

P12

PROPUESTA DE FABRICACIÓN FRACTAL DISTRIBUIDA PARA LA OPTIMIZACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD DE LA INDUSTRIA AERONAÚTICA EN INDUSTRIA 4.0

Castro Hormigo, F. Javier; Peralta Álvarez, M. Estela; Aguayo González, Francisco. Grupo de investigación TEP022. Departamento de Ingeniería del Diseño. Escuela Politécnica Superior. Universidad de Sevilla.

RESUMEN

Los programas de Horizonte 2020 y el conjunto de investigaciones propuestas a nivel internacional relacionadas con la Cuarta Revolución Industrial y la Industria 4.0 reflejan el interés y la necesidad de ampliar el alcance del diseño, simulación, optimización, así como la ejecución y gestión de los sectores de fabricación en los sistemas productivos, desde el punto de vista de la digitalización y automatización, para el alcance de los objetivos de la sostenibilidad: (1) el control y prevención de la contaminación; (2) la reducción del impacto y del daño ambiental y social; y (3) el aseguramiento de la viabilidad técnica, económica y de calidad de los resultados. La propuesta de nuevas formas organizativas (entre ellas la organización fractal), así como nuevos entornos de fabricación digitalizados con nuevas tecnologías conectadas (facilitadores digitales y tecnológicos), son una oportunidad para las actividades de I+D+i en el área de conocimiento de la fabricación en todos los sectores industriales, entre ellos, el de la industria aeronáutica.

Palabras clave: *fabricación distribuida, optimización de la sostenibilidad, fabricación fractal, industria 4.0.*

ABSTRACT

The programs Horizon 2020 and the set of internationally proposed research areas regarding the Fourth Industrial Revolution and Industry 4.0 reflect the interest and need to extend the scope of design, simulation, optimization, as well as the execution and management of manufacturing sectors in production systems from the point of view of digitalization and automation to achieve the objectives of sustainability: (1) controlling and preventing pollution; (2) reducing the impact as well as environmental and social damage; and (3) assuring technical, economic and quality viability of the results. The proposal of new organizational forms (including fractal organization), as well as new digitalized manufacturing environments with new connected technologies (digital and technological facilitators) are opportunities for R+D+i activities in the knowledge area of manufacturing in all industrial sectors, including the aeronautical industry.

Keywords: *distributed manufacturing, sustainability optimization, aeronautical, fractal manufacturing, industry 4.0.*

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Las actividades industriales han sido desarrolladas teniendo en cuenta un sistema abierto en materia y energía de flujo lineal, lo que en el último siglo ha provocado un elevado impacto ambiental, social y económico: gasto de recursos energéticos y materiales, degradación ambiental, pérdida de biodiversidad, reducción de la salud de la población, minimización de bienestar y calidad de vida. La evolución hasta el momento se ha centrado en un conjunto de características adaptativas según las necesidades demandadas: coste, calidad, variedad o responsabilidad. Actualmente, para solucionar el problema, se incluyen requerimientos sostenibles. Como último avance en la perspectiva, se incorporan, para conseguir todos los requerimientos anteriores, la digitalización y automatización con los desarrollos de la Industria 4.0 (ver Figura 1).

Masa > Lean > Flexible > Reconfigurable > Sostenible > FABRICACIÓN 4.0

En los últimos trabajos científicos se pone de manifiesto que los fundamentos teóricos, modelos o investigaciones experimentales no alcanzan soluciones eficientes para implementar la sostenibilidad en

fabricación. Esta situación está ligada a la gestión de la complejidad: el elevado número de estrategias, actividades, procesos, información y datos, la multi-dimensionalidad de los parámetros de control y los requerimientos de rendimiento a tener en cuenta, hacen que la integración equilibrada de las tres dimensiones sostenibles (economía, ecología y equidad) no sea todavía viable ni técnica ni económicamente. Los sistemas de fabricación fractales son una solución para esta situación.



Figura 28: Industria 4.0: contextos para industrias inteligentes.

Partiendo del estado del arte, la evolución de los sistemas avanzados de fabricación distribuida y de los sistemas de fabricación fractal sostenible SF/FS, teniendo en cuenta el auge que en los últimos años está teniendo la Industria 4.0 a través del inicio de la Cuarta Revolución Industrial en todos los sectores de actividad, entre los que destaca la industria aeronáutica, cabe plantearse: (1) las oportunidades y retos para la industria aeronáutica en las actividades de I+D+i en las próximas décadas, para adaptarse a los nuevos enfoques y perspectivas de la Industria 4.0, (2) cuáles son los facilitadores tecnológicos y digitales más idóneos para introducir de forma eficiente y eficaz los objetivos de la sostenibilidad en los sistemas de fabricación aeronáuticos, (3) la forma de configurar dicha integración con mínima complejidad, como solución al rápido aumento de la incorporación de nuevas tecnologías, sistemas TIC y digitalización-automatización y (4) qué marcos de trabajo y metodologías disponibles permiten llevar a cabo estos objetivos teniendo en cuenta los requerimientos de los sistemas de fabricación de la industria aeronáutica.

Los sistemas fractales aeronáuticos se orientarán a la mejora continua de resultados a través de la co-evolución y adaptación al medio y contexto, ya que se encuentran, como se ha comentado anteriormente, en un estado sub-óptimo, por lo que intentarán de forma continua y en tiempo real optimizar sus resultados. Es por lo que cada sistema fractal artificial deberá regular los criterios relacionados con la formación de la estructura, teniendo en cuenta los objetivos relacionados con el producto, procedimientos, materiales, requerimientos de información y comunicación, flujo material, personal, requerimientos de aprendizaje y experiencia (ver Figura 2). El paradigma fractal es un marco de trabajo óptimo para la concepción de sistemas empresariales y de fabricación que tengan que desenvolverse en ambientes de negocio turbulentos, otorgando agilidad y viabilidad, a través de un balance entre complejidad y simplicidad (simplejidad) en la gestión organizacional y operaciones. Permite la gestión de la variedad requerida para el control de la complejidad de los sistemas.



Figura 29: Analogía sistema natural - sistema industria de fabricación.

METODOLOGIA

Los primeros sistemas de fabricación fractal surgen como solución de la complejidad de organización de los sistemas de fabricación inteligentes en las organizaciones. El modelo describe la configuración de las nuevas concepciones para las empresas de fabricación del futuro a partir de la analogía de su organización con un sistema fractal auto-optimizable y auto-configurable para sobrevivir a los continuos cambios (gubernamentales, mercado, demanda social, competencia, etc). Además, otros estudios amplían la teoría fractal introduciendo la sostenibilidad en la fabricación fractal desde el enfoque de la Industria 4.0 proponiendo Sistemas de Fabricación Fractal Sostenible (SF|FS) que, además de los principios propuestos por Warnecke y desarrollados en sistemas de fabricación convencionales por Ryu, proponen los SF|FS como sistemas ciberfísicos (CPS) que cumplan con un conjunto de objetivos de ejecución de su operación eficiente (ver Figura 3):

- **AUTO-SIMILARIDAD:** los sistemas fractales son auto-similares; su arquitectura se crea a partir de la división del objetivo global en diferentes unidades (autónomas) con su propia función o servicio al sistema; se caracterizan por una misma configuración y estructura e interactúan a partir de relaciones de cooperación.
- **ORIENTACIÓN AL OBJETIVO:** los objetivos del sistema global (macroscópico) que surgen de los objetivos de los fractales individuales (elementos microscópicos) se encuentran libres de contradicciones; todos los fractales, aunque autónomos, deben estar al servicio de alcanzar el objetivo global de la organización.
- **AUTO-ORGANIZACIÓN:** los fractales pueden re-estructurar, regenerar y eliminarse según el nivel de alcance de su objetivo
- **DINAMISMO Y VITALIDAD:** los fractales se encuentran unidos a través de una red de información y comunicaciones eficiente que intercambia datos en tiempo real. Ellos mismos determinan la naturaleza y la forma de acceso a los datos y permiten controlar el rendimiento del fractal, objeto de análisis y evaluación constante para la optimización y la mejora continua.
- **GESTIÓN DE LA COMPLEJIDAD:** en el intercambio de metabolismo industrial (información, materia y energía) del fractal
- **COMPORTAMIENTO SOSTENIBLE (EFICIENTE Y EFICAZ):** reducción o eliminación del impacto y daño integral (3E) económico, social y ambiental



Figura 30: Principios de organización fractal.

Uno de los principales objetivos será la implementación real de los resultados en un entorno productivo aeronáutico con sedes en España, Francia y Alemania. Se tendrán en cuenta para ello las últimas tecnologías del sector, técnicas de implementación y el actual estado del arte:

1. Fabricación sostenible en la industria aeronáutica. Oportunidades y retos

- a. Marco normativo
- b. MTD, MPA y T+L
- c. Oportunidades y líneas de investigación emergentes

2. Fabricación sostenible

- a. I+D+i en fabricación sostenible
- b. Industria 4.0, EFFRA y IMS2020
- c. Sistemas de gestión de la complejidad
- d. Oportunidades desde los CPS

3. Fabricación fractal sostenible

- a. Marcos de trabajo disponibles
- b. Sistemas fractales de fabricación convencionales y SF|FS
- c. Metodologías, técnicas y herramientas

Los sistemas de fabricación distribuidos pueden ser definidos a diferentes escalas, sobre las cuales organizar la red de información, instalaciones, infraestructura y otros recursos necesarios para implementar la fase de fabricación y distribución de productos y servicios. La división de la ingeniería de fabricación desde una perspectiva multinivel (ver Figura 4) permite organizar publicaciones para recoger el estado del arte de los sistemas fractales de fabricación.

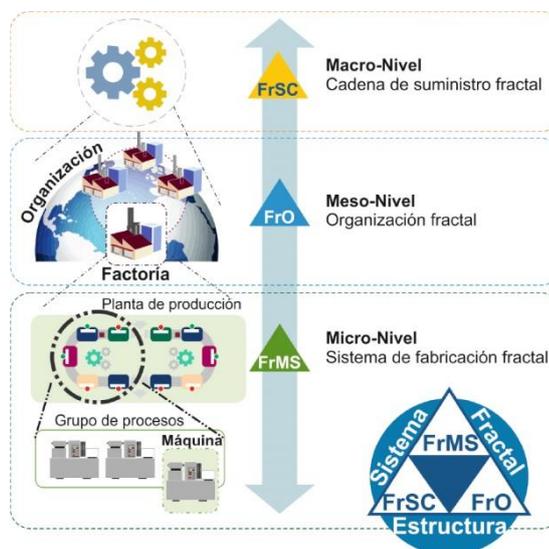


Figura 31: Niveles de estudio para la fractalización.

Las siguientes afirmaciones recogen la situación en la que se encuentra la integración de la sostenibilidad en el paradigma fractal:

- La analogía fractal-organizacional planteada por Warnecke no incorpora principios de sostenibilidad.
- En el estado actual del paradigma fractal, la sostenibilidad no es un objetivo.
- Salvo contadas excepciones, el conjunto de trabajos se enfoca a la dimensión económica exclusivamente, no incorporando ningún criterio de sostenibilidad ambiental ni social.
- Por otro lado, existe la necesidad de encontrar un paradigma que gestione la complejidad introducida por la sostenibilidad en las prácticas organizacionales, en concreto, en la ingeniería de fabricación.
- Desde diferentes ámbitos de estudio del desarrollo sostenible (incluida la ingeniería de fabricación), para la incorporación de la creación de valor sostenible finalmente se ha adoptado por parte de la comunidad científica y técnica un modelo auto-similar denominado Triple Bottom Line, donde se fractalizan las tres dimensiones económica, social y ambiental.
- En conclusión, el paradigma fractal permite la concepción de sistemas que pueden gestionar gran nivel de complejidad sin importar las variables o criterios a tener en cuenta (económicos, financieros, relacionales, tecnológicos...) por lo que es el adecuado para incorporar a los requerimientos convencionales de los sistemas (relacionados hasta el momento con la dimensión económica), las otras dos dimensiones ecológica y social, proporcionando un marco para la sostenibilidad integral.

Partiendo de lo expuesto y teniendo en cuenta el auge que en los últimos años está teniendo la Industria 4.0 a través del inicio de la Cuarta Revolución Industrial en todos los sectores de actividad, y entre ellos, la industria aeronáutica cabe plantearse (1) las oportunidades y retos para la industria aeronáutica en las actividades de I+D+i en las próximas décadas para adaptarse a los nuevos enfoques y perspectivas de la Industria 4.0, (2) cuáles son los facilitadores tecnológicos y digitales más idóneos para introducir de forma eficiente y eficaz los objetivos de la sostenibilidad en los sistemas de fabricación aeronáuticos, (3) la forma de configurar dicha integración con mínima complejidad, como solución al rápido aumento de la incorporación de nuevas tecnologías, sistemas TIC y digitalización-automatización y (4) qué marcos de trabajo y metodologías disponibles permiten llevar a cabo estos objetivos teniendo en cuenta los requerimientos de los sistemas de fabricación *lean* de la industria aeronáutica.

Para ello, el objetivo general de: (1) Incorporar el modelo fractal para la fabricación sostenible en la industria aeronáutica y (2) proponer un marco de referencia para el diseño, configuración y control de los sistemas de fabricación distribuida utilizando los sistemas fractales sostenibles de fabricación con mínima complejidad y sostenibilidad integrada.

Los resultados esperados, aplicables a la industria aeronáutica, deben incluir la configuración de CPS (sistemas ciber-físicos), que permitan reducir la complejidad y optimizar la organización de los sistemas de fabricación aprovechando los nuevos enfoques de automatización y digitalización, que serán desarrollados desde las líneas de trabajo de la Industria 4.0 (IoT, Big Data o predicción de datos). También facilitarán la configuración de diferentes niveles para el sistema de fabricación completo (cadena de suministro, organización, planta, línea, proceso, ...), en forma de entidades fractales caracterizadas por integrar los requerimientos sostenibles y *lean* necesarios, bajo criterios de mínima complejidad.

AGRADECIMIENTOS

A los directores de la Tesis y a mi familia.

BIBLIOGRAFÍA

- Attar, A. & Loukik L. (2014). Fractal Manufacturing System–Intelligent Control of Manufacturing Industry. *International Journal of Engineering Development and Research*. Volumen 2, (número 2). Páginas 1814–1816.
- Farjoun, M. & Levin, M. (2011). A Fractal Approach to Industry Dynamism. *Organization Studies*. Volumen 32, (número 6). Páginas 825-851.

- Kwangyeol, R. (2003). *Fractal-based Reference Model for Self-reconfigurable Manufacturing Systems*. Pohang, China. PhD Dissertation. Pohang University of Science and Technology.
- Lasi, H., Fettke, H. & Kemper, H. (2014). Industry 4.0. *Business and Information Systems Engineering*. Volumen 6, (número 4). Páginas 239-242.
- Mrugalska, B. & Wyrwicka, M. (2017). Towards Lean Production in Industry 4.0. *Procedia Engineering*. Volumen 182, (número 1). Páginas 466-473.
- Peralta, M.E. (2016). *Modelado, simulación y optimización de la sostenibilidad de procesos de fabricación para su integración multiescala y multinivel. Aplicación a células de mecanizado*. Cádiz, España. Tesis Doctoral. Universidad de Cádiz.
- Peralta Álvarez, M.E., Marcos Bárcena, M. & Aguayo González, F. (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*. Volumen 142, (número 4). Páginas 3890-3904.
- Peralta, M.E. (2015). The Fractal Frontier: Sustainable Development Trilogy. *Procedia Engineering*. Volumen 132, (número 5). Páginas 926-933.
- Prisecaru, B., Nicolescu, D., Persideanu, V. & Moise, A. (2012). The process approach as a fractal structure for continuous improvement of the organizations. *UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering*. Volumen 74, (número 3). Páginas 253-266.
- Seliger, G., Khraisheh, M. & Jawahir, I.S. (2011). *Advances in Sustainable Manufacturing*. Berlín, Alemania: Springer Berlin Heidelberg.
- Shin, M., Jungtae, M. & Mooyoung J. (2009). Self-evolution framework of manufacturing systems based on fractal organization. *Computers & Industrial Engineering*. Volumen 56, (número 3). Páginas 1029–1039.
- Sauter, R., BODE, M. & Kittelberger, D. (2015). *How Industry 4.0 is changing how we manage value creation*. Stuttgart, Alemania : White Paper.
- Tirpak, T., Daniel, S., John D. J.D. LaLonde, J. & Davis, W. (1992). A note on a fractal architecture for modelling and controlling flexible manufacturing systems. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics* [en línea]. Volumen 22, (número 3). Páginas 564-567.