

Aplicación de tecnologías Semánticas y de Blockchain para la integración horizontal en el ámbito de la Industria 4.0

Semantic and Blockchain technologies application for horizontal integration in the industry 4.0 scope

Presentación: 4 y 5 de octubre de 2022

Doctorando:

Johnny Alvarado Domínguez

Instituto de Desarrollo y Diseño (INGAR), Universidad Tecnológica Nacional (UTN) - Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) - Argentina
jaalvarado@santafe-conicet.gov.ar

Directora:

Marcela Vegetti

Codirector:

Silvio Gonnet

Resumen

Este trabajo presenta los avances del proyecto de tesis “Aplicación de tecnologías semánticas y Blockchain para la integración horizontal en el ámbito de la industria 4.0”, de la carrera de doctorado en Ingeniería mención Industrial de la Universidad Tecnológica Nacional. El objetivo es la definición e implementación de una infraestructura que soporte el modelado semántico de contratos inteligentes para alcanzar la trazabilidad de origen y gestión de la cadena de suministro en el contexto de la industria 4.0. La infraestructura constará de Ontologías de dominio que permita la representación del conocimiento de las empresas que hacen parte de la cadena de suministro, Ontologías que formalicen la semántica de los smart contracts y una red de Ontologías que abarquen las anteriores, una ontología de referencia con los conceptos comunes y una definición de los mapeos comunes para realizar el alineamiento entre los conceptos pertenecientes a las distintas ontologías de la red.

Palabras clave: Industria 4.0, Ontologías, Blockchain, Smart contract.

Abstract

This paper presents the progress of the thesis project "Application of semantic and Blockchain technologies for horizontal integration in the context of Industry 4.0", of the PhD program in Engineering, mention Industrial, Universidad Tecnológica Nacional. The aim is the definition and implementation of an infrastructure that supports the semantic modeling of smart contracts to achieve traceability of provenance and supply chain management in the context of industry 4.0. The infrastructure will consist

of domain ontologies that allow the representation of the knowledge of the companies that are part of the supply chain, ontologies that formalize the semantics of smart contracts and a network of ontologies that cover the previous ones, a reference ontology with the common concepts and a definition of the common mappings to perform the alignment between the concepts belonging to the different ontologies of the network.

Keywords: Industry 4.0, Ontologies, Blockchain, Smart contract.

Introducción

La plataforma industria 4.0 está conformada por un grupo de organizaciones gubernamentales e industrias alemanas, las cuales proponen el modelo de referencia RAMI (Reference Architecture Model Industrie 4.0) y del que se desprende el concepto de Industria 4.0 (Hermann et al., 2016). La Industria 4.0 postula un nuevo nivel de organización y gestión de cadenas de valor a lo largo del ciclo de vida del producto, en función de la disponibilidad de toda la información relevante en tiempo real, mediante la interconexión de todos los participantes involucrados. Compartir información entre las áreas cubiertas por el modelo RAMI es crucial para las aplicaciones de la industria 4.0. Para implementar los conceptos de industria 4.0, es necesario poder compartir información digital dentro de la cadena de valor (Müller et al., 2020), por lo tanto, se debe partir de la automatización y digitalización de los procesos de producción y los activos que en él intervienen. Un concepto importante para la RAMI es el de Asset Administration Shell (AAS), el cual se define como la representación virtual y la funcionalidad técnica de un objeto (Asset) que tiene valor para la empresa (Plattform Industrie 4.0, 2015), como un producto, máquina, software o una planta completa. El AAS permite digitalizar la información relevante de los assets o activos de una empresa, mediante distintos submodelos que proveen información de cada dominio técnico del Asset, los cuales pueden ser especificados por medio de diversos estándares. La integración horizontal que postula el modelo RAMI 4.0, está basada en el estándar IEC 62890 y podría dar soporte a la evaluación de la procedencia de bienes. Establecer el origen de un producto no es una tarea sencilla, dado que los artículos se producen y transportan en cadenas de suministro muy complejas, interorganizacionales, que a menudo se expanden geográficamente.

Tecnologías usadas en el contexto de la industria 4.0 como: realidad aumentada y realidad virtual, robótica, ciber seguridad, tecnologías web semántica e impresión 3D aún usan una red centralizada y una operación de confianza de terceros (Lee et al., 2014). Como resultado, la fabricación actual adolece de problemas relacionados con la flexibilidad, seguridad, privacidad, transparencia, integridad, y confiabilidad de los datos (Li et al., 2018). (Lee et al., 2019) sostienen que la tecnología blockchain podría proveer herramientas que permitan solucionar estos problemas. Una blockchain consiste en bloques, que contienen lotes de transacciones individuales y cada bloque contiene una marca de tiempo y un enlace a un bloque anterior, lo cual garantiza la inmutabilidad de los datos almacenados en ella (Nakamoto, 2008). En particular, los contratos inteligentes (Smart Contracts) son críticos para la adopción generalizada de la tecnología blockchain (Kim & Laskowski, 2018). En términos generales, un contrato inteligente se refiere a los protocolos o programas informáticos que permiten que un contrato se ejecute automáticamente teniendo en cuenta un conjunto de condiciones predefinidas (Reyna et al., 2018). Si bien las aplicaciones blockchain se están implementando ampliamente, muchos problemas aún no se han abordado. En particular, los contratos inteligentes son vulnerables a ataques, debido principalmente a errores en la creación del código, por lo que se requieren investigaciones que aborden la validación formal de la lógica del contrato (Luu et al., 2016). También, se necesitan esfuerzos para proporcionar herramientas para que los usuarios finales puedan especificar contratos inteligentes y no dependan de una tercera persona con experticia en el área. Se espera que la tecnología blockchain aumente la transparencia y la responsabilidad en las redes de la cadena de suministro, permitiendo así cadenas de valor más flexibles.

Para comprender los datos en una base de datos distribuida en numerosas organizaciones, como las resultantes de una implementación con blockchain, debe haber una interpretación común de los datos por parte de cada una de estas organizaciones. La interpretación puede alcanzarse a través de especificaciones formales como las Ontologías. Una ontología definida por (Gruber,

1993) como una “especificación explícita de una conceptualización”, permite la inferencia y verificación automatizada dentro de las aplicaciones de software que se ejecutan en una red que abarca estas organizaciones. Además, un enfoque de modelado basado en ontologías formales puede ayudar en el desarrollo de contratos inteligentes que se ejecutan en la cadena de bloques (Kim & Laskowski, 2018). Basados en esta hipótesis, el objetivo general en el que se enmarca este plan de trabajo es la definición e implementación de una infraestructura que soporte el modelado semántico de contratos inteligentes para alcanzar la trazabilidad de origen y la gestión de las cadenas de suministro en el contexto de la Industria 4.0. Para lograr este objetivo se contempla definir 1) una arquitectura de datos que contemple: Ontologías de dominio que permitan la representación del conocimiento a integrar horizontalmente de las diversas organizaciones que intervienen en una cadena de suministros, una ontología que formalice la semántica de los contratos inteligentes y una red de Ontologías que abarca las ontologías mencionadas en los puntos anteriores, una ontología de referencia con los conceptos comunes y la definición de los mapeos necesarios para realizar el alineamiento entre los conceptos pertenecientes a las distintas ontologías de la red. Y 2) una arquitectura de la tecnología de la información que especifique: los servicios que permitan la incorporación de nuevos modelos semánticos a la red, así como la actualización de las ontologías existentes, los mecanismos para la transformación del conocimiento almacenado en las ontologías en un lenguaje de implementación de los contratos inteligentes y los componentes y los servicios que proveerán las funcionalidades básicas para la generación y administración de los contratos inteligentes.

Desarrollo

Para cumplir con el objetivo principal del plan de tesis se optó por tomar como marco de referencia el modelo RAMI 4.0. Este modelo describe todos los aspectos cruciales de la industria 4.0, descomponiendo las complejas interrelaciones en grupos más pequeños y sencillos. Lo anterior lo logra mediante un sistema tridimensional compuesto de la siguiente manera: 1) un eje que representa el ciclo de vida del producto, 2) un eje que representa los niveles jerárquicos presentes en las fábricas (adicionando las funcionalidades de producto y mundo conectado) y 3) un eje vertical compuesto por 6 capas que describen la representación virtual de un Asset. El modelo RAMI 4.0 sugiere el uso de los lenguajes OPC UA y AutomationML para el dominio de las operaciones de producción y para la fase de ingeniería de los assets respectivamente. A pesar de su amplia adopción, estos lenguajes carecen de una semántica formal que permita una interpretación automática de datos. Además, se requieren otros lenguajes para las otras áreas de las empresas y las relaciones entre ellas (Bader et al., 2020). Con el fin de comenzar a definir las ontologías que formarán parte de la arquitectura de datos propuesta en el plan de tesis, se realizó un T1 - primer trabajo (Domínguez et al., 2022), que consistió de un mapeo sistemático con el fin de determinar el estado del arte de la transformación de los lenguajes OPC UA y AutomationML a los lenguajes de implementación de ontologías OWL y RDF, los cuales son legibles por máquina y proporcionan un marco de representación de conocimiento enriquecido semánticamente que facilita el razonamiento y la inferencia sobre ellos. Primero, se construyó la siguiente cadena de búsqueda: ((RDF OR OWL) AND (“OPC UA” OR AutomationML)) y se realizó la búsqueda sobre las siguientes bases de datos digitales: Scopus, IEEE y ACM. Se revisaron 43 artículos publicados desde el año 2015 hasta el 2021 y 16 fueron seleccionados para una revisión más completa. El estudio tenía como objetivo evidenciar las principales contribuciones de los investigadores en cuanto a la implementación de ontologías basadas en los lenguajes OPC UA y AutomationML, así como los métodos usados por los investigadores para lograrlas y los desafíos a abordar en las futuras investigaciones. De igual forma, se pretendía determinar el rol de las ontologías para la formalización de estos estándares propuestos por la plataforma industria 4.0 y los beneficios que traería su implementación.

Siguiendo con el objetivo de definir la arquitectura de datos, se realizó un (T2) - segundo trabajo (Alvarado-Domínguez et al., 2022), el cual, a la fecha del presente escrito está siendo revisado por pares. El trabajo presenta una revisión sistemática de literatura con el fin de determinar cómo están siendo usadas las ontologías en el ciclo de vida de los smart contracts basados en blockchain. La revisión fue realizada siguiendo la metodología propuesta en (Kitchenham et al., 2015). Primero, se construyó la siguiente cadena de búsqueda: ((ontology OR ontologies) AND ("smart contracts" OR "smart contract" OR "smart-contract") AND blockchain) y se realizó la consulta sobre las siguientes bases de datos digitales: IEEE, Scopus, ACM, Science Direct, Web of Science y Springer Link desde el año 2015 hasta el 2022. Luego, se excluyeron las publicaciones consideradas como reportes

técnicos, libros, editoriales e índices. Para cada publicación seleccionada, se analizó el título, abstract y conclusión. También se excluyeron artículos que trataban sobre smart contracts que no eran basados en blockchain. Como resultado de aplicar las etapas anteriores, 38 artículos fueron seleccionados para realizar la revisión. Posteriormente, se excluyeron los artículos que en primera instancia parecían relevantes, pero que no ayudaban a responder las preguntas de investigación, como resultado, finalmente, 21 artículos fueron seleccionados para realizar la revisión bibliográfica. Tomando en cuenta los desafíos relacionados a las distintas fases del ciclo de vida de los smart contracts, se identificó que las ontologías son usadas en las fases de diseño, despliegue y ejecución de los mismos. Adicional a las etapas del ciclo de vida de los smart contracts, se estableció una categoría adicional que contenía artículos que usaban conjuntamente ontologías y smart contracts para casos de uso específicos.

En el ámbito de la I4.0, el AAS es considerado como la piedra angular de la interoperabilidad (Bader et al., 2020), dado que permite compartir información de los distintos assets de las empresas que conforman la cadena de valor. El AAS está compuesto de varios submodelos, en los cuales se describe la información de diferentes dominios técnicos del asset. Diferentes estándares pueden ser usados para la descripción de cada dominio. La plataforma industria 4.0 definió un metamodelo para definir cuales atributos son obligatorios y cuales opcionales en un AAS. Dado que a la fecha se han creado distintos submodelos para la representación de assets dentro de la industria 4.0, pero ninguno de estos en el dominio de la industria de procesos, se realizó un (T3) - tercer trabajo (Pairol-Fuentes et al., 2022), el cual fue presentado al 51 Jornadas Argentinas de Informática (JAAIO) y al momento de realizar el presente escrito, se encuentra en evaluación. En él, se muestran los resultados parciales de la investigación llevada a cabo para digitalizar la información de assets producidos mediante batch. Dado que existen diferentes tipos de industrias de procesos batch, se propuso un enfoque de 3 niveles. Se toma como nivel 1 el metamodelo del AAS, de tal manera de mantenerlo flexible y que pueda ser adaptado a cualquier tipo de industria de procesos batch. En el nivel 2, el metamodelo es extendido con el modelo de procesos de manufactura batch, mediante el cual se representa la información de las recetas maestras y de control, así como también la receta fórmula, según lo especifica el estándar ISA 88. Por último, el modelo instanciado en el nivel 2 es instanciado para el dominio particular de la producción de detergente en polvo.

Resultados

En T1 se revisaron 16 artículos, publicados así: 1 en el año 2015, 4 en el año 2018, 10 en el año 2019 y una en el año 2020, demostrando que existe un gran interés en la comunidad académica por realizar mapeos entre los lenguajes OPC-UA y AutomationML y los lenguajes RDF y OWL. 14 de los 16 autores principales eran de nacionalidad alemana y 2 de nacionalidad austriaca, lo cual concuerda con el hecho de que la industria 4.0 es una iniciativa alemana. El ámbito de estudio de estas transformaciones es principalmente en Sistemas ciber físicos (CPS), cloud computing, Machine Learning e Industria 4.0. Para realizar los procesos de transformación entre el lenguaje AutomationML y OWL, se han usado técnicas como Model Driven Architecture (MDA), transformaciones bidireccionales y machine Learning. En cuanto al lenguaje OPC UA, las transformaciones a OWL han sido propuestas para brindar una descripción semántica de los “Node Set” para la creación de Digital Twins. El 94% de los estudios analizados, utiliza las ontologías para la representación de conocimiento, lo cual es de esperarse, dado que ese es el objetivo de las ontologías. En general, la transformación de los lenguajes OPC UA y AutomationML en los lenguajes OWL y RDF permite especificar reglas mediante SWRL y realizar consultas mediante SPARQL. Sin embargo, también los estudios han usado estas transformaciones para chequear consistencias, orquestación de procesos, análisis de seguridad, entre otras. A partir del estudio se determinaron algunas limitantes como, por ejemplo, la suposición de mundo abierto, la cual no es muy significativa en el ámbito de la ingeniería, por lo que se deben desarrollar herramientas que permitan realizar inferencias que empleen un razonamiento de mundo parcialmente cerrado, lo cual es más idóneo para las tareas que realizan las máquinas. Adicionalmente, la generación de datos en planta es constante y se produce en milésimas de segundos, lo cual dificulta las consultas mediante SPARQL. Debido a lo dicho anteriormente, ninguno de los estudios analizados ha sido evaluado en escenarios del mundo real, por lo que más investigaciones al respecto deben ser desarrolladas.

Los resultados del T2, evidencian que las ontologías son usadas principalmente en la fase de diseño y creación de los smart contracts (10 de los 21 artículos analizados), brindando una conceptualización compartida a las partes involucradas en el smart

contract. La metodología principal usada por los estudios encontrados en la revisión consiste en crear ontologías que representen el intercambio comercial del smart contract y convertirlas en el lenguaje de programación de los smart contracts mediante algoritmos y reglas de transformación. Para lograrlo, herramientas de modelado como MDA o BPMN han sido usadas. De igual forma, se han realizado investigaciones con el fin de poder crear smart contracts mediante plantillas, para que las personas sin experticia en el área puedan desarrollar smart contracts sin depender de un tercero. Esto se logra mediante la creación de ontologías de dominio específico y el uso de SWRL para la creación de las reglas que rigen el contrato. Sin embargo, dichos trabajos no han sido formalmente validados ni verificados, ni su escalabilidad ha sido demostrada, por lo que es necesario desarrollar herramientas que permitan medir su funcionalidad. Otro aspecto importante es el legal, la legislación comercial o de propiedad intelectual, debe ser expresada en forma de código en los smart contracts. Ontologías como UFO-L pueden ser extendidas, así como herramientas y procedimientos para trasladar las ontologías a smart contracts, deben ser creados. Asimismo, se encontraron trabajos que hacen vinculan ontologías existentes con Smart contracts. Por un lado, los axiomas y conceptos de Ontologías como TOVE han sido transformadas a Smart contracts basados en Blockchain para ejecutar el rastreo de bienes de una compañía. Por otro lado, ontologías como LIoPY, GDPR, DUO, han sido usadas para hacer cumplir las regulaciones concernientes a la privacidad personal. Se deben realizar más investigaciones relacionadas a la vinculación de la Web Semántica y la Blockchain.

Como resultado de T3, se ha obtenido un modelo que incluye los elementos necesarios para la representación digital de dos assets fundamentales de esta industria: el Producto y el Lote. 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. El modelo propuesto puede ser instanciado para diferentes tipos de producción batch. El objetivo final de este trabajo es presentar las bases conceptuales para la implementación de una herramienta para la definición de AAS específicos para la industria de manufactura por batch y posteriormente poder registrar esta información en la Blockchain, garantizando así la inmutabilidad y trazabilidad de los datos y poder ejecutar smart contracts que validen, por ejemplo, la calidad de los productos y cumplimiento de especificaciones del cliente de forma autónoma y transparente. El modelo propuesto sienta las bases conceptuales para la implementación de una herramienta para la definición de AAS específicos para el dominio de la industria de manufactura en lote. De esta manera, la herramienta ofrecería al usuario los elementos con la semántica apropiada y propiedades específicas para facilitar la creación de los AAS. Se propone como trabajo a futuro trabajar en la extensión de dicha herramienta con base en el modelo propuesto.

Conclusiones

Los resultados obtenidos en los trabajos realizados validan la hipótesis de que es posible utilizar ontologías en el modelado de smart contracts para compartir información dentro de la cadena de valor en el ámbito de la industria 4.0. En primera instancia, el mapeo realizado en T1, demuestra que es posible transformar los lenguajes propuestos por la industria 4.0 – AutomationML y OPC-UA a los lenguajes OWL y RDF, lo cual los enriquecería semánticamente y permitiría poder razonar e inferir sobre los datos que se originan en las plantas de producción y en la cadena de abastecimiento. La revisión realizada en T2 demostró la importancia del uso de Ontologías en las distintas fases del ciclo de vida de los smart contracts, sobre todo en el diseño de los mismos. Por otra parte, el T3 puede ampliarse al uso de Ontologías que representen los estándares de cada dominio de los assets y así poder realizar razonamientos o inferencias sobre los datos descritos en los submodelos. Existen algunos aspectos a abordar aún, como el gran volumen de datos generados por las plantas y los problemas de escalabilidad que presentan las blockchain para tratar con ellos, los cuales deberán ser abordados en el transcurso del plan de tesis.

Referencias

- Alvarado-Domínguez, J., Vegetti, M., & Gonnet, S. (2022). The role of ontologies in the Blockchain-based Smart Contracts. *(En Revisión)*.
- Bader, S., Barnstedt, E., Bedenbender, H., Billman, M., Boss, B., & Braunmandl, A. (2020). Details of the Asset Administration Shell Part 1 - The exchange of information between partners in the value chain of Industrie

4.0. Plattform Industrie 4.0, 0, 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. *Smart Innovation, Systems and Technologies*, 285, 17–26. https://doi.org/10.1007/978-981-16-9735-7_2
- Gruber, T. R. (1993). A translation approach to portable ontology specifications. *Knowledge Acquisition*, 5(2), 199–220. <https://doi.org/10.1006/knac.1993.1008>
- Hermann, M., Pentek, T., & Otto, B. (2016). Design principles for industrie 4.0 scenarios. *Proceedings of the Annual Hawaii International Conference on System Sciences, 2016-March*, 3928–3937. <https://doi.org/10.1109/HICSS.2016.488>
- Kim, H. M., & Laskowski, M. (2018). Toward an ontology-driven blockchain design for supply-chain provenance. *Intelligent Systems in Accounting, Finance and Management*, 25(1), 18–27. <https://doi.org/10.1002/isaf.1424>
- Kitchenham, B. A., Budgen, D., & Brereton, P. (2015). Evidence-Based Software Engineering and Systematic Reviews. In *Evidence-Based Software Engineering and Systematic Reviews*. Chapman and Hall/CRC. <https://doi.org/10.1201/b19467>
- Lee, J., Azamfar, M., & Singh, J. (2019). A blockchain enabled Cyber-Physical System architecture for Industry 4.0 manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 20, 34–39. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2019.05.003>
- Lee, J., Kao, H. A., & Yang, S. (2014). Service innovation and smart analytics for Industry 4.0 and big data environment. *Procedia CIRP*, 16(December), 3–8. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.02.001>
- Li, Z., Barenji, A. V., & Huang, G. Q. (2018). Toward a blockchain cloud manufacturing system as a peer to peer distributed network platform. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 54(July), 133–144. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2018.05.011>
- Lu, Y. (2017). Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues. *Journal of Industrial Information Integration*, 6, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2017.04.005>
- Luu, L., Chu, D. H., Olickel, H., Saxena, P., & Hobor, A. (2016). Making smart contracts smarter. *Proceedings of the ACM Conference on Computer and Communications Security, 24-28-Octo*, 254–269. <https://doi.org/10.1145/2976749.2978309>
- Monostori, L., Kádár, B., Bauernhansl, T., Kondoh, S., Kumara, S., Reinhart, G., Sauer, O., Schuh, G., Sihn, W., & Ueda, K. (2016). Cyber-physical systems in manufacturing. *CIRP Annals*, 65(2), 621–641. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.06.005>
- Müller, J. M., Veile, J. W., & Voigt, K. I. (2020). Prerequisites and incentives for digital information sharing in Industry 4.0 – An international comparison across data types. *Computers and Industrial Engineering*, 148. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106733>
- Nakamoto, S. (2008). Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System. *SSRN Electronic Journal*, 23(4), 552–557. <https://direct.mit.edu/artl/article/23/4/552-557/2870>
- Pairal-Fuentes, R., Alvarado-Domínguez, J., Vegetti, M., Roldán, L., & Gonnet, S. (2022). Modelo para la digitalización de activos de la industria batch basado en el estándar ISA 88. *En Revisión*.
- Plattform Industrie 4.0. (2015). Status Report - RAMI4.0. ZVEI – German Electrical and Electronic Manufacturers, 0(July), 28. https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Presse_und_Medien/Publikationen/2016/januar/GMA_Status_Report_Reference_Architecture_Model_Industrie_4.0_RAMI_4.0_/GMA-Status-Report-RAMI-40-July-2015.pdf
- Reyna, A., Martín, C., Chen, J., Soler, E., & Díaz, M. (2018). On blockchain and its integration with IoT. Challenges and opportunities. *Future Generation Computer Systems*, 88(2018), 173–190. <https://doi.org/10.1016/j.future.2018.05.046>
- Xu, X. (2012). From cloud computing to cloud manufacturing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 28(1), 75–86. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2011.07.002>
- Zissis, D., & Lekkas, D. (2012). Addressing cloud computing security issues. *Future Generation Computer Systems*, 28(3), 583–592. <https://doi.org/10.1016/j.future.2010.12.006>