

Integración vertical en el ámbito de la I4.0

Vertical integration in the I4.0 scope

Presentación: 4 y 5 de octubre de 2022

Doctoranda:

Rachel Pairol Fuentes

Instituto de Desarrollo y Diseño (INGAR), Universidad Tecnológica Nacional (UTN), Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)- Argentina

rpairol@santafe-conicet.gov.ar

Directora:

Marcela Vegetti

Codirectora:

Luciana Roldán

Resumen

La Industria 4.0 (I4.0) es una tendencia de la industria hacia la automatización y el uso de datos en las tecnologías de producción y los procesos. El concepto I4.0 promueve la convergencia del mundo físico y virtual, habilitando la conexión e interoperabilidad entre los diversos elementos físicos y virtuales. La integración e interoperabilidad de los sistemas involucrados y las tecnologías que le dan soporte se han convertido en uno de los 5 desafíos que resta resolver en la implementación de la I4.0. El uso de ontologías es la solución indicada para abordar la interoperabilidad semántica, ya que expresan el significado de los conceptos y las relaciones del dominio de una manera clara y explícita. El objetivo general de la investigación es definir e implementar una infraestructura que dé soporte a la integración semántica de los sistemas de organizaciones de manufactura en el contexto de la I4.0. Para este propósito, es necesario definir ontologías que permitan la representación del dominio de los sistemas de información involucrados en el ciclo de vida del producto.

Palabras clave: RAMI 4.0, Industria 4.0, ontologías, integración vertical.

Abstract

Industry 4.0 (I4.0) is an industry trend towards automation and the use of data in production technologies and processes. The I4.0 concept promotes the convergence of the physical and virtual world, enabling the connection and interoperability between the various physical and virtual elements. Integration and interoperability of the systems involved and the technologies that support them have become one of the 5 challenges that remain to be solved in the implementation of I4.0. Use of ontologies is the right solution to address semantic interoperability since they express the meaning of the concepts and relationships of the domain in a clear and explicit way. The general objective of the research is the definition and implementation of an infrastructure that supports the semantic integration of manufacturing organization systems in the context of I4.0. For this purpose, it is necessary to define ontologies that allow the representation of the information systems domain involved in the product life cycle.

Keywords: Industry 4.0, ontologies, vertical integration.

Introducción

Los sistemas ciber-físicos de producción han tenido un auge desde la aparición de la industria 4.0 (I4.0). Para su implementación se ha desarrollado el modelo de referencia RAMI 4.0, desarrollado por la Asociación de fabricantes eléctricos y electrónicos alemanes. Se trata de un mapa tridimensional en el que se resumen los elementos esenciales de la I4.0 de forma escalonada y estructurada, destacando la importancia de la interoperabilidad y estandarización de modelos para la integración de plataformas heterogéneas. Además, proporciona una base y terminología común para desarrollar nuevos productos y modelos de negocio, en el marco de un mundo cada vez más digitalizado y automatizado.

RAMI 4.0 abarca el ciclo de vida del producto y su cadena de valor, permitiendo la definición de componentes actuales, como componentes I4.0 mediante la definición de 6 capas (*Business, Functional, Information, Communication, Integration, Asset*) que conforman uno de los ejes. El ciclo de vida y flujo de valor se encuentra representado en el eje horizontal y está dividido en *Type* e *Instance*, conceptos que se basan en la normativa IEC 62890. El tercer eje, llamado Niveles de jerarquía, describe la clasificación funcional de varios aspectos dentro del ámbito de I4.0. Este eje se basa en los estándares IEC 62264 y IEC 61512, a los que se le añadieron los niveles “Product” y “Connected World”.

La I4.0 tiene una arquitectura tecnológica muy compleja debido a los sistemas de fabricación involucrados (Lee et al., 2015), y a las tecnologías que le dan soporte. Esta complejidad es una de las principales preocupaciones en esta nueva etapa industrial. En general, la integración de sistemas de I4.0 tiene dos enfoques: horizontal y vertical (Tupa et al., 2017).

La integración vertical consiste en lograr la integración de los distintos sistemas que dan soporte a los diversos niveles de toma de decisión en las industrias, permitiendo una “manufactura inteligente”. Los sistemas involucrados, manejan información heterogénea, en diverso formato en incluso de distinta granularidad y tiempo de actualización/generación. Una primera aproximación para la integración de los sistemas ha sido la definición de los estándares. En el área sistemas industriales, la ISO, y en particular el Comité Técnico ISO TC 184 “Sistemas de automatización e integración” es uno de referentes en el tema. Sin embargo, los usuarios de estos estándares suelen enfrentarse también a problemas de inconsistencia semántica. En (Fraga et al., 2018) se analizó un conjunto de estándares del comité de ISO y se encontraron problemas que se vinculan con el uso de: i) un mismo término para referir a distintos conceptos y ii) diferentes términos para representar a un mismo concepto. De esta manera, se observa que el uso de estándares no soluciona el problema de la integración vertical, ya que queda aún por resolver la interoperabilidad semántica de los mismos.

Según Pras et al. (2007), el uso de ontologías es el enfoque indicado para abordar la interoperabilidad semántica, ya que expresan el significado de los conceptos y relaciones de dominio de una manera clara y explícita. De acuerdo a Gruber (1995), una ontología es una especificación formal de una conceptualización compartida. Al ser una representación formal, una ontología es “entendible” por las máquinas, lo que permite la automatización de los procesos. Las ontologías permiten el desarrollo de sistemas inteligentes (Guizzardi, 2005). Esto las hace una herramienta importante para la implementación de la manufactura, el producto, la cadena de suministro y el trabajo inteligente de la visión I4.0.

El objetivo general de la investigación es la definición e implementación de una infraestructura que dé soporte a la integración semántica de los sistemas de organizaciones de manufactura en el contexto de la Industria 4.0. Para este propósito, es necesario definir ontologías que permitan la representación del dominio de los sistemas de información involucrados en el ciclo de vida del producto. Además, se requiere conformar una red de ontologías a partir de los modelos semánticos creados, lo cual abarcará la definición de una ontología de referencia con los conceptos comunes y la definición de los mapeos necesarios para alinear conceptos de otras ontologías. Al mismo tiempo, se requiere definir e implementar servicios que permitan la incorporación de nuevos modelos semánticos a la red, así como la actualización de las ontologías existentes.

Desarrollo

La implementación del concepto de I4.0 requiere alcanzar la integración de todos los sistemas que dan soporte al proceso productivo de una organización. Para ello, es necesario analizar el dominio de las organizaciones de producción industrial, así como los potenciales nuevos datos que pueden obtenerse a nivel de planta de producción con la IoT y cómo éstos pueden transformarse en información útil para la toma de decisiones en los niveles tácticos y/o estratégicos. Actualmente, la investigación se encuentra en la primera etapa de desarrollo que consiste en la revisión bibliográfica y análisis del estado del arte, a fin de lograr la definición del ambiente y los límites del problema. Como actividad indispensable se deberá realizar dicha revisión para profundizar el conocimiento en el área de ontologías en el dominio de manufactura, así como de las tecnologías y las diferentes propuestas y estándares existentes relacionadas con todas las tecnologías que involucra el concepto de I4.0.

Con este propósito y para conocer las distintas áreas de investigación en donde se esté utilizando la ingeniería ontológica, se realizó un mapeo sistemático y un esquema de clasificación enfocado en el uso de ontologías que abordan la ingeniería de software (IS) aplicando prácticas de ingeniería y gestión, como por ejemplo los métodos ágiles. En este mapeo se incluyeron 56 artículos publicados desde 2003, los cuales fueron clasificados según un esquema que consta de 3 categorías principales: práctica ágil utilizada, utilidad de la ontología en la gestión de proyectos y campo de aplicación. Los resultados de este relevamiento bibliográfico constituyen una fuente de referencia para los interesados en explorar sobre las ontologías y el desarrollo de software con un enfoque ágil,

indican las áreas en donde se concentran las investigaciones actuales, así como las dificultades que enfrenta la ingeniería ontológica para la aplicación de prácticas ágiles en el proceso de desarrollo. Además, permitió determinar que en las últimas décadas se han desarrollado numerosas ontologías que facilitan principalmente el proceso de desarrollo de software mediante la mejora de la gestión del conocimiento.

En paralelo al estudio de las cuestiones metodológicas relativas al desarrollo de ontologías, se ha comenzado también el análisis del dominio de la I4.0. Este nuevo paradigma propone automatizar los sistemas de producción y hacerlos más eficientes ante el comportamiento actual del mercado, en el que los productos son personalizados y su ciclo de vida es corto. La inclusión del internet de las cosas en sistemas de producción automáticos heterogéneos supone un desafío para la integración de las tecnologías operacionales y las tecnologías de la información OT-IT (Givehchi et al., 2017). Para lograr dicha integración se han desarrollado estándares como por ejemplo: OPC Unified Architecture (OPC UA) y AutomationML (AML), que posibilitan la descripción de los componentes que intervienen en la I4.0 (sensores, actuadores, CPS) y las relaciones entre ellos.

OPC UA está estandarizado en el IEC 62541 y es el más usado para la transmisión y modelado de información en automatización, además de tratar otros aspectos como seguridad, confiabilidad, alarmas o datos históricos (Schleipen et al., 2016). Por su parte, AML está estandarizado en el IEC 62714 para el modelado e intercambio de datos que cubre la topología de la planta, la estructura de los componentes, geometría y cinemática, comportamiento lógico y redes de comunicación (Schmidt & Lüder, 2018) (Hua & Hein, 2019). A pesar de facilitar la interoperabilidad, los modelos de información generados por estos estándares no están semánticamente bien definidos, dificultando la integración y procesamiento automático de datos, por lo que se requiere desarrollar herramientas que permitan alcanzar una mayor interoperabilidad y provean mecanismos y lenguajes de consulta de información (Grangel-González & Vidal, 2021).

Teniendo en cuenta el rol de las ontologías y los lenguajes RDF y OWL en la representación formal del conocimiento y la necesidad de realizar investigaciones en el ámbito de la interoperabilidad de los estándares de la RAMI en el ámbito de la I4.0, se realizó una revisión sobre la transformación de los lenguajes OPC UA y AML a OWL y/o RDF. El objetivo de esta revisión fue identificar la literatura relacionada con la integración entre estos lenguajes y proporcionar una visión general sobre los temas que se han tratado, para identificar y clasificar las principales contribuciones. Además, se trabajó en conocer los principales roles que desempeñan las ontologías en la formalización de los estándares de la I4.0 y lenguajes utilizados para implementar tales ontologías, así como los beneficios y desafíos de la utilización de ontologías en la formalización de estándares I4.0.

En el ámbito de la I4.0, un Asset (activo) es todo aquello que tiene valor para la empresa (Producto final, inventarios, máquinas), pero también productos intangibles como un software o una idea. Es crucial en este entorno, la representación de los Assets que existen en las plantas de producción y representarlos virtualmente. Por ello, un concepto importante de la RAMI 4.0 es el de Asset Administration Shell (AAS), el cual se define como la representación digital y la funcionalidad técnica de un activo. Un AAS almacena la información del Asset durante su ciclo de vida: diseño, fabricación, mantenimiento y permite la interoperabilidad con otros Assets y entidades localizadas en las capas superiores del modelo RAMI 4.0 (Siqueira & Davis, 2022). Para lograr esto, un AAS está compuesto por distintos submodelos que proveen información de cada dominio técnico de un Asset, los cuales pueden ser especificados por medio de diversos estándares. La implementación de un AAS es considerado como el Digital Twin en el contexto de la industria 4.0 (Bader et al.,2020).

En la Parte 1 de la especificación “Details of the Asset Administration Shell” (Bader et al.,2020) publicada por Platform I4.0 se presenta un metamodelo (ver Figura 1) para especificar la información de un AAS.

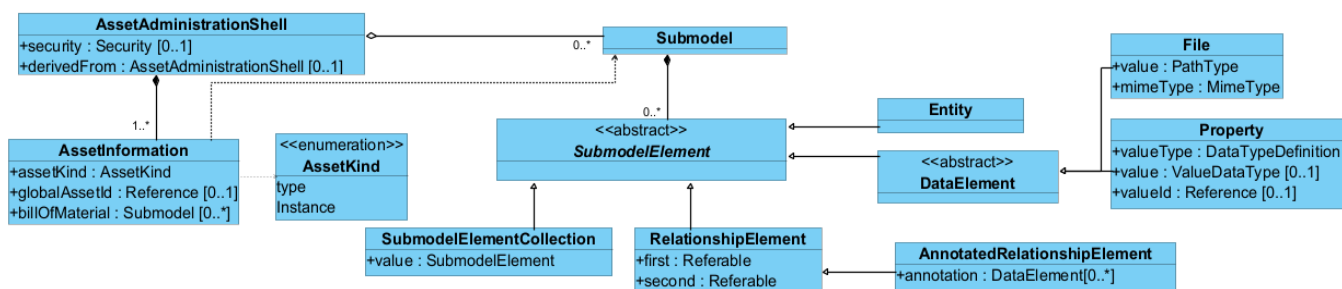


Figura 1: Metamodelo del Asset Administration Shell. Tomado de (Bader et al.,2020)

Según este meta-modelo la clase *AssetAdministrationShell* representa digitalmente la información de los Assets de valor para una organización (representado por la clase *AssetInformation*). Un *AssetAdministrationShell* puede tener cero o varios submodelos que describen al Asset referenciado según diferentes aspectos. Cada submodelo

está compuesto por elementos (*SubmodelElement*). Un elemento de submodelo puede representar una colección de elementos (*SubmodelElementCollection* o SEC), datos (*DataElement*), propiedades (*Property*) o archivos (*File*). Un *DataElement* puede estar relacionado con cualquier concepto que sea referenciable (*Referable*), como por ejemplo entidades (*Entity*). Por otro lado, una relación se representa por medio de un *RelationshipElement*. Esta clase se especializa en *AnnotationRelationshipElement*, que permite agregar información sobre la relación entre dos elementos.

Desde la perspectiva de la interoperabilidad, se busca definir y estandarizar un único submodelo para cada aspecto o dominio técnico, que difieren según los diferentes tipos de sistemas de producción industrial que existen. En particular, la industria de manufactura por lotes o batch posee características propias, y, por lo tanto, los activos que deben identificarse para digitalizar también serán específicos de esta industria. Se ha detectado que actualmente no existen submodelos de AAS que hayan sido propuestos y estén disponibles para este tipo de industria. Con el propósito de representar Assets de la industria batch se comenzó a trabajar en la definición de un modelo extendido, basado en el estándar ISA-88. Éste define el modelo de procesos batch y permite especificar las actividades que se llevan a cabo en una planta y el orden en que se realizarán, asociando a cada una de éstas, los equipos necesarios del modelo físico de la empresa. Asimismo, como forma de validación de la propuesta, se ha aplicado el modelo en un caso de estudio.

Resultados

Durante la etapa de relevamiento del dominio y de las herramientas de desarrollo existentes, se llevaron a cabo 2 mapeos sistemáticos. El primero relacionado con aspectos metodológicos del desarrollo de ontologías y su utilización en prácticas ágiles. En tanto el segundo se focalizó en conocer el dominio de la I4.0.

Del total de trabajos analizados en el primer mapeo, se encontró que 24% abordan el desarrollo de ontologías en las áreas de gestión ágil de proyectos de software. Además, se eligió examinar sólo ontologías de dominio que abordan procesos de IS (ejemplo: modelado de dominios, ingeniería de requisitos, la reutilización de componentes, el diseño, mantenimiento, razonamiento con el uso de ontologías, representar y almacenar elementos de conocimiento de un área de interés (dominio)) (ver Figura 2) que apliquen prácticas ágiles bien establecidas y conocidas (Crystal, Lean, XP y Scrum, etc) y los campos de aplicación Ingeniería de conocimiento (IC), Web Semántica (WS) y como resultado un Sistema de información (SI).

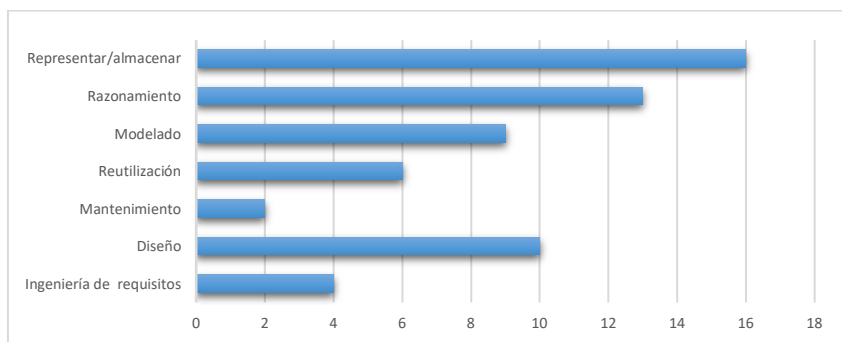


Figura 2: Uso de las ontologías en proyectos de desarrollo de software

Este estudio pone de manifiesto que existe un creciente interés en continuar investigando sobre las ventajas de la aplicación de las ontologías en la gestión del conocimiento de los procesos de desarrollo ágiles, así como también en cómo emplear los principios ágiles en el desarrollo de estas ontologías. Se puede ver más detalle en (Fuentes et al., 2021).

El segundo mapeo sistemático recopiló estudios recientes sobre la transformación entre los lenguajes OPC UA o AML y OWL o RDF. Se consultaron y analizaron artículos de conferencias y revistas a partir de 2015 de las bases de datos Scopus, IEEE y ACM. El estudio se limitó a artículos escritos en lengua inglesa y publicados en revistas. Del análisis de los trabajos encontrados se identificó que en todas las contribuciones se utilizó OWL como lenguaje de implementación de la ontología (Figura 3) Asimismo, los lenguajes OWL-S y SAWSDL fueron usados para especificar los servicios y SWRL para especificar reglas de negocio (19% de las contribuciones). Por último, 6 propuestas (el 38% de los artículos retenidos) emplearon SPARQL para recuperar conocimiento de las fuentes de datos. La mayoría de las contribuciones (94%) se centran en la representación del conocimiento (Fig. 4), lo cual es lo que se esperaba en cierto modo debido a que las ontologías sirven para este propósito. Además, el 4% de las contribuciones analizadas evalúan el uso de la ontología como integración de servicios inteligentes e integración de datos de AutomationML y OPC UA. Especifican un conjunto de métodos de OPC UA con el propósito de sintetizar planes de orquestación flexibles. Finalmente, el 2% de las contribuciones, analizan el uso

de la ontología como lenguaje de consulta y lo presenta como una alternativa a la formulación de consultas nativas de OPC UA (recuperación de conocimientos en la Figura 4).

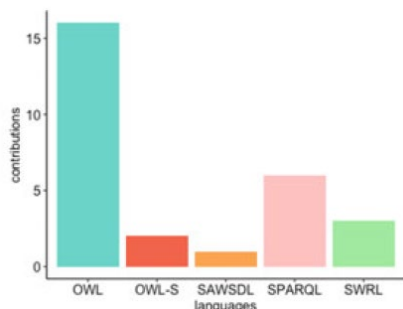


Figura 3: Lenguajes utilizados

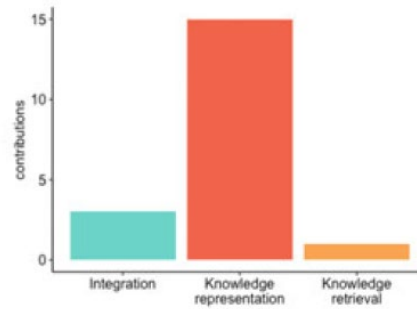


Figura 4: Roles de las ontologías

La mayoría de las contribuciones esperan utilizar la ontología como base de conocimientos. Otro beneficio común que se espera de su uso es la comprobación de la coherencia. Otras pretendían obtener un marco flexible para la orquestación de procesos. Otros estudios tenían como objetivo alcanzar un gemelo digital semántico como una especificación semántica de los componentes de hardware y software de los recursos de fabricación. Los estudios no informaron desafíos o lecciones en relación con la implementación de su ontología. Solo una contribución hace hincapié en las desventajas de la redundancia de datos. Otras informan de algunos problemas relacionados con la sobrecarga de comunicación y lo compara con una especificación híbrida de los servicios. Se puede ver más detalle de los resultados de este mapeo en (Domínguez et al., 2022).

El tercer resultado de las actividades llevadas adelante es la propuesta de un modelo para representar digitalmente Assets del dominio de la industria de procesos batch. Este modelo parte de la extensión del metamodelo del ASS propuesto por la Plattform I4.0 alemana, e incorpora la definición de submodelos apropiados para este tipo de industria. Los conceptos incluidos están basados en el estándar ISA 88, específicos de la industria de procesos batch.

El modelo permite la representación digital de Assets Producto y Lote, importantes para este tipo de industria. Para la caracterización de éstos se definieron 4 submodelos para diferentes aspectos de información: los datos técnicos, y de documentación para el producto, y los datos de proceso de manufactura y datos operacionales para el Lote. El submodelo de datos técnicos abarca los elementos que forman parte de la receta maestra, mientras que el submodelo de manufactura en lote abarca los elementos para digitalizar las recetas de control y las características del proceso batch (ver Figura 5). El modelo propuesto puede ser instanciado para diferentes tipos de producción batch. En particular, se hizo una instanciación del modelo propuesto para un proceso batch de producción de detergente en polvo, en el cual se indicaron específicamente las materias primas, equipos e información relacionada al batch.

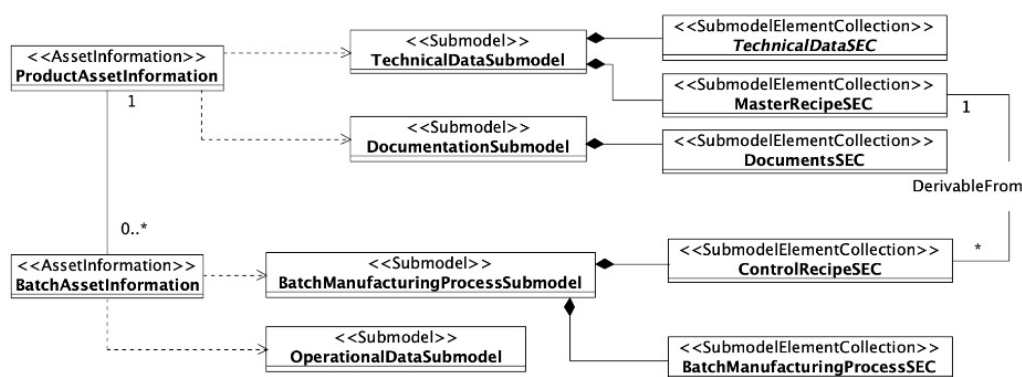


Figura 5: Especialización del AssetInformation

Conclusiones

En esta primera etapa de la investigación, se describieron las principales aplicaciones de la ingeniería ontológica tanto para el área del proceso de desarrollo software, como para implementar los estándares AutomationML y OPC UA. Además, se identificaron los principales desafíos a los que se enfrenta la Industria 4.0. Éstos son la falta de apoyo a las tareas de ingeniería ontológica realizadas por el ingeniero del conocimiento, la representación del gemelo digital semántico, la duplicación de datos y la sobrecarga de comunicación. Además, pensando en trabajos futuros, se determinó que las ontologías pueden ser utilizadas en conjunto con el AAS para lograr la integración vertical y la interoperabilidad entre los productos que tienen valor para la empresa y los sistemas de información.

Referencias

- Bader, S., Barnstedt, E., Bedenbender, H., Billman, M., Boss, B., and A. Braunmandl. (2020). "Details of the Asset Administration Shell Part 1 - The exchange of information between partners in the value chain of Industrie 4.0," *Plattf. Ind. 4.0*, vol. 0, p. 473.
- Domínguez, J.A., Fuentes, R.P., Vegetti, M., Roldán, L., Gonnet, S., Diván, M.J. (2022). Ontology Implementation of OPC UA and AutomationML: A Review. In: Nakamatsu, K., Kountchev, R., Patnaik, S., Abe, J.M., Tyugashev, A. (eds) *Advanced Intelligent Technologies for Industry. Smart Innovation, Systems and Technologies*, vol 285. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-9735-7_2
- Fraga, A., Vegetti, M., Leone, H.(2018). Semantic Interoperability among Industrial Product Data Standards using an Ontology Network. In *Proceedings of the 20th International Conference on Enterprise Information Systems - Volume 2: ICEIS 2018*, ISBN: 978-989-758-298-1, 328-335.
- Givchchi, O., et al. (2017). Interoperability for industrial cyber-physical systems: an approach for legacy systems. *IEEE Trans. Ind. Inform.* 13(6), 3370–3378. <https://doi.org/10.1109/TII.2017.2740434>
- Grangel-González, I., L. Halilaj, G. Coskun, S. Auer, Collarana, D. Hoffmeister. M. (2016). Towards a Semantic Administrative Shell for Industry 4.0 Components. In: *2016 IEEE Tenth International Conference on Semantic Computing (ICSC)*. <https://doi.org/10.1109/ICSC.2016.58>
- Grangel-González, I., & Vidal, M. E. (2021). Analyzing a Knowledge Graph of Industry 4.0 Standards. *The Web Conference 2021 - Companion of the World Wide Web Conference, WWW 2021*, 16–25. <https://doi.org/10.1145/3442442.3453542>
- Guizzardi, G. (2005). *Ontological foundations for structural conceptual models*. PhD Thesis, University of Twente.
- Hua, Y., & Hein, B. (2019). Interpreting OWL Complex Classes in AutomationML based on Bidirectional Translation. *IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, ETFA, 2019-Septe*, 79–86. <https://doi.org/10.1109/ETFA.2019.8869456>
- Lee, J., Bagheri, B., Kao, H.A. (2015). A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems. *Manuf. Lett.* 3, 18–23.
- Fuentes, R. P, Vegetti, M., Roldán, L. (2021). El Uso de Ontologías en la Ingeniería de Software basada en Prácticas Ágiles. Un Mapeo sistemático. *Memorias del 9º Congreso Nacional de Ingeniería Informática / Sistemas de Información (CoNaIISI 2021)*
- Pras, A., J. Schönwälder, M.Burgess, O.Festor, G. Martínez Pérez, R. Stadler, B. Stille. (2007). "Key research challenges in network management, *IEEE Communications Magazine*, 45, vol. 45, no. 10, 104–110.
- Schleipen, M., et al. (2016). OPC UA & industrie 4.0—enabling technology with high diversity and variability. *Procedia CIRP* 57, 315–320 . <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.055>
- Schmidt, N., & Lüder, A. (2018). *The Flow and Reuse of Data*. June, 59–63.
- Siqueira, F. and Davis, J. G. (2022). "Service Computing for Industry 4.0: State of the Art, Challenges, and Research Opportunities," *ACM Comput. Surv.*, vol. 54, no. 9, doi: 10.1145/3478680.
- Tupa, J., Simota, J. Steiner, F. (2017). Aspects of Risk Management Implementation for Industry 4.0, *Procedia Manuf.* 11, 1223–1230, <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.248>.