiales y altas capacidades y, posiblemente, un tiempo de adaptación cuya dimensión es muy superior al correspondiente a sistemas de fabricación incluidos en otros sectores industriales.

4. Conclusiones

En el contexto actual surge la oportunidad de replantearse el sector industrial que se encuentra abocado a una transformación digital que afectará a todas las empresas y en la que todas, unas más y otras menos, tendrán la necesidad de adaptarse a esa transformación.

En particular, en España, la industria naval se encuentra actualmente muy distanciada de las líneas de trabajo que ya se están proponiendo en otros países y sectores industriales. Por ello, se busca una metodología que permita acercar el modelo actual de un Astillero a los requisitos impuestos por el modelo de Industria 4.0, origen del denominado Astillero 4.0.

En una primera etapa se ha comenzado a definir una metodología para el desarrollo y, en su caso, aplicación de las herramientas de análisis y diagnóstico de sistemas de fabricación, simulación de procesos y productos, con gestión integrada tipo PDM-PLM, que permitan establecer las etapas secuenciales y paralelas para la implementación de mejoras particulares y globales en el sistema productivo de una industria de construcción naval.

Ha de resaltarse que, en una primera aproximación, se trataría de plantearse un estudio de uno o pocos talleres donde se obtendrían conclusiones parciales que permitirían sentar las bases para, en un segundo nivel, llevar a cabo el diseño de un sistema virtual de fabricación integrada de un producto dentro de la factoría.

5. Referencias

Aguayo, F. et al. (2009). MESIC 2009. Alcoy, España.

Alkaya, E. et al. (2015). Adaptation to climate change in industry: improving resource efficiency through sustainable productions applications. *Water Environment Research*, 87 (1), 14-25.

- Ávila, M.J. et al. (2017). Reference holonic architecture for sustainable manufacturing enterprises distributed. *DYNA*, 84 (200), 160-168.
- Camarinha-Matos, L.M. & Afsarmanesh, H. (2005). Brief Historical perspective for virtual organizations. En *Virtual Organizations: Systems and Practices*, Springer, pp.3-10.
- Christensen, J.H. (1994). Holonic manufacturing systems: initial architecture and standars directions. En *1ª European Conference on Holonic Manufacturing Systems*.
- European Commission (2013). Factories of the future. Multi-annual roadmap for the contractual PPP under Horizon 2020. *Publications Office of the European Union*, Luxemburgo.
- European Factories of the Future Research Association (2016). Factories 4.0 and Beyond. *Working document*, versión 30. Luxemburgo.
- Marcos, M. et al. (2005). Towards the next generation of manufacturing systems – FRABIHO: a synthesis model for distributed manufacturing. En *Intelligent Production Machines and System*, Elsevier Ltd.
- Myers, J (2006). Future Value Systems: Next Generation Economic Growth Engines & Manufacturing. En *IMS Vision Forum 2006, IMS Internacional*. Seúl, Corea, pp. 30-47.
- National Academy of Science and Engineering (2014). Industrie 4.0. Smart manufacturing for the future. *Germany Trade and Invest*. Germany.
- Peralta, M.E. et al. (2016). On the sustainability of machining processes. Proposal for a unified framework through the triple bottom-line from an understanding review. *Journal of Cleaner Production*, 142, 3890-3904.
- Romero, D. et al. (2009). Next generation manufacturing systems and the virtual Enterprise. En *Proceedings of the 13th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing*. Moscú, Rusia, pp. 630-637.
- Scapolo, F. et al. (2003). The Future of Manufacturing in Europe 2015-2020: The Challenge for Sustainability. *Institute for Prospective Technological Studies*.
- Shen, W. y Norrie, D. (1999). Agent-based systems for intelligent manufacturing: a state of the art survey. En *Knowledge & Information Systems: an international journal*, Springer, 1 (2), pp. 129-156.
- SMART (2017). Technology Roadmap. *Advanced Manufacturing Technologies Headquarters*. Mondragón.