

## **La Gestión de la Producción a partir de Modelos Inteligentes para la Industria 4.0: Retos y Oportunidades**

### **Production Management from Intelligent Models-Driven for Industry 4.0: Challenges and Opportunities**

Jenny RUIZ-de la PEÑA<sup>1</sup> , Reyner PÉREZ-CAMPDESUÑER<sup>2</sup>  y Pablo Gustavo ANDRADE-MOLINA<sup>3</sup> 

1. Universidad de Holguín, Facultad de Matemática e Informática. Holguín, Cuba.

2. Universidad UTE, Facultad de Ciencias Administrativas. Quito, Ecuador.

3. Instituto Superior Tecnológico Atlántic, Departamento de Administración. Santo Domingo, Ecuador

Email: [jruizp@uho.edu.cu](mailto:jruizp@uho.edu.cu); [reyner.perez@ute.edu.ec](mailto:reyner.perez@ute.edu.ec); [pablo.andrade@atlantic.edu.ec](mailto:pablo.andrade@atlantic.edu.ec)

#### **Resumen**

En la década pasada el término Industria 4.0 ha recibido cada vez más atención, tanto en la industria como en la academia. La industria manufacturera ha evolucionado gracias a la revolución digital con el uso de dispositivos inteligentes para sistemas de información de fabricación inteligentes. Trabajar con sistemas de producción inteligente en la Industria 4.0 es una tarea compleja que requiere formas innovadoras para el desarrollo de los sistemas. Una forma de manejar la complejidad es el uso de técnicas de ingeniería dirigida por modelos inteligentes. Aunque los enfoques basados en modelos tienen varias ventajas y pueden usarse para reducir la complejidad, los estudios para respaldar la Industria 4.0 aún son limitados. Este artículo utiliza el método bibliométrico para analizar el desempeño científico de artículos, países, autores y revistas en función del número de citas y redes de cooperación. La mayoría de los artículos se publicaron en congresos. Las palabras clave Industria 4.0 e ingeniería dirigida por modelos y sistemas integrados fueron las más utilizadas y representan las principales áreas de investigación. La mayor parte de la investigación relacionada con el campo se llevó a cabo en Austria y Alemania. Este estudio presenta la evolución de la literatura científica en la Industria 4.0 y los enfoques basados en modelos inteligentes, también identifica áreas de interés de investigación actual.

#### **Palabras Clave**

Gestión de producción, Ingeniería, Arquitectura, Desarrollo, Industria 4.0, Manufactura, Modelos inteligentes, Sistemas integrados.

#### **Abstract**

*In the past decade, the term Industry 4.0 has received increasing attention in both industry and academia. The manufacturing industry has evolved thanks to the digital revolution with the use of smart devices for intelligent manufacturing information systems. Working with intelligent production systems in this Industry 4.0 is a complex task that requires innovative ways of developing systems. One way to manage complexity is the use of intelligent model-driven engineering techniques. Although model-based approaches have several advantages and can be used to reduce complexity, studies to support Industry 4.0 are still limited. This article uses the bibliometric method to analyze the scientific performance of articles, countries, authors and journals based on the number of citations and cooperation networks. Most of the articles were published in conferences. The keywords industry 4.0 and model-driven engineering and embedded systems were the most used and represent the main areas of research. Most of the research related to the field was carried out in Austria and Germany. This study presents the evolution of the scientific literature on Industry 4.0 and intelligent model-based approaches and identifies areas of current research interest.*

#### **Keywords**

Production management, Engineering, Architecture, Developing, Industry 4.0, Manufacture, Model-driven, Integrated systems.

## Introducción

En la última década, el término Industria 4.0 está recibiendo cada vez más atención, tanto en la industria como en la academia. Esta tendencia tiene como objetivo proporcionar una producción flexible e inteligente con sistemas ciber-físicos (CPS, por sus siglas en inglés), utilizando tecnologías como internet de las cosas (IoT, por sus siglas en inglés) y computación en la nube (Liu et al., 2020). La industria manufacturera ha evolucionado gracias a la revolución digital, esto ha sido posible gracias al uso de dispositivos inteligentes y bases de conocimiento que han conducido a sistemas de información de fabricación inteligentes. Esta revolución digital respalda la producción automática, esto se da gracias a la especificación del producto que permite una producción de tamaño de lote único y una reacción más rápida a los cambios de producto (Melean Romero & Torres, 2021; Vještica et al., 2019).

Esta cuarta revolución industrial ha surgido debido a los grandes avances tecnológicos y la necesidad de productos altamente personalizados (Vještica et al., 2021). La Industria 4.0 permite la integración de sistemas de automatización con procesos y con las partes interesadas de toda la cadena de valor añadido (Wortmann et al., 2017). En lugar de sistemas de producción gestionados de forma centralizada, la Industria 4.0 funciona con redes de creación de valor descentralizadas (Binder et al., 2021; Mora-Sánchez & Guerrero-Marín, 2020; Samaniego Guevara, 2021).

Trabajar con sistemas de producción inteligente en la Industria 4.0 es una tarea compleja que plantea varios desafíos para las futuras fábricas inteligentes, tales como: 1) conectividad, potencia computacional y volúmenes de datos, 2) las capacidades emergentes de inteligencia de negocios y análisis, 3) nuevas formas de interacción hu-

mano-computadora debido a varios contextos de uso, 4) mejoras en la transferencia de instrucciones digitales al mundo físico como robótica avanzada (Wortmann et al., 2017).

Al ser una tarea compleja se requieren formas innovadoras para el desarrollo de los sistemas. Una forma de manejar la complejidad es el uso de técnicas de ingeniería dirigida por modelos (MDE, por sus siglas en inglés) (Brambilla et al., 2017). La ingeniería de sistemas basada en modelos —la cual evoluciona hacia la ingeniería dirigida por modelos (Ruiz et al., 2018)— juega un papel clave en la construcción de sistemas complejos, tal como lo han demostrado el mayor número de publicaciones relacionadas en conferencias y revistas claves (Mahdavi-Hezavehi et al., 2017; Szvetits & Zdun, 2016; Wortmann et al., 2020).

El objetivo principal de la MDE es reducir la complejidad del ciclo de vida del software, esto se consigue elevando el nivel de abstracción (Molano et al., 2018). Su principio ‘todo es un modelo’ muestra la importancia del concepto ‘modelo’ en la MDE (Bézivin, 2004). La MDE utiliza modelos formales como, por ejemplo, representaciones procesables y legibles por máquina. Por lo tanto, la MDE brinda ventajas a los ingenieros para impulsar un proceso de ingeniería de manera eficaz y eficiente (Brambilla et al., 2017). Además de los modelos (los meta modelos) se definen para incluir conceptos generales y abstractos de modelos (Samimi et al., 2016). La transformación del modelo también es un aspecto clave de la MDE. Los modelos se transforman en otros modelos con diferentes niveles de abstracción o mediante el empleo de código y el uso de reglas y técnicas de transformación. En general, se pueden introducir cuatro categorías de transformación: modelo a modelo, modelo a código, código a modelo y código a código (Ziaei et al., 2020).

El uso de la MDE se ha incrementado en varios dominios: aplicaciones industriales (Hut-

chinson et al., 2011; Mohagheghi et al., 2013), sistemas multiagentes (Gascueña et al., 2012), computación en la nube (Almorsy et al., 2014), aplicaciones móviles (Usman et al., 2017) y sistemas embebidos (Akdur et al., 2018). También se utiliza para resolver un problema particular y el objetivo final de la generación automática de código (Whittle et al., 2013).

Sin embargo, aunque los enfoques basados en modelos tienen varias ventajas y pueden usarse para reducir la complejidad, los estudios para respaldar el diseño y desarrollo de CPS utilizando enfoques y herramientas de modelado aún son limitados (Erazo-Rivera et al., 2021; Parveen et al., 2019).

A medida que madura un área de investigación se vuelve importante resumir y brindar una descripción general de esos resultados y desafíos para futuras investigaciones. Se pueden utilizar diferentes métodos, tales como el análisis bibliométrico, revisiones sistemáticas de la literatura (Kitchenham & Charters, 2007) o estudios de mapeo (Petersen et al., 2008). El análisis bibliométrico es "uno de los métodos de uso común que recupera el análisis estadístico y las redes de cooperación de información cuantificable en artículos, revistas científicas y libros publicados" (Wallin, 2005, p. 262).

En este contexto, primero se realizó un análisis bibliométrico para tener una idea general del campo. El objetivo de este artículo es utilizar el método bibliométrico para analizar el desempeño científico de artículos, países, autores y revistas en función del número de citas y redes de cooperación. Lo anterior se realiza con el fin de mapear el estado del arte e identificar tendencias en el contexto de los enfoques basados en modelos y la Industria 4.0.

## Revisión de la Literatura

En esta sección se analizan los enfoques relacionados con el presente trabajo desde

varias perspectivas, tales como la Industria 4.0 y enfoques basados en modelos por separado y en conjunto. El análisis bibliométrico de los artículos permite identificar mejor los problemas críticos, las tendencias emergentes y los autores influyentes en el uso de enfoques basados en modelos en el contexto de la Industria 4.0.

Los autores Muhuri et al. (2019) presentan un estudio bibliométrico que resume la estructura de crecimiento de la Industria 4.0 durante los años 2012 y 2017. Documentan el crecimiento de la investigación de la Industria 4.0 a lo largo de los años analizados y proporcionan la estructura intrínseca de las publicaciones sobre la Industria 4.0. El estudio presentado por Ahmi et al. (2019) analiza la evolución de la literatura científica en la Industria 4.0 hasta 2018. Este documento identifica áreas de interés de investigación actual, IoT y CPS son las áreas más cubiertas en la investigación de la Industria 4.0. También identifican direcciones potenciales para la investigación futura: *big data*, fábrica inteligente, fabricación inteligente e internet industrial de las cosas. El trabajo presentado por Kipper et al. (2020) muestra un estudio bibliométrico durante el período 2011-2018. Estos autores están de acuerdo con trabajos anteriores en que identifican CPS, IoT y *big data* como los campos principales en la Industria 4.0. Otra área con una gran inversión de esfuerzos por parte de la comunidad científica es la unión entre producción ajustada y la Industria 4.0.

Existen estudios bibliométricos en el campo de los enfoques basados en modelos. El trabajo presentado por Barangi et al. (2021) analiza las publicaciones de 2010 a 2019. Los autores utilizan el método bibliométrico para analizar el desempeño científico de artículos, países, autores y revistas en función del número de citas y redes de cooperación. También identifican brechas de investigación y tendencias en el contexto de

la ingeniería de software basada en modelos. Los autores Livieri et al. (2015) analizan la literatura sobre modelos de rendimiento entre 2005 y 2015, resumen la investigación existente e identifican áreas y oportunidades para futuras investigaciones.

Además, se han realizado estudios bibliométricos que combinan la Industria 4.0 con otros temas. Un ejemplo es el trabajo presentado por Gajdzik et al. (2020) para el desarrollo sostenible y la Industria 4.0. Los autores identifican problemas claves de investigación en el campo del desarrollo sostenible en la implementación de la Industria 4.0. Algunos ejemplos son las habilidades y conocimientos requeridos de los empleados que trabajan en el campo, así como la manera en que la Industria 4.0 afecta el consumo sostenible, la planificación urbana sostenible y la ciudad inteligente con transporte inteligente. La Industria 4.0 también se ha estudiado en conjunto con la gestión de proyectos (López-Robles et al., 2020). Los autores desarrollan un análisis bibliométrico para evaluar el desempeño y la evolución conceptual de los autores y de las publicaciones que se relacionan directamente con el área.

Como se ha mostrado en esta sección se han publicado varios artículos con revisiones bibliométricas y bibliográficas sobre la Industria 4.0, así como los enfoques basados en modelos. Sin embargo, este documento difiere de los documentos anteriores en el sentido de que, hasta donde se conoce, no hay ningún trabajo que analice la combinación del uso de enfoques basados en modelos con la Industria 4.0. Si bien existen similitudes con respecto al análisis de co-palabras realizado en el presente estudio y otros realizados por Ahmi et al. (2019) y Kipper et al. (2020), los cuales se centran específicamente en la Industria 4.0, este artículo destaca la integración con los enfoques basados en modelos, precisamente.

Este es un campo de conocimiento emergente que muestra varias ventajas. Este

artículo, a diferencia de los anteriormente presentados, detecta las áreas en común de ambas áreas del conocimiento y se centra más en la fabricación, la interoperabilidad y la automatización como puntos de contacto. Los resultados proporcionan una información valiosa que se puede utilizar como guía para el estado actual y la tendencia futura de los enfoques basados en modelos para la Industria 4.0. Esto se realiza con el fin de establecer una línea de base antes de iniciar un proyecto de investigación en el futuro.

## Materiales y Métodos

En esta investigación se analiza la bibliometría de artículos indexados en Scopus en el contexto del uso de enfoques basados en modelos en la Industria 4.0. Inicialmente, los criterios de búsqueda para la realización del estudio fueron definidos. A continuación, se detallan los criterios utilizados para la búsqueda.

### Criterios para seleccionar la base de datos

La base de datos Scopus fue utilizada para este estudio bibliométrico. Esta base de datos ha sido utilizada como una de las bases de datos más grandes para la búsqueda de resúmenes y artículos indexados jamás creada. Scopus está bien organizada, indiza la producción científica y exporta metadatos. Incluye todas las revisiones con SJR (*Scientific Journal Rankings*), JCR (*Journal Citation Reports*) y sus factores de impacto. Brinda datos de publicación, autores, número de citas, instituciones, países, áreas de investigación e información de los autores. Al inicio del estudio se identificó una base de datos para recopilar la información de investigación relacionada con el campo analizado. La búsqueda se realizó en la base de datos Scopus, una de las principales bases de datos en

el campo de la bibliometría. Scopus es también una de las bases de datos más grandes de literatura revisada por pares que cubre todas las editoriales importantes como ACM, IEEE, Springer, Elsevier y muchas más.

### **Criterios para seleccionar el período**

Aunque existen autores que ya han realizado estudios bibliométricos en el campo de la Industria 4.0 y de la ingeniería dirigida por modelos (como se detalla en la sección anterior) no existen estudios que analicen la combinación del uso de enfoques basados en modelos con la Industria 4.0. Como será mostrado posteriormente, este es un campo de investigación cuyas primeras publicaciones se realizaron en el 2015. Teniendo en cuenta esto, el periodo para el análisis es de 2015 a 2022.

### **Criterios para las preguntas de investigación**

El interés de los resultados para la investigación son los siguientes: año de publicación, tipo de publicación, nacionalidades de los autores y coautores, distribución por continentes y contribución principal. Para lograr el objetivo del presente estudio se definieron seis preguntas de investigación:

- PI1: ¿Cómo es la tendencia cuantitativa de la investigación sobre enfoques basados en modelos y la Industria 4.0?
- PI2: ¿Cuáles son los principales lugares para publicar artículos sobre enfoques basados en modelos y la Industria 4.0?
- PI3: ¿Qué países tienen más cooperación?
- PI4: ¿Quiénes son los principales investigadores y cómo cooperan en el campo de los enfoques basados en modelos y la Industria 4.0?
- PI5: ¿Qué universidades tienen más artículos?

- PI6: ¿Cuáles son las tasas de repetición de palabras clave, títulos y el análisis de palabras clave de los artículos?

### **Criterios para seleccionar los términos**

Los términos de búsqueda fueron identificados como 'Industria 4.0'. Se identificaron palabras clave de las preguntas de investigación definidas. En primer lugar, se realizó una búsqueda tradicional que permitió determinar los términos de búsqueda más adecuados. Los términos fueron validados por dos expertos en la materia.

Los operadores lógicos 'OR' y 'AND' fueron utilizados para relacionar los términos. Cada término fue colocado entre comillas (""). La fecha en la que la búsqueda fue realizada fue 22/04/2022. En esta búsqueda el término general 'Industria 4.0' fue utilizado. De este modo, términos como 'sistemas físico-cibernéticos', 'sistemas de producción físico-cibernéticos', 'internet de las cosas', 'internet industrial', entre otros, no fueron utilizados.

La cadena de búsqueda final utilizada fue: TITLE-ABS-KEY (((((((model-driven) OR ("model driven")) AND (architecture OR engineering OR development)) OR (mda OR mdd OR mde)) AND ("industry 4.0")))). Para evaluar la calidad de la consulta se verificó que los estudios que ya se conocían y que fueran relevantes (como Wortmann et al., 2020) aparecieran en los resultados.

### **Criterios para seleccionar los tipos de documentos**

Un filtro fue utilizado para encontrar los documentos que tuvieran los términos de búsqueda en el título, el resumen o las palabras claves para asegurar que no hubiera otros estudios relacionados con el tópico de interés que fuera excluido.

### Criterios para seleccionar el *software* para el estudio

En Cobo et al. (2011) se presenta un análisis de nueve *softwares* bibliométricos. Dadas las facilidades y ventajas del *software VOSviewer* (Van Eck & Waltman, 2010) fue seleccionado para el análisis. *VOSviewer* utiliza una técnica para el mapear y realizar *clusters* de las redes bibliométricas y permite un análisis profundo de los datos obtenidos.

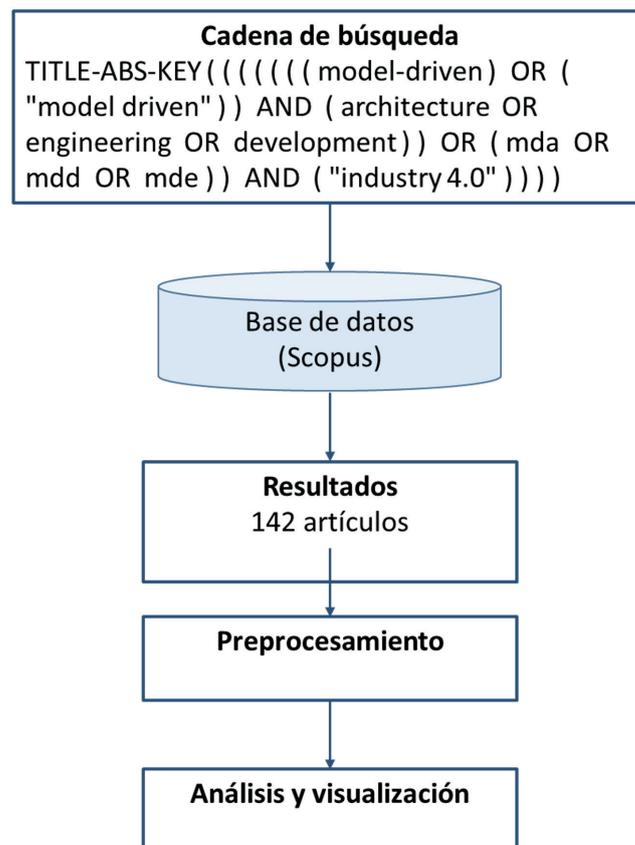
### Preprocesamiento de los datos obtenidos

Después de recuperar los resultados relacionados con los enfoques basados en modelos en la Industria 4.0 se obtuvieron 142 registros de búsqueda. Estos trabajos fueron ana-

lizados para dar respuesta a las preguntas de investigación. Con frecuencia los datos obtenidos de la base de datos tienen errores. Es por ello que un preprocesamiento asegura la calidad de los resultados. Inicialmente, los datos fueron exportados. Posteriormente, el preprocesamiento fue realizado excluyendo duplicaciones de autores, referencias, palabras claves y documentos.

La Figura 1 muestra los pasos del proceso. El proceso de este estudio comienza utilizando las principales palabras clave de la base de datos Scopus. En el siguiente paso se recuperaron los datos. Finalmente, los datos obtenidos fueron analizados con la ayuda de un *software* bibliométrico y se reportaron los resultados.

**Figura 1.** Pasos del proceso



Fuente: elaboración propia.

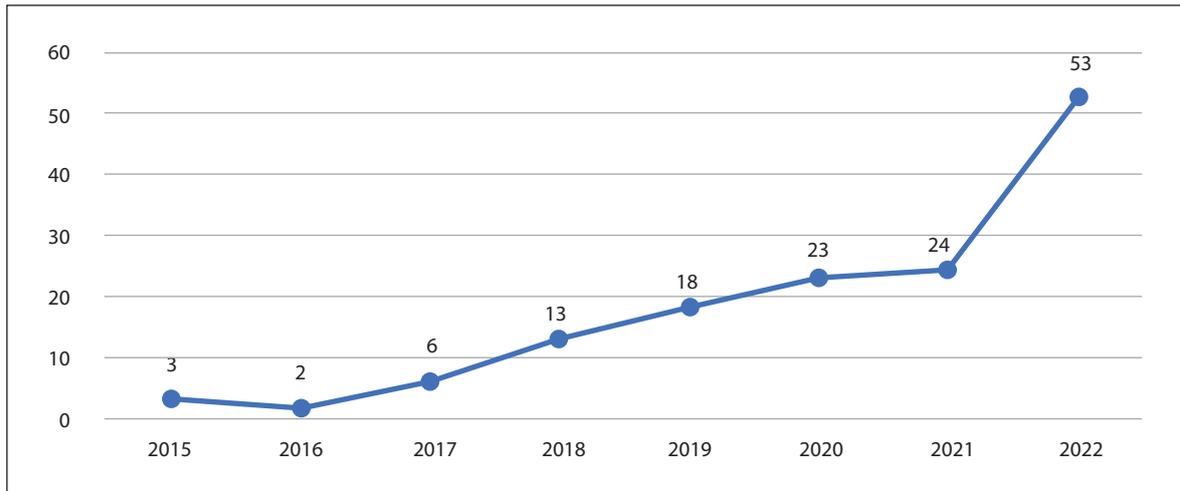
## Análisis y Resultados

En esta sección se analizan los resultados y se aplica el método bibliométrico para responder a las preguntas de investigación.

## Tendencia cuantitativa de los artículos

En respuesta a la PI1 se publicaron 142 registros de investigación en la base de datos Scopus en el dominio de los enfoques basados en modelos en la Industria 4.0.

**Figura 2.** Tendencia cuantitativa de los enfoques basados en modelos en la Industria 4.0



Fuente: elaboración propia.

La Figura 2 muestra la tendencia cuantitativa de los resultados. Hay un aumento en la tendencia de publicar artículos, el crecimiento ha sido al alza. Con la publicación de 53 artículos, la mayor cantidad de artículos en este campo se publicaron en 2022, seguido de 2021 y 2020 con 24 y 23 artículos, respectivamente. En el último año se aprecia un gran crecimiento de las publicaciones acerca de esta temática

## Principales lugares para las publicaciones de artículos

En respuesta a la PI2, los artículos se han publicado principalmente en actas de congresos con un 52.11 %, seguidos de artículos en revistas y series de libros con un 35.21 % y un 11.27 %, respectivamente. Tal como se muestra en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Publicaciones por tipo de fuente

| Tipo de fuente      | Número de artículos | Porcentaje |
|---------------------|---------------------|------------|
| Conferencias        | 74                  | 52.11      |
| Revistas            | 50                  | 35.21      |
| Series de libros    | 16                  | 11.27      |
| Libros              | 1                   | 0.70       |
| Revista de comercio | 1                   | 0.70       |

Fuente: elaboración propia

Los lugares preferidos para la publicación son *Procedia Computer Science*, *Lecture Notes in Computer Science*, *IEEE Access* e *IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation* ETFA, tal como se muestra en la Tabla 2. Con respecto a las revistas, las que más publicaciones tienen en este campo son *Software and System Modeling Journal* e *IEEE Access Journal*.

### Cooperación entre países

Con respecto a la PI3, un total de 42 países han participado en la publicación de artículos en el campo de los enfoques basados en modelos y la Industria 4.0. La Figura 3 mues-

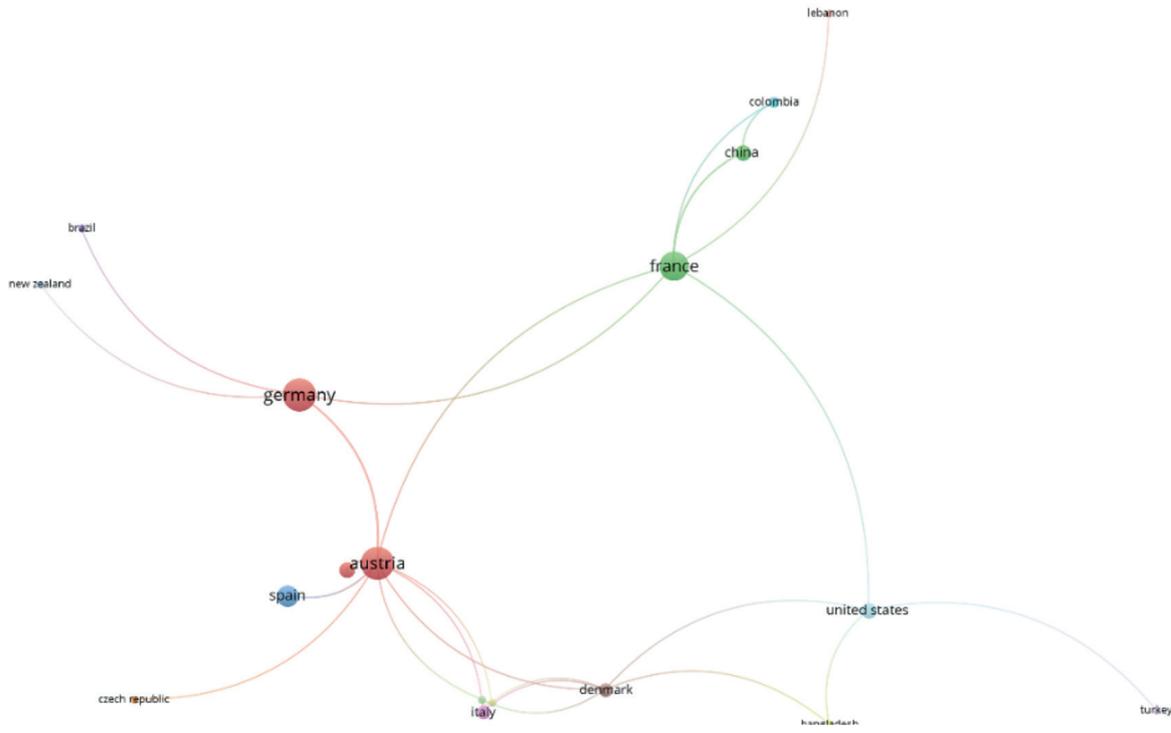
tra la red de cooperación entre diferentes países en el campo de los enfoques basados en modelos y la Industria 4.0. En esta red se incluyen los quince países con mayor número de artículos. El tamaño de los nodos indica una mayor participación en la publicación de trabajos, mientras que los bordes indican la relación entre los diferentes países en la publicación de trabajos. El grosor de los bordes indica el grado de cooperación entre países. Austria, Alemania, Francia y España son los que más artículos han publicado en el campo analizado. Varios países tienen un solo artículo publicado en este campo.

**Tabla 2.** Principales lugares para la publicación

| Lugar para la publicación   | Número de artículos | Porcentaje |
|---|---------------------|------------|
| <i>Procedia Computer Science</i>  | 11                  | 7.75       |
| <i>Lecture Notes in Computer Science Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics</i> | 11                  | 7.75       |
| <i>IEEE Access</i>  | 8                   | 5.63       |
| <i>IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation ETFA</i>   | 5                   | 3.52       |
| <i>ACM International Conference Proceeding Series</i>   | 4                   | 2.82       |
| <i>Studies In Computational Intelligence</i>  | 3                   | 2.11       |
| <i>Ceur Workshop Proceedings</i>  | 3                   | 2.11       |
| <i>Software And Systems Modeling</i>  | 3                   | 2.11       |
| <i>Lecture Notes in Networks and Systems</i>  | 3                   | 2.11       |
| <i>Journal of Computer Languages</i>  | 3                   | 2.11       |

Fuente: elaboración propia

**Figura 3.** Red de cooperación entre diferentes países en el campo analizado



Fuente: elaboración propia

### Investigadores destacados

Con respecto a la PI4 se evaluó el desempeño de los investigadores en bibliometría. Se

utilizaron índices como el número de artículos en el campo analizado y sus citas. Un total de 391 autores participaron en la redacción de 142 artículos en el campo analizado.

**Tabla 3.** Investigadores destacados

| Autor              | Institución                     | País     | Artículos | Citas |
|--------------------|---------------------------------|----------|-----------|-------|
| Wimmer, M.         | Johannes Kepler University Linz | Austria  | 6         | 94    |
| Thramboulidis, K.  | University of Patras            | Grecia   | 4         | 80    |
| Vachtsevanou, D.C. | University of St. Gallen        | Suiza    | 3         | 71    |
| Marcos, M.         | Universidad del País Vasco      | España   | 3         | 60    |
| Estevez, E.        | Universidad de Jaén             | España   | 2         | 58    |
| Wortmann, A.       | Universität Stuttgart           | Alemania | 2         | 56    |
| Kontou, I.         | University of Patras            | Grecia   | 2         | 26    |

**Tabla 3.** Investigadores destacados. Continuación

| Autor              | Institución   | País     | Artículos | Citas |
|--------------------|---|----------|-----------|-------|
| Hou, K.M.          | Université Clermont Auvergne  | Francia  | 2         | 17    |
| Dimitrieski, V.    | University of Novi Sad  | Siria    | 4         | 13    |
| Becker, J.         | Karlsruher Institut für Technologie   | Alemania | 2         | 12    |
| Sax, E.            | Karlsruher Institut für Technologie   | Alemania | 2         | 12    |
| Glock, T.          | FZI Forschungszentrum Informatik  | Alemania | 2         | 12    |
| Kern, M.           | FZI Forschungszentrum Informatik  | Alemania | 2         | 12    |
| Betancourt, V.P.   | FZI Forschungszentrum Informatik  | Alemania | 2         | 12    |
| Liu, B.            | FZI Forschungszentrum Informatik  | Alemania | 2         | 12    |
| Rhazali, Y.        | Université Moulay Ismail  | Moroco   | 4         | 11    |
| Iglesias-Urkia, M. | Basque Research and Technology Alliance   | España   | 2         | 11    |
| Wally, B.          | Austrian Network for Information and Communication Technologies for Development | Austria  | 3         | 10    |

Fuente: elaboración propia

La Tabla 3 muestra los nombres de 18 investigadores que publicaron al menos dos artículos en el campo de los enfoques basados en modelos y la Industria 4.0 y que han sido citados (para esos artículos) al menos 10 veces. Manuel Wimmer es el autor más activo en el campo analizado. Ha publicado 6 artículos en el campo de los enfoques basados en modelos y la Industria 4.0, mientras que el promedio del número de artículos por autor es de 1.22. También tiene la tasa de citas más alta (94) y el tercer índice H más alto (31) entre todos los investigadores en el campo. Manuel Wimmer es profesor en *Karlsruher Institut für Technologie*, Alemania.

### Principales organizaciones

En cuanto a la PI5, cabe destacar que en la publicación de los 142 artículos analizados han colaborado 167 organizaciones diferentes. El *Centre National de la Recherche Scientifique* de Francia y la *Technische Uni-*

*versität Wien* de Austria están a la cabeza con seis publicaciones de artículos en este campo, seguidos por la *Universidad Johannes Kepler* de Austria con cinco artículos. La Tabla 4 muestra una lista de las 14 principales organizaciones con al menos tres artículos publicados en el campo de los enfoques basados en modelos y la Industria 4.0. Una revisión de esta lista muestra que las organizaciones están ubicadas principalmente en Europa, pero también en África. Cuatro de las 14 universidades son de Austria y tres son de Francia y Marruecos.

### Análisis de co-palabras

Se realizó un proceso de agrupamiento. De 835 palabras clave, 31 aparecieron al menos cinco veces. La Figura 4 muestra la red de co-ocurrencia de palabras clave en el campo de los enfoques basados en modelos y la Industria 4.0. Esta red se dibujó usando el *software VOSviewer* (Van Eck & Waltman, 2010). *VOSviewer* utiliza una técnica para mapear

y agrupar redes bibliométricas (Waltman et al., 2010). Los resultados de la agrupación de palabras clave llevaron a la creación de cinco grupos. Los diferentes colores marcan cada grupo y las palabras muy repetidas tienen un tamaño de fuente más grande.

El grupo más grande contiene 11 palabras clave que están resaltadas en rojo en la

Figura 4. Las palabras clave en este grupo incluyen la Industria 4.0, ingeniería basada en modelos, fabricación, interoperabilidad y automatización. En este clúster, la Industria 4.0 y la basada en modelos son los temas principales.

**Tabla 4.** Número de artículos en las principales organizaciones

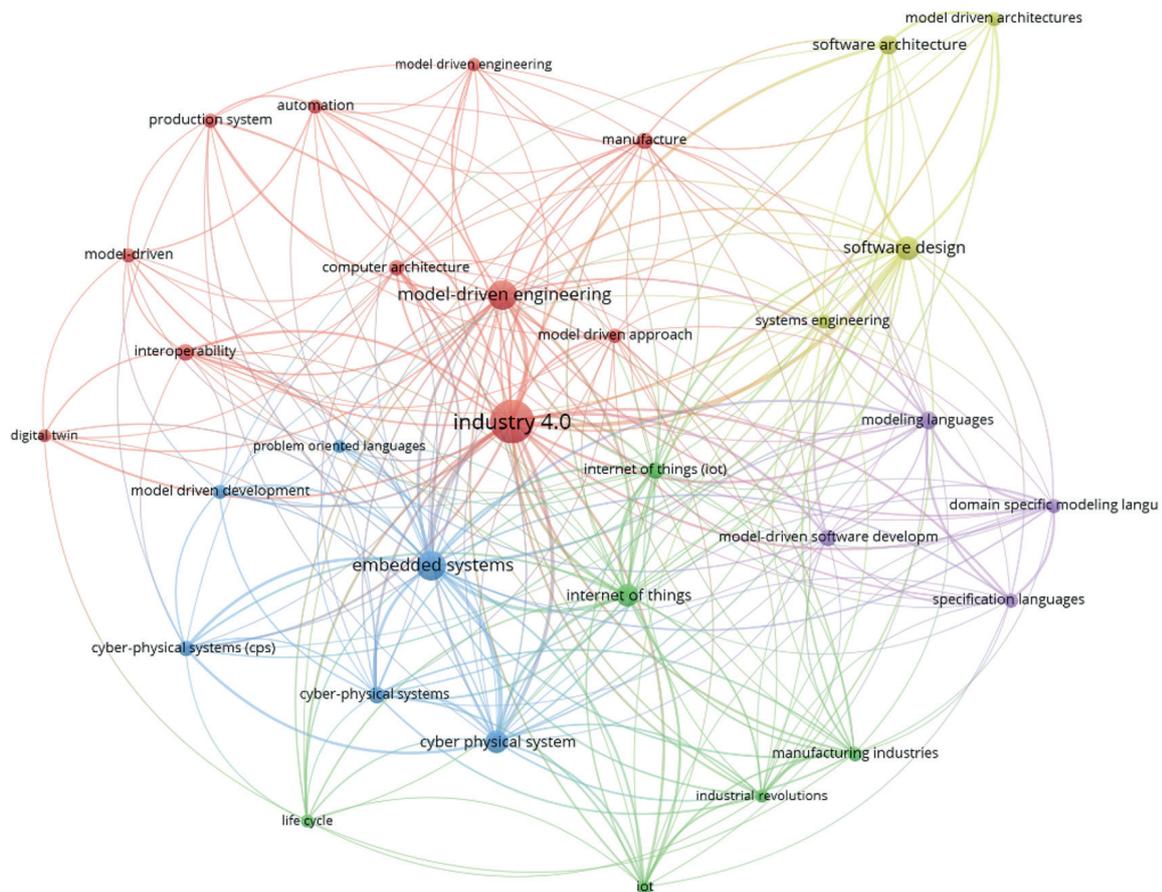
| Organización                                       | País    | Número de artículos |
|--|---------|---------------------|
| Centre National de la Recherche Scientifique       | Francia | 6                   |
| Technische Universität Wien                        | Austria | 6                   |
| Johannes Kepler University Linz                    | Austria | 5                   |
| Université Moulay Ismail                           | Moroco  | 4                   |
| Ecole Supérieure de Technologie Meknes             | Moroco  | 4                   |
| Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers ENSAM | Moroco  | 4                   |
| University of Patras                               | Grecia  | 4                   |
| KEBA AG  | Austria | 4                   |
| CEA, Institut LIST                                 | Francia | 4                   |
| University of Novi Sad                             | Serbia  | 4                   |
| Universidad de Jaén                                | España  | 3                   |
| Universidad del País Vasco                         | España  | 3                   |
| Universite Paris-Saclay                            | Francia | 3                   |
| Christian Doppler Forschungsgesellschaft           | Austria | 3                   |

Fuente: elaboración propia

El segundo grupo contiene seis palabras clave resaltadas en verde. En este clúster se pueden apreciar palabras clave como internet de las cosas y sus variaciones junto con industrias manufactureras, la cual hace referencia al internet de las

cosas como una tecnología clave para la implementación de la Industria 4.0. El tercer grupo se destacó en azul y contiene seis palabras clave. Este grupo también se ocupa de los sistemas integrados y los sistemas físicos cibernéticos.

**Figura 4.** Red de co-ocurrencia de palabras clave para enfoques basados en modelos y la Industria 4.0



Fuente: salida de VosViewer

Los grupos cuarto y quinto tienen cuatro palabras clave cada uno y están resaltados en amarillo y morado, respectivamente. Estos grupos se ocupan de enfoques basados en modelos e ingeniería de software.

## Discusión y Conclusiones

Este artículo ha presentado un estudio bibliométrico sobre el uso de enfoques basados en modelos para la Industria 4.0. Los resultados proporcionan información valiosa que puede ser utilizada como guía por investigadores nuevos o experimentados como un análisis del estado actual y las tenden-

cias futuras antes de iniciar, en este campo, un proyecto de investigación en el futuro.

Para brindar una perspectiva integral de la investigación en enfoques basados en modelos e Industria 4.0, este artículo presenta un estudio bibliométrico de documentos indexados en Scopus durante 2015 a 2022. Los resultados de los estudios en bibliometría muestran, en la última década, la tasa de crecimiento de los artículos en el campo de la Industria 4.0 dirigida por modelos tienen una tendencia a aumentar. Esto se ha dado gracias a que los enfoques basados en modelos y la industria son áreas de investigación activa por separado con un número creciente de publicaciones a lo largo de

los años, el estudio de uso de ambas áreas muestra mejoras prometedoras.

Un total de 15 países han participado en la publicación de 142 artículos en este campo, de los cuales Austria, Alemania, Francia y España han publicado la mayor cantidad de artículos, con diferencia en comparación con otros países. *Procedia Computer Science*, *Lecture Notes in Computer Science* y la *IEEE International Conference on Emerging Technologies* y *Factory Automation* ETFA son los tres principales lugares de publicación. En cuanto a las revistas *Software and System Modeling Journal* e *IEEE Access Journal* son las que cuentan con más trabajos en este campo.

Manuel Wimmer es el investigador más activo e influyente en este campo. Es profesor en Karlsruher Institut für Technologie, Alemania. Los resultados indican que los investigadores se centran en varios temas, tales como: la fabricación, la interoperabilidad y la automatización. Por lo tanto, dadas las ventajas de los modelos basados específicamente en la interoperabilidad y la automatización, se deben seguir desarrollando nuevos enfoques basados en modelos para resolver los problemas actuales de la Industria 4.0.

Dos limitaciones fueron detectadas en el presente estudio. La primera es que los datos bibliométricos son dinámicos y evolucionan continuamente con su crecimiento y diversidad, así como su posicionamiento en la literatura. Sin embargo, este estudio puede ser utilizado como *benchmark* para futuros estudios de enfoques basados en modelos para la Industria 4.0 y, así, continuar completando los análisis bibliométricos que expandan las técnicas y los métodos.

La segunda limitación se relaciona con los términos de búsqueda utilizados. El uso de términos de búsqueda permitió la exploración de estructuras intelectuales para examinar las publicaciones. Como resultado, este estudio consideró el término general Industria

4.0 en el contexto de ingeniería, desarrollo y arquitectura dirigida por modelos. Otros estudios que tengan en cuenta otros términos más específicos, que sí se detectaron en las publicaciones analizadas, podrán detectar tendencias en esas áreas más particulares.

A pesar de las limitaciones mencionadas, este estudio brinda nuevos indicios en las tendencias de las publicaciones de la Industria 4.0 en el contexto de los enfoques basados en modelos (2015-2018). Así, este trabajo constituye un punto de partida para futuras investigaciones sobre este dominio.

## Referencias

- Ahmi, A., Elbardan, H., & Ali, R. H. (2019). Bibliometric Analysis of Published Literature on Industry 4.0. *2019 International Conference on Electronics, Information, and Communication (ICEIC)*, 1-6.
- Akdur, D., Garousi, V., & Demirörs, O. (2018). A Survey on Modeling and Model-Driven Engineering Practices in the Embedded Software Industry. *Journal of Systems Architecture*, *91*, 62-82.
- Almorsy, M., Grundy, J., & Ibrahim, A.S. (2014). Adaptable, Model-Driven Security Engineering For SaaS Cloud-Based Applications. *Automated Software Engineering*, *21*(2), 187-224.
- Barangi, H., Kolahdouz Rahimi, S., Zamani, B., & Khasseh, A.A. (2021). Model-Driven Software Engineering: A Bibliometric Analysis. *Journal of Computing and Security*, *8*(1), 93-108.
- Bézivin, J. (2004). In Search of a Basic Principle for Model Driven Engineering. *The European Journal for the Informatics Professional*, *5*(2), 21-24.
- Binder, C., Calà, A., Vollmar, J., Neureiter, C., & Lüder, A. (2021). Automated Model Transformation in modeling Digital Twins of Industrial Internet-of-Things Applications utilizing AutomationML. *2021 26th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, 1-6. <https://doi.org/10.1109/ETFA45728.2021.9613172>

- Brambilla, M., Cabot, J., & Wimmer, M. (2017). Model-Driven Software Engineering in Practice. *Synthesis Lectures on Software Engineering*, 3(1), 1-207.
- Cobo, M. J., López, A. G., Herrera, E., & Herrera, F. (2011). Science Mapping Software Tools: Review, Analysis, and Cooperative Study Among Tools. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, 62(7).
- Erazo-Rivera, R.P., Pancorbo-Sandoval, J.A., Leyva-Ricardo, S.E., & Barba-Mosquera, Á.E. (2021). La Innovación como Herramienta de Gestión Comercial en las Pymes de Santo Domingo de los Tsáchilas. *Economía y Negocios*, 12(2), 52-63. <https://doi.org/10.29019/eyn.v12i2.957>
- Gajdzik, B., Grabowska, S., Saniuk, S., & Wieczorek, T. (2020). Sustainable Development and Industry 4.0: A Bibliometric Analysis Identifying Key Scientific Problems of the Sustainable Industry 4.0. *Energies*, 13(16), 4254.
- Gascueña, J. M., Navarro, E., & Fernández-Caballero, A. (2012). Model-Driven Engineering Techniques for the Development of Multi-Agent Systems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 25(1), 159-173.
- Hutchinson, J., Whittle, J., Rouncefield, M., & Kristoffersen, S. (2011). Empirical Assessment of MDE in Industry. *Proceedings of the 33rd International Conference on Software Engineering*, 471-480.
- Kipper, L.M., Furstenuau, L.B., Hoppe, D., Frozza, R., & Iepsen, S. (2020). Scopus Scientific Mapping Production in Industry 4.0 (2011-2018): A Bibliometric Analysis. *International Journal of Production Research*, 58(6), 1605-1627.
- Kitchenham, B., & Charters, S. (2007). Guidelines for Performing Systematic Literature Reviews in Software Engineering. In *Engineering* (2), Issue 1051.
- Liu, B., Glock, T., Betancourt, V. P., Kern, M., Sax, E., & Becker, J. (2020). Model Driven Development Process for a Service-oriented Industry 4.0 System. *2020 9th International Conference on Industrial Technology and Management (ICITM)*, 78-83. <https://doi.org/10.1109/ICITM48982.2020.9080344>
- Livieri, B., Di Cagno, P., & Bochicchio, M. (2015). A Bibliometric Analysis and Review on Performance Modeling Literature. *Complex Systems Informatics and Modeling Quarterly*, 2, 56-71.
- López-Robles, J.-R., Otegi-Olaso, J.-R., Cobo, M.-J., Bertolin-Furstenau, L., Kremer-Sott, M., López-Robles, L.-D., & Gamboa-Rosales, N.-K. (2020). *The Relationship Between Project Management and Industry 4.0: Bibliometric Analysis of Main Research Areas Through Scopus*.
- Mahdavi-Hezavehi, S., Durelli, V. H. S., Weyns, D., & Avgeriou, P. (2017). A Systematic Literature Review on Methods that Handle Multiple Quality Attributes in Architecture-Based Self-Adaptive Systems. *Information and Software Technology*, 90, 1-26.
- Melean Romero, R., & Torres, F. (2021). Gestión de costos en las cadenas productivas: reflexiones sobre su génesis. *Retos, Revista de Ciencias de Administración y Economía*, 11(21), 131-146. <https://doi.org/10.17163/ret.n21.2021.08>
- Mohagheghi, P., Gilani, W., Stefanescu, A., & Fernandez, M. A. (2013). An Empirical Study of the State of the Practice and Acceptance of Model-Driven Engineering in Four Industrial Cases. *Empirical Software Engineering*, 18(1), 89-116.
- Molano, J. I. R., Lovelle, J. M. C., Montenegro, C. E., Granados, J., & Crespo, R. G. (2018). Metamodel for Integration of Internet of Things, Social Networks, The Cloud and Industry 4.0. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 9(3), 709-723.
- Mora-Sánchez, D., & Guerrero-Marín, L. (2020). Industria 4.0: el reto en la ruta hacia las organizaciones digitales. *Estudios de la Gestión: Revista Internacional de Administración*, (8), 186-209. <https://doi.org/10.32719/25506641.2020.8.7>
- Muhuri, P. K., Shukla, A. K., & Abraham, A. (2019). Industry 4.0: A Bibliometric Analysis and Detailed Overview. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 78, 218-235.
- Parveen, R., Thaker, P., & Goveas, N. (2019). Model-Based Approach for Cyber-Physical Systems Applications Development. Con-

- ference Paper in *23rd Pacific Asia Conference on Information Systems: Secure ICT Platform for the 4th Industrial Revolution, PACIS 2019. July 8-12 2019, Xi'an, China*. <https://doi.org/10.23919/ELINFO-COM.2019.8706445>
- Petersen, K., Feldt, R., Mujtaba, S., & Mattsson, M. (2008). Systematic Mapping Studies in Software Engineering. *EASE*, 8, 68-77.
- Ruiz, J., Serral, E., & Snoeck, M. (2018). Evaluating User Interface Generation Approaches: Model-Based Versus Model-Driven Development. *Software & Systems Modeling*, 1-24. <https://doi.org/10.1007/s10270-018-0698-x>
- Samaniego Guevara, H. (2021). Plan de producción farmacéutica de soluciones parentales con programación lineal *Estudios de la Gestión: Revista Internacional de Administración*, (10), 187-210. <https://doi.org/10.32719/25506641.2021.10.9>
- Samimi, D. L., Zamani, B., & Kolahdouz, R. S. (2016). Bidirectional Model Transformation Approaches. A Comparative Study. Conference Paper in *6th International Conference on Computer and Knowledge Engineering (ICCKE 2016)*. October 20-21 2016, Mashhad, Iran. <https://doi.org/10.1109/ICCKE.2016.7802159>
- Szvetits, M., & Zdun, U. (2016). Systematic Literature Review of the Objectives, Techniques, Kinds, and Architectures of Models at Runtime. *Software & Systems Modeling*, 15(1), 31-69.
- Usman, M., Iqbal, M. Z., & Khan, M. U. (2017). A Product-Line Model-Driven Engineering Approach for Generating Feature-Based Mobile Applications. *Journal of Systems and Software*, 123, 1-32.
- Van Eck, N., & Waltman, L. (2010). Software Survey: Vosviewer, a Computer Program for Bibliometric Mapping. *Scientometrics*, 84(2), 523-538.
- Vještica, M., Dimitrieski, V., Pisarić, M., Kordić, S., Ristić, S., & Luković, I. (2019). Towards a Formal Description and Automatic Execution of Production Processes. *2019 IEEE 15th International Scientific Conference on Informatics*, 463-468.
- Vještica, M., Dimitrieski, V., Pisarić, M., Kordić, S., Ristić, S., & Luković, I. (2021). Towards a Formal Specification of Production Processes Suitable for Automatic Execution. *Open Computer Science*, 11(1), 161-179. <https://doi.org/10.1515/comp-2020-0200>
- Wallin, J. A. (2005). Bibliometric Methods: Pitfalls and Possibilities. *Basic & Clinical Pharmacology & Toxicology*, 97(5), 261-275.
- Waltman, L., Van Eck, N. J., & Noyons, E. C. M. (2010). A Unified Approach to Mapping and Clustering of Bibliometric Networks. *Journal of Informetrics*, 4(4), 629-635.
- Whittle, J., Hutchinson, J., & Rouncefield, M. (2013). The State of Practice in Model-Driven Engineering. *IEEE Software*, 31(3), 79-85.
- Wortmann, A., Barais, O., Combemale, B., & Wimmer, M. (2020). Modeling Languages in Industry 4.0: An Extended Systematic Mapping Study. *Software and Systems Modeling*, 19(1), 67-94. <https://doi.org/10.1007/s10270-019-00757-6>
- Wortmann, A., Combemale, B., & Barais, O. (2017). A Systematic Mapping Study on Modeling for Industry 4.0. *2017 ACM/IEEE 20th International Conference on Model Driven Engineering Languages and Systems (MODELS)*, 281-291.
- Ziaei, M., Zamani, B., & Bohlooli, A. (2020). A Model-Driven Approach for IoT-Based Monitoring Systems in Industry 4.0. 99-105. <https://doi.org/10.1109/SCIOT50840.2020.9250202>

