

REPRESENTACIÓN Y RAZONAMIENTO DEL CONTEXTO EN SISTEMAS CIBER-FÍSICOS

García-Mata, Carmen Leticia; Márquez-Gutiérrez, Pedro Rafael; Robledo Vega, Isidro
Tecnológico Nacional de México, campus Chihuahua
Chihuahua, Chih., México
{carmen.gm, pedro.mg, isidro.rv}@chihuahua.tecnm.mx

RESUMEN

Los sistemas de manufactura siempre han tenido un rol muy importante en la industria, pero actualmente el dominio de manufactura está rápidamente cambiando debido a diversos factores, tales como las fuerzas del mercado y los avances en tecnología. La actual revolución industrial, denominada Industria 4.0, busca que los sistemas de producción sean transformados a sistemas de producción ciber-físicos (CPPS, Cyber Physical Production Systems), que permitan la toma de decisiones inteligentes en tiempo real. El modelado y la administración de los CPPS es una tarea retadora debido a la compleja interacción entre las entidades en el sistema. La identificación de situaciones en tiempo real requiere una serie metodologías de modelado y técnicas de implementación para transformar los datos masivos en conocimiento y razonar con éstos. Esta área de estudio se conoce bajo el nombre el contexto del sistema (context-aware). En este artículo se hace un análisis de las últimas tendencias acerca del modelado del contexto en CPPSs.

Palabras Clave: *contexto del sistema, sistemas ciber-físicos, sistemas de producción ciber-físicos, industria 4.0.*

ABSTRACT

Manufacturing systems have always played a very important role in the industry, but the manufacturing domain is currently rapidly changing due to various factors, such as market forces and technological advances. The current industrial revolution, known as Industry 4.0, seeks to transform production systems into cyber-physical production systems (CPPS), which enable intelligent, real-time decision-making. Modeling and managing CPPS is a challenging task due to the complex interactions between entities within the system. Identifying real-time situations requires a series of modeling methodologies and implementation techniques to transform big data into knowledge to reason with it. The study of this area is known as context-awareness. This article analyzes the latest trends in context modeling in CPPSs.

Keywords: *context-aware, cyber-physical systems, cyber-physical production systems, industry 4.0.*

1. INTRODUCCIÓN

La industria 4.0, también conocida como la Cuarta Revolución industrial, implica un cambio de paradigma desde sistemas parcialmente automatizados hacia procesos industriales

completamente automatizados y dispositivos digitalmente conectados. La meta de la Industria 4.0 es crear fábricas inteligentes donde las tecnologías de manufactura puedan ser actualizadas y transformadas a sistemas ciber-físicos [12] y [25].

Para cumplir esas metas, los sistemas de manufactura deben tener una representación del contexto de manufactura que les permita encarar los enormes retos tecnológicos que involucran la transformación de sistemas físicos a sistemas ciber-físicos de los procesos de producción, de forma que estos sean flexibles, inteligentes y reconfigurables a fin de que éstos puedan ajustarse tanto a esta nueva visión, como a los retos de un mercado globalizado, dinámico y muy demandante [1].

Las más recientes investigaciones que relacionan Industria 4.0 y la Representación del Contexto (*Context Aware*) se enfocan en cuatro tendencias: a) fábricas inteligentes (adaptación en tiempo real a los cambios de producción); b) mantenimiento predictivo (uso de datos de sensores e Inteligencia Artificial; c) colaboración entre humanos y robots, y; d) y gemelos digitales (simulación dinámica basada en contexto del mundo real).

La tendencia en los mercados de bajo volumen de producción y alta diversidad también ha incrementado la necesidad de transformar los sistemas tradicionales semi automatizados hacia sistemas de producción ciber-físicos (*CPPS, cyber-physical production systems*). Los CPPS se conforman por entidades autónomas, cooperativas e interconectadas a todos los niveles de producción, adoptando una arquitectura débilmente acopada. Mientras tanto los gemelos digitales (*DT, digital twin*) consisten en la implementación del CPPS conectado a la Internet de las cosas (*IoT*). Tanto los CPPS como los DT requieren de una copia virtual y exacta de todos los componentes del sistema, en los que se incluye la representación del contexto de producción y deben ser constantemente sincronizados con los objetos físicos mediante transferencia de datos en tiempo real. Actualmente muchos países tienen programas de investigación enfocados a Industria 4.0, la que incluye un conjunto de tecnologías aplicadas al sector industrial tales como *Internet de las Cosas (IoT)*, sistemas ciber-físicos (CPS, Cyber-physical Systems), Gemelos Digitales, Inteligencia Artificial, cómputo en la nube y manejo de datos masivos (*big data*), entre otras tecnologías [1].

Para una adecuada implementación de los CPPSs, resulta ineludible la integración de *context-aware* a estos sistemas. Esto

representa al mismo tiempo un reto y una oportunidad para mejorar la eficiencia operacional de la industria y hacer toma de decisiones informada y basada en el estado actual del sistema de producción.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

El contexto juega un rol clave en todos los dominios que requieren actividades de razonamiento e interpretación, ya que sin una adecuada representación del contexto es imposible realizar una generalización inductiva o emitir una opinión fundamentada. Si bien es cierto que los humanos hacemos uso del contexto de manera natural para la toma de decisiones y ejecución de acciones en muy diversas situaciones, la representación y razonamiento de sistemas autónomos es una tarea interdisciplinaria que requiere de especialistas de diferentes áreas.

El estudio de una noción formal de contexto ha sido estudiado durante largo tiempo desde diferentes áreas de inteligencia artificial. McCarthy [14][15], fue un pionero en proponer el uso de lógica no monotónica o del sentido común para resolver problemas de razonamiento en mundos dinámicos. El mismo autor identificó el estudio del contexto como un tema importante de investigación en el área de Inteligencia Artificial, y propuso la formalización del contexto como una etapa crucial hacia la solución del *problema de la generalidad*. Este problema consiste en reconocer que no solo importa que los axiomas para razonamiento de sentido común se expresen mediante teorías lógicas, sino que reconoce que el conocimiento solo es verdadero en cierto contexto. Esto implica que ninguna teoría del sentido común está completa mientras no se incorpore en ésta alguna representación formal del contexto.

La representación del contexto es una tarea difícil por diversas razones, tanto conceptuales como teóricas. La primera dificultad proviene de la carencia de una única definición acerca de qué es el contexto y por ello diversos significados y representaciones conceptuales son continuamente explorados [8]. Desde el punto de vista teórico, la representación del contexto resulta complejo, puesto que el contexto puede ser estático o dinámico, discreto o continuo, de conocimiento o de procesos, diferente si se adopta desde una perspectiva de vista de ciencias cognitivas o desde el punto de vista de ingeniería. Una definición de contexto que gracias a su generalidad ha sido aceptada ampliamente en la literatura es la Propuesta por Dey [5], quien define que el contexto es “cualquier información que pueda ser utilizada para caracterizar la situación de una entidad”.

Dada la dificultad de incorporar *context-aware* en soluciones para la industria, es solo hasta recientemente que se ha empezado a considerar su inclusión en el modelado de procesos ciber-físicos. Una adecuada representación del contexto en ambientes

de manufactura permite que los sistemas sean capaces de reaccionar adecuadamente cuando sea necesario, tomando en cuenta aspectos como la posición actual del dispositivo, la ubicación en el tiempo y otros atributos ambientales que permitan adaptar su comportamiento sin una intervención explícita del usuario. De esta forma es posible incrementar la usabilidad y la efectividad de la aplicación en cuestión.

A pesar de las ventajas que tienen las aplicaciones que incluyen *context-aware*, éstas también encaran retos importantes como tener una clara comprensión del contexto, y una adecuada selección de las metodologías y técnicas más adecuadas para el modelado y razonamiento del contexto. Para que el modelo del contexto sea completo, éste debe ser dinámico y holístico, de forma que se tome en cuenta el contexto de las herramientas, las máquinas, las líneas de producción y el estatus en el flujo de la producción. Para una representación más completa del contexto, es necesario incluir información relativa a la planificación de la producción y los procesos de manufactura.

Desde el punto de vista de ingeniería, las tecnologías de cómputo de *context-aware* consisten en el uso de sensores, tecnologías de información y comunicación, y muy principalmente, un método que permita representar y razonar con el ambiente [20]. Estos autores establecen que una adecuada representación del contexto en ambientes de manufactura debe incluir el contexto del tiempo, el contexto de localización, el contexto del ambiente, el contexto del dispositivo, y el contexto del usuario, entre otros aspectos. De esta forma se puede representar de forma más completa y precisa el ambiente y adaptar el comportamiento del sistema acorde a los aspectos dinámicos y estocásticos del ambiente donde opera el sistema que está siendo modelado.

Aunque la formalización del contexto como tema de investigación se inició desde los años 80s del siglo pasado, es hasta recientemente que la investigación de *context-aware* se ha convertido en un área activa de investigaciones con aplicabilidad en la solución de problemas del mundo real, especialmente en la conversión de sistemas industriales parcialmente automatizados hacia el objetivo de sistemas de producción totalmente automatizados o CPPS.

La conexión de los CPPS con la IoT facilita el control del sistema de producción y la toma de decisiones a distancia. Sin embargo, la cantidad de información que se genera en estos sistemas es enorme y difícil de manejar directamente, por lo que es imperativo transformar la información en conocimiento. La generación de conocimiento del contexto se puede realizar utilizando un método formal para el modelado de las entidades físicas de la fábrica, adquiriendo información acerca de los datos de entrada y salida de los dispositivos en tiempo real. El modelado de estas entidades mediante tecnologías que modele los dispositivos físico, su operación y su relación, transforma los datos a estados o situaciones del sistema. De esta forma, los

datos son convertidos a conocimiento y la toma de decisiones puede ser manejada con base al contexto actual del sistema, en lugar de lidiar con una inmensa cantidad de datos aislados y fuera de contexto.

Básicamente, el contexto puede ser modelado como un álgebra sobre un conjunto de conceptos (por ejemplo, una estructura como la de ontologías) y un conjunto de restricciones (operaciones). Algunos de los requerimientos para el modelado y razonamiento del contexto que han sido identificados son: a) representación de diversa información del contexto y sus relaciones; b) representación de situaciones como abstracciones de hechos; c) representación del historial del contexto, y; d) representación y manejo de incerteza del contexto.

2.1 Métodos de Modelado para CPS y CPPS

Uno de los principales retos que implica el diseño de un CPS provienen de la complejidad que impone el diseño en el análisis y flujo de objetos y operaciones que conforman los sistemas CPS y CPPS. Actualmente no existe un marco único que permita el modelado de los CPS y/o CPPS. Las herramientas de modelado deben contar con capacidades para modelar operaciones, eventos y sincronía entre las entidades del CPPS. Además, la herramienta de modelado deberá de permitir capturar las interacciones tales como sincronización de recursos y operaciones, así como eventos síncronos y concurrentes.

Diferentes métodos de modelado han sido propuestos para el modelado de CPPS. Hsieh [10] propone un enfoque basado en Sistemas Multi-Agente (MAS, Multi-Agent System) para el modelado Dinámico de Context-Aware en un CPS en un ambiente de manufactura que habilita interacción con IoT. Los modelos del CPS son obtenidos a través de Redes de Petri Discretas Temporizadas (DTPN, Discret timed Petri Nets), MAS y un algoritmo que genera la información contextual del CPS. Cada entidad del sistema es modelada como un agente. Los resultados obtenidos por dicho autor fueron satisfactorios puesto que la clase de complejidad del algoritmo propuesto es del tipo polinomial.

Posteriormente, Hsieh [11] propone un método alternativo para el modelado del *context-aware* de un CPS basado también en DTPN y el algoritmo *JSTN* (*Joint Spatial-Temporal Network*) de complejidad polinomial. En su investigación estos autores estudiaron dos problemas que son ubicuos en todos los sistemas CPS y CPPS. Estos problemas son la Conciencia de Fecha Límite (*DAP*, *Deadline Awareness Problem*) y la Conciencia de Estados Futuros (*FSTAP*, *Future States Awareness Problem*). En el *DAP* se tiene como meta determinar si la fecha límite puede ser cumplida en el futuro, y en *FSTAP* la meta es determinar si se pueden evitar estados indeseables durante la evolución del CPPS. Los autores desarrollaron una teoría y algoritmos relevantes para direccionar los problemas propuestos, probando

que las Redes de Petri temporizadas y el algoritmo *JSTN* resultan adecuadas para el modelado de CPPS.

Por contraste, en la literatura revisada, el método más utilizado para la representación del conocimiento es el de las ontologías. Sin embargo, la creación de una ontología extensiva es un proceso largo y requiere de especialistas. Para simplificar este proceso, se ha buscado una forma de estandarizar el diseño de ontologías para CPS, favoreciendo el re-uso y extensión de ontologías desarrolladas previamente, además de facilitar la interoperabilidad dentro y entre diferentes CPSs. Recientemente, el Instituto Nacional de Estándares de Estados Unidos (NIST, US National Institute of Standards and Technology) liberó un marco CPS que ofrece una vista integrada de estos sistemas, el cual incluye diversos aspectos, entre ellos la confiabilidad [9]. Este marco CPS propone medios para representar tres facetas del ciclo de vida del CPS que comprenden las etapas de conceptualización, realización y garantía mediante una abstracción denominada Aspectos. Otro aspecto considerado es el de confiabilidad el que describe un conjunto de aspectos que inhiben fallas en los temas de privacidad, seguridad, resiliencia y fiabilidad. A pesar de que este marco CPS permite articular de manera estándar los requerimientos necesarios para construir, componer y asegurar un CPS, no ofrece un método para el razonamiento acerca de los objetos, el contexto y cómo dependen éstos

2.2 Ontologías

Una ontología es un método formal que permite representar conceptos del mundo real y facilita la creación de una descripción comprensiva semánticamente interpretable. Las entidades, propiedades y relaciones de un cierto dominio son especificadas en categorías. Hay muchas aplicaciones en las cuales las bases de conocimiento están basadas en Ontologías. Existen varias alternativas de lenguajes de ontologías tales como KIF, OWL (Web Ontology Web Language), RDF+RDF(S) y DAML+OIL, siendo el más popular OWL.

Tradicionalmente, la construcción de una ontología para un dominio específico es realizado de forma manual por ingenieros del conocimiento y especialistas en ontologías. Este enfoque tiene la desventaja de que requiere una comprensión completa y detallada del dominio en cuestión. El diseño de una ontología no solo comprende el diseño de clases y relaciones de objetos, sino también la incorporación de restricciones del dominio específico. Estas restricciones permiten hacer inferencias lógicas basadas en razonamiento deductivo o razonamiento del sentido común. Las ontologías pueden ser clasificadas en distintas categorías dependiendo del nivel de detalle, por ejemplo: a) ontologías de alto nivel como la Ontología Formal Básica (BFO, Basic Formal Ontology). BFO define clases generales de entidades físicas tales como objetos o la ejecución de Procesos; b) ontologías de referencias, se usan para

representar un dominio común, como por ejemplo la Ontología de Referencia de la Cadena de Proveedores; c) ontologías de dominio, las que definen propiedades generales de entidades del dominio de manufactura, y d) ontologías de aplicación, éstas representan una tarea particular dentro del dominio en consideración, por ejemplo el proceso de soldadura en tarjetas de circuitos. Para una revisión más completa sobre la clasificación de ontologías para manufactura, se recomienda revisar el artículo publicado por [21].

Dada la dificultad, especialización y el consumo de tiempo que requiere el diseño de una ontología, desde los 2000s tomó impulso el diseño de Aprendizaje de Ontologías (OL, *Ontology Learning*), el que consiste en la generación automatizada o refinamiento de ontologías de diversas fuentes. Estos métodos buscan simplificar el desarrollo de ontologías. Para una revisión del estado del arte sobre OL se recomienda la investigación publicada por Armary y otros [2].

Uno de los principales retos en el diseño de CPS es el soporte para ciberseguridad de la información. Sin embargo, el problema más crítico consiste en que la mayoría de estos sistemas no toma en cuenta los aspectos de seguridad ni los riesgos que implican la automatización de proceso [13]. La alta variabilidad de los componentes de un CPS, así como la complejidad derivada de sus interacciones hacen que resulte extremadamente difícil verificar la corrección y seguridad de los CPSs. Con el objetivo de atacar este problema Varela y otros [23], proponen el marco CARMEN que habilita la descripción de los requerimientos de seguridad y su análisis. El marco CARMEN está basado en el enfoque de Ingeniería Manejada por Modelo e Ingeniería de Línea de Productos de Software. Sin embargo, el marco CARMEN no incluye consideraciones de cómo manejar los casos en que los modelos están interrelacionados pero no conectados. Para resolver estas limitaciones, Blanco y otros [4] proponen un enfoque semántico llamado Onto-CARMEN, la cual consiste en el diseño e implementación de una ontología para el marco CARMEN y además incluye un método para razonamiento basado en el lenguaje SPARQL. Esta solución está enfocada exclusivamente en los temas de verificación y diagnóstico de seguridad.

Aunque los sistemas CPS y CPPS han sido estudiados principalmente a lo largo de las dos últimas décadas, todavía existen pocos estándares especializados en este tipo de sistemas. Algunos estándares relevantes para esta tarea, en su mayoría están enfocados a IoT. Entre los más recientes están los desarrollados por European Telecommunications Standards Institute (ETSI) con su guía llamada “ETSI EN 303 645, Ciberseguridad para Consumidores de Internet de las Cosas: Requerimientos Base”. Por su parte Microsoft ha desarrollado su propia guía para IoT llamada “Cybersecurity Policy of the Internet of Things”.

Por lo que se refiere a un estándar enfocado directamente a sistemas CPS, existe el estándar desarrollado por NIST, el cual propone medios para analizar tres facetas (*Facets*) del ciclo de vida del CPS, tales como conceptualización, realización y garantía del CPS, al que llaman Aspectos [9]. Los Aspectos es una estructura de alto nivel conformada por una serie de *concerns*). Estos autores definen *concerns* como el conjunto de conceptos o prácticas acerca de la descomposición funcional de los sistemas, muchas veces éstas son estándares basadas en consenso. En esta investigación los autores se enfocan en la representación de una de estas *concerns*, denominado Confiabilidad (*Trustworthiness*), la que formaliza conceptos relacionados con fallas en Privacidad, Resiliencia, Viabilidad, Seguridad contra amenazas intencionales (*Security*), y Seguridad contra el riesgo de accidentes, riesgos y peligros no intencionales (*Safety*). Aunque el marco CPS es extensible y soporta modelos ejecutables como UML, no ofrece un método de modelado para razonar sobre las entidades de CPS y su evolución dinámica. Los autores Balduccini y otros [3], adoptan como guía el CPS de NIST para el diseño de una Ontología Conceptual para el Aspecto de Confiabilidad, basada en la guía CPS del estándar NIST. Para ello, estos autores adoptan una vista amplia acerca de las ontologías, definiendo este término como una colección de sentencias en un lenguaje lógico que representa un dominio en términos de clases y relaciones de objetos desde el punto de vista de conjuntos y de instancias individuales de éstos. La ontología también establece las relaciones entre objetos y/o clases. La representación de esta ontología es realizada mediante un lenguaje basado en lógica monotónica llamado Answer Set Programming y el lenguaje de acción $\mathcal{A}$.

2.3 Razonamiento en Context-aware

El uso de enfoques declarativos para llevar a cabo Razonamiento acerca de Acción y Cambio (*Reasoning about Action and Change*, RAC), requiere de una formalización sobre RAC. Ésta es una tarea compleja puesto que estos sistemas deben ser capaces de razonar con propiedades acerca del cambio. Son tres los principales problemas que deben ser resueltos en RAC para realizar un razonamiento adecuado: a) El Problema del Marco, (*Frame Problem*), que estudia no solo cómo representar los cambios en un dominio dinámico, sino también los aspectos del mundo que permanecen sin cambio; b) El problema de Ramificación (*Ramification Problem*), que estudia cómo representar los efectos directos e indirectos de la ejecución de las acciones, y c) El problema de Calificación (*Qualification problem*), que estudia qué pre-requisitos son indispensables para la ejecución de las acciones, sin que sea necesario revisar exhaustivamente todas las posibles precondiciones. Esto significa que debe ser posible hacer predicciones válidas acerca del futuro.

Existen diversos formalismos para resolver RAC, entre los más relevantes se pueden nombrar a: a) STRIPS; b) Cálculo

de Situaciones; c) Cálculo de Fluentes; d) Cálculo de Eventos, y e) Lenguajes de Acción [7], [19]. Todos estos métodos permiten representar los problemas del marco, el de ramificación y el de calificación. A excepción de los Lenguajes de Acción, todos los demás formalismos señalados están basados en lógica de primer orden. En cambio, los Lenguajes de Acción permiten formalizar el razonamiento causal, que es no monotónico. Algunos de los lenguajes de acción son: $\mathcal{A}$, $\mathcal{B}$, $\mathcal{A}^*$, $\mathcal{C}$, $\mathcal{C}^{++}$ y $\mathcal{K}$, entre otros. Para una revisión del estado del arte sobre mecanismos de razonamiento en CPS se recomienda la investigación de Tejit y otros [22]

En una investigación relacionada Nguyen y otros [17], presentan una definición formal de un CPS basado en NIST, pero únicamente se enfocan en el modelado que de una parte de todo un sistema CPS, específicamente estudian si la *concern* Confiabilidad puede o no puede ser satisfecha, si existe un conflicto potencial entre las restricciones, y cómo generar el mejor plan base. Para la representación de las entidades, sus datos y relaciones, así como facilitar el intercambio de información, y razonar acerca del conocimiento que describe el CPS, en esta investigación se presenta un sistema de razonamiento híbrido llamado OA4CPS. Este sistema combina cuatro motores de razonamiento: a) el razonador SPARQL para comunicarse con el razonador de la ontología; b) El sistema híbrido Clingo-Python permite una interacción entre estos dos paradigmas, siendo Python el encargado del control que habilita la comunicación entre el CPS y el solver de ASP. La interfaz para el manejo del flujo de datos entre el CPS y el context-aware es desarrollada también en Python y el razonamiento acerca del contexto actual del CPS es realizada por Clingo; c) El solver DLVHex2 que permite ser ejecutado en tiempo real, y d) El solver HEXlite, el cual es un solver más pequeño con un enfoque similar a DLV. Posteriormente, Nguyen y otros [18], extienden y aplican a un ejemplo particular a las investigaciones anteriores de Balduccini y otros [3], así como las de Nguyen y otros [17] respecto del modelado e implementación de un CPS bajo el estándar NIST. Estos últimos autores implementan el sistema de mantenimiento (LKAS, lane keeping/assist system) respecto de un auto que usa una cámara (CAM) y un módulo de conocimiento situacional (SAM, Situational Awareness Module). Las relaciones entre el dominio LKAS y la ontología CPS es mostrada mediante un grafo para la *concern* de Integridad, codificando la teoría del marco CPS mediante ASP.

Por otro lado, uno de los lenguajes que se encuentra bien situado para el razonamiento del conocimiento es Answer Set Programming (ASP), el cual es un lenguaje declarativo y está basado en la Semántica del Modelo Estable (SMS, *Stable Model Semantics*) [6]. SMS tiene raíces en principios de la lógica epistémica, lógica default y lógica de circunscripción. ASP es un lenguaje basado en reglas y fue diseñado para tareas de

razonamiento del sentido común y problemas combinatorios difíciles. En ASP, un programa lógico Π es un conjunto de reglas de la forma

$$c \leftarrow a_1, \dots, a_m, \text{not } b_1, \dots, \text{not } b_n$$

donde las a_i s y las b_i s son átomos y mediante el *not* se representa la negación default. En una regla r , r^+ y r^- se refieren a los átomos $\{a_1, \dots, a_m\}$ y $\{b_1, \dots, \text{not } b_n\}$, respectivamente. Intuitivamente, la regla r^+ se interpreta como la creencia de que los átomos de ésta son verdaderos y no se cree que sean verdadero ninguno de los átomos de r^- . Esta representación del conocimiento contrafactual de ASP permite una forma precisa de representar conocimiento incompleto y capacidad para ajustar conclusiones previas cuando se agrega a la base de conocimiento hechos contradictorios. Esta última característica resulta vital para el diseño e implementación de los CPSs y CPPSs dado que los ambientes de estos sistemas son altamente dinámicos, estocásticos y no siempre se tiene conocimiento completo del CPPS.

3. CONCLUSIONES

La complejidad de los sistemas CPPS representan muchos retos para la representación y razonamiento del contexto debido a que requieren ser modelado muchas entidades físicas y las relaciones entre sí. Adicionalmente, al ser el CPPS un sistema dinámico y estocástico, se requiere de métodos y técnicas de modelado que permitan capturar estas características y así tener una representación completa acerca del estado actual del CPPS. Aunque el avance en la investigación sobre CPPS y CPS es una área de investigación muy activa, pocas investigaciones reportan la inclusión de *context-aware* en el desarrollo de teorías y aplicaciones sobre estos sistemas.

Es importante mencionar que, a pesar de la funcionalidad de las Redes de Petri para el modelado de sistemas dinámicos, éstas carecen de dos importantes cualidades para el modelado completo del *context-aware* de un CPPS, siendo éstas: a) la capacidad para lidiar con una situación que no haya sido previamente definida, y b) la capacidad para identificar futuras situaciones. Esta última capacidad es deseable porque se puede determinar si el CPPS está alineado con las metas del sistema de producción y además permite ajustar la toma de decisiones por adelantado.

La debilidad de las Redes de Petri antes analizada no es irrelevante puesto que el modelado del *context-aware* ayuda a decidir en diferentes niveles de la representación cuál es la decisión que debe ser tomada como reacción a cierto evento estocástico, como por ejemplo si la naturaleza del evento hace indispensable que parte o toda una línea de producción deba ser parada para evitar el desperdicio de productos y que sea posible atender de forma inmediata el evento fortuito.

Tomando como base la bibliografía revisada, se identifica que el método de ontologías para la representación del conocimiento y el razonamiento mediante lógicas no monotónicas es un enfoque prometedor y por tanto debe ser estudiado a más profundidad. No menos importante resulta la aplicación de estándares en la implementación de CPPS, puesto que esto permite la compatibilidad e interoperabilidad de estos sistemas.

Se propone como trabajo futuro el modelado de una línea de producción para un CPPS del mundo real, teniendo como marco de referencia el estándar NIST y las probables extensiones de éste estándar. Para la representación y razonamiento del conocimiento se propone modelar e implementar el CPPS mediante la integración de ontologías y ASP.

4. REFERENCIAS

- [1] Arena, D.N., Towards semantics-driven modelling and simulation of context-aware manufacturing systems. Dissertation, EPFL – École polytechnique fédérale de Lausanne, School of Engineering. 2, 2019.
- [2] Armary, P.; El-Vaigh, C. B.; Narsis, O.L.; Nicolle, C., Ontology learning towards expressiveness: A survey. *Computer Science Review* 57.100693, 2025.
- [3] Balduccini, M., Griffor, E., Huth, M., Vishik, C., Burns M. and Wollman, D., Ontology-based reasoning about the trustworthiness of cyber-physical systems, *Living in the Internet of Things: Cybersecurity of the IoT - 2018*, London, pp. 1-10, 2013, doi: 10.1049/cp.2018.0012.
- [4] Blanco, C.; Rosado, D.; Varela-Vaca, A.J.; Gómez-López, M.T.; Fernández-Medina, E., Onto CARMEN: Ontology-driven Approach for Cyber-Physical System Security Requirements Meta-modelling and Reasoning. *Internet of Things*, Vol. 24, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.iot.2023.100989>.
- [5] Dey, A. K., Understanding and using context. *Personal and ubiquitous computing*, 5(1), 4-7, 2001.
- [6] Gelfond, M, and Lifschitz, V., The Stable Model Semantics for Logic Programming., In: *Proceedings of ICLP/SLP-88*, pp. 1070–1080, 1988.
- [7] Gelfond, M. and Lifschitz, V.: Representing Actions and Change by Logic Programs, *Journal of Logic Programming*, 17(2,3,4), 301-323,1993.
- [8] Giunchiglia, F., Maltese, V., Dutta, B., Domains and context: First steps towards managing diversity in knowledge. *J. Web Semantics*. 12-13, 53-63, 2012.
- [9] Griffor, E.; Greer, C.; Wollman, D., and Burns, M., *Framework for Cyber-Physical Systems: Volume 1, Overview*. Technical Report NISTSP-1500-201, National Institute of Standards and Technology, 2017.
- [10] Hsieh, F.S., A Dynamic Context-Aware Workflow Management Scheme for Cyber-Physical Systems Based on MAS Architecture. *Applied Sciences*. Vol. 11. Issue 6. 2030, 2021. Doi: 10.3390/app11052030.
- [11] Hsieh, F.S., A Theoretical Foundation for Context-Aware Cyber-Physical Production Systems. *Applied Sciences*. Vol. 12. Issue 10, 5129, 2022. <https://doi.org/10.3390/app12105129>.
- [12] Ivanov, U.; Tang, C.; Dolgui, A.; Battini, D.; Das A., Researchers' perspectives on Industry 4.0: multi-disciplinary analysis and opportunities for operations management. *International Journal of Production Research*, Taylor & Francis, 2020, pp.1-24, 2020, 10.1080/00207543.2020.1798035. hal-02923787.
- [13] Lezzi, M., Lazoi, M., Corallo, A., Cybersecurity for industry 4.0 in the current literature: a reference framework. *Comput. Ind.* 103, 97–110, 2018, <http://dx.doi.org/10.1016/j.compind.2018.09.004>.
- [14] McCarthy, J., Artificial intelligence, logic and formalizing common sense. In R. H. Thomason, editor, *Philosophical Logic and Artificial Intelligence*, pages 161-190. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 1989.
- [15] McCarthy, J., Notes on formalizing context. In *Proceedings of the Thirteenth International Joint Conference in Artificial Intelligence*, pages 555-560, Chambery, France, 1993.
- [16] McCarthy, J. and Buva, S., Formalizing context (expanded notes). Technical Note STAN-CS-TN-94-13, Computer Science Department, Stanford University, Stanford, CA, 1994.
- [17] Nguyen, T.H.; Son, T.C.; Bundas, M.; Balduccini, M.; Campbell, K., Griffor, E., Reasoning About Trustworthiness in Cyber-Physical Systems Using Ontology-Based Representation and ASP. In Takahiro Uchiya, Quan Bai, Iván Marsá-Maestre, editors *PRIMA 2020: Principles and Practice of Multi-Agent Systems – 23rd International Conference*, Nagoya, Japan, November 18-20, 2020, *Proceedings. Volume 12568 of Lecture Notes in Computer Science*, pages 51-67, Springer, 2020.

- [18] Nguyen, T.; Bundas, M.; Son, T.; Balduccini, M.; Garwood, K.C.; Griffor, E., Specifying and Reasoning about CPS through the Lens of the NIST CPS Framework. Theory and Practice of Logic Programming, 2022. <https://doi.org/10.1017/S1471068422000035>.
- [19] Patkos, T., A Formal Theory for Reasoning about Action, Knowledge and Time. PhD Dissertation, Department of Computer Science, University of Crete, Greece, 2010.
- [20] Sahlab, N.; Jazdi, N.; Weyrich, M., An Approach for Context-Aware Cyber-Physical Automation Systems. IFAC-PapersOnLine. 54, 171–176, 2021.
- [21] Sapel, P.; Molinas-Comet, L.; Dimitriadis, I.; Hopmann, C.; Decker, S., A review and classification of manufacturing ontologies, Journal of Intelligent Manufacturing, ISSN 1572-8145, Springer US, New York, Vol. 36, Iss. 6, pp. 3669-3693, , 2024, <https://doi.org/10.1007/s10845-024-02425-z>.
- [22] Tejit, S., Horváth, I., Rusák, Z., The state of framework development for implementing reasoning mechanisms in smart cyber-physical systems: A Literature Review. Journal of Computational Design and Engineering 6 (2019) 527–541, 2019.
- [23] Varela-Vaca, A.J; Rosado, D.G.; Sánchez, L.E.; Gómez-López, M.T.; R.M. Gasca, R.M., Fernández-Medina, E., CARMEN: A framework for the verification and diagnosis of the specification of security requirements in cyber-physical systems, Comput. Ind. 132, 103524, 2021, <http://dx.doi.org/10.1016/j.compind.2021.103524>.
- [24] Xu, X., Lu, Y., Vogel-Heuser, B., Wang, L., Industry 4.0 and Industry 5.0 –Inception, conception and perception. Journal of Manufacturing Systems. Vol. 61, pp. 530-535, 2021.