

Estado del arte sobre la aplicación de la industria 4.0 en los sistemas de planificación y control de operaciones

State of the art on the application of industry 4.0 in planning and control operations systems

Cristian Fernando Pilla Tituaña*
Diana Carolina Quinteros Chávez*

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es la propuesta de un marco conceptual que permita caracterizar la aplicación de la Industria 4.0 en los Sistemas de Planificación y Control de Operaciones (SPyCO), tomando como referencia la revisión de la literatura y los marcos conceptuales de los artículos analizados junto con un análisis crítico de los mismos. Este estudio muestra las tecnologías y funcionalidades que presenta la Industria 4.0 en las actividades del SPyCO, los aspectos estratégicos de la gestión de operaciones, el sector y campo de aplicación, además, las futuras líneas de investigación según los vacíos encontrados en la revisión literaria. Como conclusiones se destaca que en los sistemas de fabricación tradicionales la planificación de operaciones se realiza para un sistema de producción y un diseño de procesos predefinidos, sin embargo, en un contexto de Industria 4.0 la planificación de operaciones se vuelve dinámica, es decir debe adaptarse a acontecimientos inesperados que varían con el tiempo, permitiendo predecir los problemas de producción para la toma decisiones en tiempo real.

Palabras clave: Planificación, control, operaciones, Industria 4.0, revisión, aplicación

* Máster Universitario En Ingeniería Avanzada De Producción, Logística Y Cadena De Suministro, Máster En Gestión de Proyectos, Ingeniero ADE, Ingeniero Mecánico Especialista de Campo Senior, Schlumberger del Ecuador S.A, Quito, Ecuador, cripilti@alumini.upv.es, ORCID: 0000-0001-5202-9268

* Máster Universitario En Dirección De Operaciones y Calidad, Ingeniera en Gestión de Procesos, Tecnóloga en Petróleos, Tecnóloga en Administración de Sistemas de Calidad, Instituto Tecnológico Edwards Deming, Quito, Ecuador, d.quinteros@deming.edu.ec, ORCID: 0000-0003-3593-9766

REVISTA TECNOLÓGICA
ciencia y educación
Edwards Deming

ISSN: 2600-5867

Atribución/Reconocimiento-NoComercial- CompartirIgual 4.0 Licencia Pública Internacional — CC

BY-NC-SA 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/legalcode.es>

Editado por: Tecnológico Superior Corporativo Edwards Deming
Enero - Marzo Vol. 6 - I - 2022
<https://revista-edwardsdeming.com/index.php/es>
e-ISSN: 2576-0971
Recibido: 14 octubre 2021
Aprobado: 12 diciembre, 2021
Pag 92 - 116

ABSTRACT

The objective of this work is the proposal of a conceptual framework that allows characterizing the application of Industry 4.0 in the Planning and Control Operations Systems (PCOS), based on the literature review and the conceptual frameworks of the analyzed articles with a critical analysis of them. This study presents the technologies and functionalities of the Industry 4.0 in the PCOS activities, the strategic aspects of operations management, the sector and field of application, in addition, the future lines of research according to the gaps found in the literature review. As conclusions it is highlighted that in traditional manufacturing systems operations planning is performed for a predefined production system and process design, however, in a context of Industry 4.0 operations planning becomes dynamic, that is to say, it must adapt to unexpected events that vary over time, allowing to predict production problems for decision making in real time.

Key words: Planning, control, operations, Industry 4.0, review, application

INTRODUCCIÓN

El desarrollo tecnológico a lo largo de la historia ha innovado los sistemas de manufactura, desde la primera revolución industrial hasta la actualidad, en donde la evolución de la tecnología ha permitido una transformación digital, originando la cuarta revolución industrial. Las nuevas tecnologías aplicadas a la fabricación, así como también la nueva forma de producción, organización y realidad industrial de los procesos productivos, han modificado el diseño y gestión del funcionamiento de los sistemas de producción. Los principios de la Industria 4.0 (I4.0) dan lugar a nuevos requisitos para la planificación y control de operaciones.

El estado del arte muestra que hoy en día, la idea visionaria de la Industria 4.0 u otros sinónimos como Manufactura Inteligente o Producción Inteligente, permiten describir la tendencia a la digitalización, la automatización y el creciente uso de las tecnologías de la información en el entorno de la manufactura, en donde la creciente incorporación de sensores en varios tipos de dispositivos y maquinaria permiten la adquisición de datos en tiempo real, estos al mismo tiempo generan un enorme volumen de datos, que pueden ser almacenados, procesados y analizados en los servidores en la nube, por algoritmos inteligentes predefinidos por reglas basadas en la inteligencia artificial, este conjunto de avances tecnológicos

se está utilizando en los sistemas de producción que permiten diseñar, planificar, ejecutar, controlar y monitorear los procesos productivos

Esta investigación tiene como objetivo proponer un marco conceptual que integre las actividades del Sistema de Planificación y Control de Operaciones (SPyCO) en un contexto de Industria 4.0, para ello, se realiza un análisis estructurado de artículos científicos relacionados con el tema de estudio que permita desarrollar la propuesta de marco conceptual para su caracterización. Con este fin se establecieron los siguientes objetivos específicos que permiten alcanzar el objeto de estudio:

- Realizar una búsqueda en base de datos relevantes de artículos destacados que realicen una revisión literaria o propongan marcos conceptuales sobre los SPyCO en un contexto de Industria 4.0.
- Proponer un marco conceptual para caracterizar la aplicación de la Industria 4.0 en los SPyCO.
- Realizar una revisión bibliográfica para validar el marco conceptual propuesto
- Analizar las características de cada dimensión del marco conceptual para extraer conclusiones y futuras líneas de investigación.

MATERIALES Y MÉTODOS

El método de investigación utilizado para este trabajo es de tipo cualitativo-documental, el cual inicia con la recolección de información de bases de datos relevantes como: Scopus, Science Direct, y WoS, luego se realiza un análisis descriptivo de los documentos encontrados que permite evaluar los aspectos formales de los documentos seleccionados, obteniendo al final un total de 53 artículos para la revisión bibliográfica, después se realiza la propuesta del marco conceptual el cual agrupa las categorías en dimensiones para un mejor tratamiento de la información que facilite el estudio del tema a investigar, por último se realiza la evaluación del material de acuerdo con las dimensiones planteadas en el marco conceptual propuesto que permiten obtener un resultado significativo que contribuya a este trabajo de investigación. La revisión de la literatura para analizar el contenido se realiza utilizando el proceso propuesto por Seuring y Müller (2008) que contiene cuatro fases que se describen a continuación:

Recolección del material: Una vez definido y delimitado el tema de investigación se procede a recolectar la información reconocida y valorada académicamente, utilizando los motores de búsqueda de las bases de datos relevantes como: Scopus, Science Direct, y Web of Science, para ello se utiliza criterios de contextualización, a través de palabras claves que nos permitan abordar en su conjunto el tema de investigación. Esta información se muestra en la Tabla I.

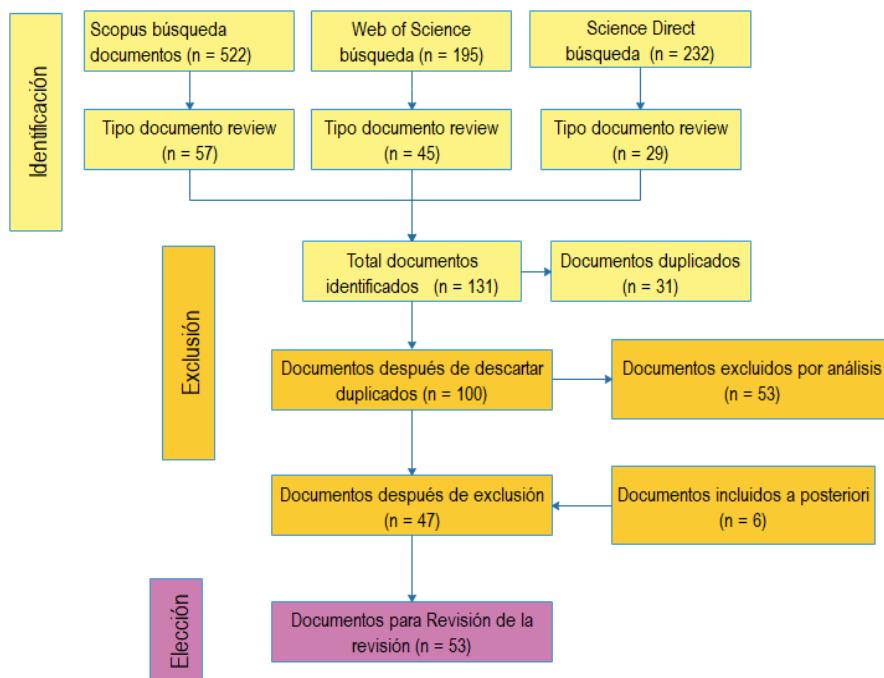
Tabla . Descripción de los resultados de búsqueda

Tema de análisis	Artículos relevantes cuyo principal contenido se refiere a los Sistemas de Planificación y Control de Operaciones en un contexto de Industria 4.0
Tipo de análisis	Cualitativo
Periodo de estudio	2011- Marzo 2020
Ecuación de búsqueda (palabras claves)	(TITLE ("planning" OR "operations" OR "production" OR "scheduling" OR "control") AND TITLE ("industry 4.0" OR "Smart" OR "additive manufacturing" OR "IoT" OR "Internet of Things" OR "Artificial Intelligence" OR "AI" OR "blockchain" OR "Cloud Computing" OR "4.0" OR "fourth industrial") AND TITLE ("state of the art" OR "review" OR "revision" OR "survey" OR "Conceptual framework" OR "framework" OR "conceptual model" OR "Literature review"))
BBDD de búsqueda	Scopus
Número de artículos (Revisados)	522
BBDD de búsqueda	Web of Science
Número de artículos (Revisados)	195
BBDD de búsqueda	Science Direct
Número de artículos (Revisados)	232

Análisis descriptivo: En esta fase se realiza un tratamiento racional y filtración de los documentos encontrados de las bases de datos mencionadas, considerando diferentes aspectos formales del material encontrado. En este apartado se descartan algunas referencias y se incluyen otras que aportan y complementan con

información relevante al tema de estudio. Un total de 53 artículos fueron seleccionados para la revisión bibliográfica, como se muestra en la Figura 1.

Figura 1. Proceso de selección de artículos a revisar

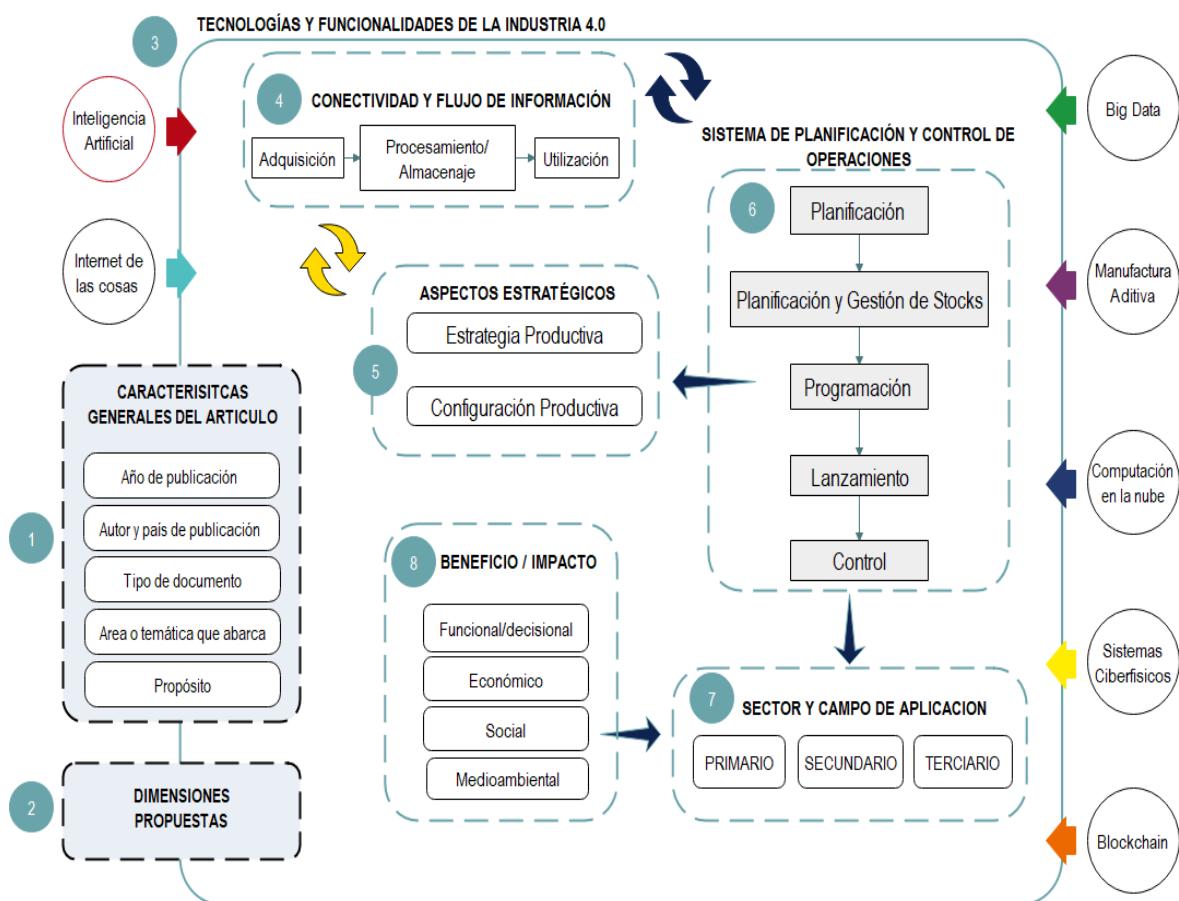


Selección de categorías : En esta fase se realiza una categorización de la información que facilite el estudio del tema a investigar, para ello se seleccionan dimensiones estructurales que permitan jerarquizar y generar clases para el tratamiento de la información, de tal manera que se aplique a cada artículo de investigación encontrado.

Para jerarquizar y generar clases que permitan el tratamiento de la información se agrupa las categorías en dimensiones. El modelo conceptual que se propone está basado en los marcos conceptuales de los artículos analizados, que integra y resume los elementos comunes encontrados en diferentes dimensiones. Este modelo puede ser utilizado para identificar las características comunes con otras investigaciones realizadas, y para mostrar en su conjunto cómo las tecnologías de la Industria 4.0 han transformado la gestión de operaciones.

El marco conceptual está conformado por 8 dimensiones relacionadas entre sí, las cuales pretenden analizar los trabajos realizados en torno al tema para caracterizar la transformación que deben realizar las empresas, cuando adoptan los conceptos y tecnologías de la Industria 4.0 para gestionar y llevar a cabo las operaciones del sistema productivo. Para representar la relación existente entre las dimensiones o ámbitos de estudio, a continuación, se muestra el marco conceptual propuesto, ver Figura 2.

Figura 2. Marco conceptual propuesto: Aplicaciones de la Industria 4.0 en el SPyCO



A continuación, se describen las 8 dimensiones consideradas en el Marco Conceptual propuesto con sus respectivas categorías, las mismas que se encuentran agrupadas según corresponda, en cada una de las dimensiones.

Características generales del artículo

Esta dimensión está compuesta por 5 categorías que se describen a continuación:
(i) año de publicación: permite determinar la actualidad del contenido, ya que se relaciona con la coyuntura actual. **(ii)autor y país de publicación:** se relaciona con la procedencia o país de publicación. **(iii) tipo de documento:** hace referencia al tipo de investigación utilizada para la revisión de la literatura, identificando dos tipos de revisiones, la revisión literaria y el marco conceptual. **(iv) área o temática que abarca:** permite determinar cuál es la temática

principal o relevante del artículo referido. **(v) propósito:** permite conocer el objetivo de estudio de cada artículo seleccionado.

Dimensiones propuestas

Esta dimensión permite conocer cuáles son los parámetros utilizados en el estudio realizado por el autor(es) en cada uno de los artículos seleccionados, para llevar a cabo la revisión de la literatura y el desarrollo del marco conceptual. Con esta información se pretende ampliar y mejorar el conocimiento del tema de investigación, a través de la selección de dimensiones o categorías que aporten y retroalimenten al marco conceptual propuesto, para captar la esencia del tema de estudio.

Tecnologías y Funcionalidades de la Industria 4.0

Existe algunas tecnologías que han impulsado el origen y desarrollo de la Industria 4.0, que tiene como objetivo incrementar, flexibilizar, y reducir costes del proceso productivo. Las tecnologías relacionadas a la Industria 4.0 impulsan la Cuarta Revolución Industrial, proporcionando nuevas funcionalidades a los procesos de gestión de las organizaciones, sobre la adquisición, la utilización y la asignación de los recursos de producción, para satisfacer las necesidades de los clientes de la manera más eficiente y eficaz. Las tecnologías habilitadoras en las que se basa la Industria 4.0, mencionada por varios autores (Lu, 2017; Alcácer y Cruz-Machado, 2019; Queiroz et al., 2020) que han sido adoptadas en esta dimensión, está compuesta por 7 categorías que se describen a continuación: **(i) Internet de las cosas (IoT):** red de objetos que pueden comunicarse entre sí por medio de tecnologías de la información y comunicación (TIC). **(ii) Big Data:** técnica de almacenamiento, procesamiento y análisis de grandes cantidades de datos. **(iii) Cloud computing:** TIC que proporciona un conjunto de servicios web. **(iv) Sistemas ciber físicos (CPS):** proporciona la integración de las TIC con componentes físicos y computacionales. **(v) Inteligencia Artificial (IA):** dispositivos con inteligencia para realizar tareas con o sin interacción humana; dentro de esta tecnología se encuentra el Machine learning (ML) que se refiere a la capacidad de una máquina o software para aprender mediante la aplicación de algoritmos. **(vi) Manufactura aditiva (MA):** proporciona un prototipo rápido en el proceso de producción, generando una fabricación descentralizada. **(vii) Blockchain:** base de datos distribuida que permite transacciones entre pares con alto nivel de criptografía (Queiroz et al., 2020). Estas tecnologías se han desarrollado y presentan funcionalidades que se aplican en entornos industriales de manera ágil y eficiente para efectuar la toma de decisiones de carácter estratégico, táctico y operativo dentro del proceso de producción.

Conectividad y Flujo de información

Esta dimensión está compuesta por 3 categorías y muestra la manera de adquirir y transmitir la información a través del uso de las tecnologías asociadas a la

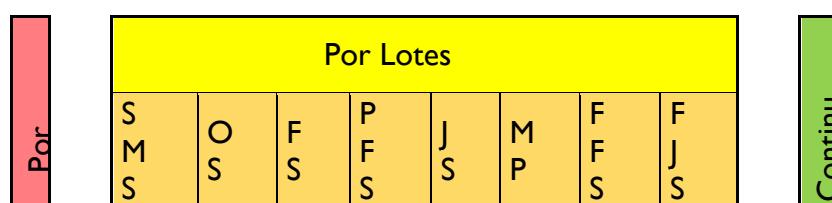
Industria 4.0. Dombrowski y Richter (2018) mencionan que existen tres características, las cuales van a ser consideradas para la propuesta del Marco Conceptual (MC): **(i) adquisición**: se refiere al proceso de cómo adquirir y generar datos. **(ii) procesamiento y almacenaje**: se refiere al proceso de análisis de datos y almacenamiento de la información. **(iii) utilización**: se refiere a la aplicación de los datos e información en el proceso de gestión de operaciones dentro de las organizaciones.

Aspectos estratégicos

Las áreas, dentro de las cuales una empresa toma decisiones, se denomina áreas o categorías de decisión, dentro de la gestión de operaciones algunas de estas decisiones se denominan estratégicas que afectan tanto al diseño del sistema como a la gestión de este, convirtiéndose en restricciones sobre las cuales debe trabajar la Industria 4.0. Bellgran y Säfsten (2009) consideran algunas categorías de decisión, entre ellas se encuentra el proceso de producción y la planificación y control de la producción. Para esta dimensión del MC, se consideran dos categorías que se relacionan con las que menciona este autor, las cuales se describen a continuación:

a. Configuración productiva: Existen múltiples clasificaciones de configuraciones productivas propuesta por varios autores; sin embargo, para este trabajo se consideran 3 categorías que hacen referencia a la clasificación en función de la continuidad para la obtención del producto, tales como: **(i) por proyecto**, cuando se obtiene uno o pocos productos no repetitivos y muy complejos, en un periodo largo de fabricación; **(ii) por lotes**, el cual se caracteriza por tener productos diferentes en las mismas instalaciones; **(iii) continua**, cuando sigue una secuencia de operaciones predeterminadas obteniendo siempre el mismo producto en la misma instalación (Sanchis Gisbert, 2020). En la Figura 3, se muestra los tipos de configuración productiva.

Figura 3. Tipos de Configuración Productiva.



Nota. SMS: Single Machine Shop, OS: Open Shop, FS: Flow Job, PFS: Permutation Flow Shop, JS: Job Shop, MP: Máquina Paralela, FFS: Flexible Flow Shop, FJS: Flexible Job Shop.

La producción por lotes puede presentar una clasificación adicional, para este marco conceptual se considera una subclasificación considerando las restricciones tecnológicas de los trabajos, determinado por el tipo de flujo a lo largo del taller (hojas de ruta). Según la taxonomía propuesta por Gómez (2010) existe una lista

de ocho configuraciones productivas que se mencionan a continuación, y deben tomarse en cuenta en la programación de la producción: Taller monomáquina, (SMS) Taller Abierto (OS), Taller de Flujo (FS), Taller de Flujo de Permutación (PFS), Taller de trabajo (JS), Máquinas paralelas (MP), Taller de Flujo Híbrido (FFS), Taller de Trabajo flexible (FJS).

b. Estrategia productiva: Esta decisión se relaciona con la planificación y control de la producción y se refiere a la relación de la demanda con el proceso productivo, en la cual se considera que las empresas deben estar preparadas para dar una respuesta rápida, al cumplimiento de pedidos realizados por el cliente, en la cual se decide dónde estará el punto de planificación. Esta estrategia de cumplimiento de pedidos está relacionada con el punto de desacople, CODP (Customer Order Decoupling Point), en donde se separa las decisiones tomadas bajo certidumbre (aguas abajo) de las tomadas bajo incertidumbre (aguas arriba) según la demanda del cliente. De acuerdo con la taxonomía propuesta por Sanchis y Poler (2018) las principales estrategias de cumplimiento de pedidos que se adoptan en esta dimensión son: Fabricación contra almacén (Make-to Stock, MTS); Ensamblaje bajo pedido (Assemble-to-Order, ATO); Fabricación bajo pedido (Make-to-Order, MTO); Diseño bajo pedido (Engineer-to-Order, ETO).

Sistema de Planificación y Control de Operaciones (SPyCO)

En esta dimensión se aborda la gestión del sistema productivo, que hace referencia a las funciones o actividades del Sistemas de Planificación y Control de Operaciones que están relacionadas con la toma de decisiones de carácter estratégico, táctico y operativo. Estas actividades han sido categorizadas por Lario (1990) clasificándolas en 5 bloques. Esta categorización ha sido adaptada excluyendo a la previsión debido a la gran variedad de métodos y modelos de pronósticos cuantitativos existentes, así como también considerando el lanzamiento y control como dos categorías relacionadas pero distintas. A continuación, se describen las categorías consideradas en esta dimensión:

a. Planificación : En esta planificación se considera **(i) Planificación Agregada de Producción (PAP)**, que se realiza en el mediano plazo y permite determinar la cantidad de producción, fuerza laboral y niveles de inventario (Heizer y Render 2008) para un grupo de productos principales, generalmente se realiza en periodos mensuales; **(ii) Plan Maestro de producción (PMP)**, que se realiza en el corto plazo y se detalla los productos que la empresa debe fabricar y los períodos en los cuales deben estar disponibles, generalmente se realiza en periodos semanales (Heizer y Render 2008).

b. Planificación y gestión de stocks (PGS): Permite determinar qué, cuándo y cuánto se debe pedir, así como también el sistema de control de inventario a emplear (Prado, 1992). Dentro de la gestión de stocks se considera **(i) los artículos con demanda independiente**, cuya demanda está basada en

pronósticos y presenta incertidumbre **(ii) artículos con demanda dependiente**, cuando la demanda es conocida con certidumbre y se deriva a partir de la explosión del **MRP (Planificación de requerimiento de Materiales)** el cual permite calcular las necesidades de material a través de un conjunto de técnicas que utiliza la lista de materiales, el estado de inventario y el plan maestro. Dentro de la planificación se considera la **Planificación de Requerimientos de Capacidad (CRP)** la cual permite calcular las necesidades de capacidad de los períodos planificados y emitidos por el MRP.

c. Programación existen tres actividades relacionadas dentro de la programación de la producción que son **(i) carga**, es la asignación de órdenes de fabricación o tareas a los centros de trabajo o de proceso, indicando que operaciones se realizan en cada una de ellas (Heizer & Render, 2008); **(ii) secuenciación**, que determina el orden o prioridad en el cual hay que ejecutar las órdenes de fabricación en cada centro de trabajo (Heizer y Render 2008); **(iii) temporización**, que determina los momentos de inicio y fin de las operaciones que realiza cada máquina en cada orden de fabricación (Gómez, 2010).

d. Lanzamiento: Es una fase de ejecución en donde las órdenes planificadas se transforman en órdenes emitidas y a corto plazo las órdenes emitidas se transformarán en órdenes en curso (Romano, 2018).

e. Control: conjunto de actividades, métodos y sistemas utilizados para lograr el control del orden de prioridad y la ejecución de las actividades de producción, así como también el control de los recursos utilizados en el proceso de producción (Luengo, 2010).

Sector y campo de aplicación

Esta dimensión está compuesta por tres categorías que se refieren a los sectores en los cuales la Industria 4.0 ha sido implementada, para conocer cómo se está desarrollando, qué sectores han incursionado en esta nueva revolución industrial, y el campo de aplicación en las diferentes industrias. Como aporte a este marco conceptual se clasifica esta dimensión en 3 categorías de acuerdo a los sectores económicos productivos: **(i) Primario:** se refiere a actividades productivas ligadas a la transformación de recursos naturales; **(ii) Secundario:** cuando se produce la transformación de materias primas en productos finales con la utilización de distintos factores de producción; **(iii) Terciario** cuando no se producen bienes materiales y se realizan actividades que satisfacen las necesidades de los clientes como la prestación de servicios.

Beneficios e Impacto

Esta dimensión se refiere al impacto o influencia positiva o negativa, que genera la Industria 4.0 por los cambios generados en las nuevas formas de producción y organización en la industria. Mellor et al. (2014) señala el impacto que genera en

la organización y cadena de suministro; de la misma forma Leo Kumar (2017) manifiesta la utilidad de la Industria 4.0 en la planificación de procesos y la fabricación; de forma similar Phuyal et al. (2020) hace referencia a las características y desafíos de la Industria 4.0 en los sistemas de fabricación inteligentes. En este marco conceptual como aporte y complemento al tema de estudio se integra y resume de manera específica, el impacto funcional/ decisional de la Industria 4.0 en términos operativos, económicos, ambientales y sociales que origina la digitalización de la fabricación. Las cuatro categorías mencionadas de esta dimensión se describen a continuación: **(i) Funcional/decisional:** se refiere al efecto y cambios generados por la transformación digital y el uso de las nuevas tecnologías en los procesos de fabricación y gestión de operaciones, que involucra la planificación, programación, control de la planta, así como también el manejo de materiales y gestión de inventario. **(ii) Económico:** se refiere al efecto generado por la transformación digital y el uso de las nuevas tecnologías en infraestructura, organización, sistemas y procesos, desde un punto de vista económico. **(iii) Social:** se refiere al efecto generado por la transformación digital y el uso de las nuevas tecnologías en las habilidades y competencias necesarias para desempeñarse dentro del entorno de la I4.0 considerando las condiciones y exigencias a los trabajadores, así como también las expectativas generadas en los clientes. **(iv) Medioambiental:** se refiere al efecto generado que produce la transformación digital y el uso de las nuevas tecnologías en el medio ambiente, considerando el uso y calidad de las nuevas tecnologías en la eficiencia e innovación de producción.

Evaluación del material: El material es analizado de acuerdo con las dimensiones estructurales planteadas, de tal manera que permite identificar las cuestiones relevantes al tema de estudio, con el propósito de obtener un resultado significativo que contribuya a este trabajo de investigación. Con las dimensiones estructurales del Marco Conceptual propuesto, se pretende analizar los resultados a través de la evaluación del material encontrado en la siguiente sección.

RESULTADOS

Se realiza la evaluación del material, a través del análisis según las dimensiones y categorías estructurales del marco conceptual propuesto. El análisis se realiza de manera independiente por dimensiones de acuerdo con los resultados obtenidos de cada categoría.

Características generales del artículo

Esta dimensión proporciona una visión general de las características inherentes a los artículos científicos seleccionados

(i) Año de publicación: se observa que el tema de la Industria 4.0, ha cobrado un impulso muy reciente en los últimos años, y el interés del estudio en diferentes áreas ha crecido rápidamente.

Se destacan dos artículos encontrados en los años 2005 y 2006, en los cuales todavía no surge el término de Industria 4.0, pero existe el término de proceso o fábrica inteligente. Desde que el término de Industria 4.0, se introdujo en Alemania en el año 2011, se observa un rápido crecimiento de artículos en el tema de estudio. Obviamente, los datos del año 2020 todavía están incompletos, por lo que el número de publicaciones es menor a los años anteriores, esto se debe a que esta investigación se lleva a cabo en medio del año en curso.

(ii) Autor y país de publicación

La contribución realizada por los diferentes autores considerando la zona geográfica, en donde se observa una gran variedad de países especialmente de Asia y Europa que han contribuido al tema de estudio. Existe un fuerte predominio de autores de Alemania con un 17%, este aspecto era el esperado ya que, el término de Industria 4.0 surgió en este país. Otros autores cuyos países de origen tienen liderazgo en el tema de estudio son: Estados Unidos con el 11%, China junto con Italia con el 9% y España con el 8%.

(iii) Tipo de documento

El enfoque metodológico adoptado en los documentos, de los 53 artículos seleccionados en esta revisión sistemática de la literatura, el 47% (25 documentos) son revisiones literarias, el 28% (15 documentos) parten de la revisión de la literatura y terminan en el desarrollo de un marco conceptual, y el 25% (13 documentos) solo desarrollan un marco conceptual.

Con la actual revisión literaria se puede decir que la Industria 4.0, como tema reciente, ha sido estudiado desde un punto de vista conceptual y/o teórico, siendo la revisión literaria la metodología de mayor aplicación.

(iv) Área o temática que abarca

Considerando el contexto en el cual los artículos, fueron creados y/o aplicados, ha sido posible clasificarlos en diferentes temáticas, en las que destaca el ámbito principal en el que se encuentran. Se observa que el 45.3% hacen referencia a las tecnologías de la Industria 4.0 en la producción, el 32.1% a la manufactura inteligente, el 17% a la planificación y control de la producción y un 5.7% a la gestión de las operaciones de la cadena de suministro como se observa en la Tabla 2.

Tabla 2. Clasificación por categorías de los artículos analizados.

Temática	# de Artículos	Porcentaje
Tecnologías de la Industria 4.0 en la producción	24	45.3%
Manufactura inteligente	17	32.1%

Planificación y Control de Operaciones	9	17.0%
Gestión de Operaciones de la Cadena de Suministro	3	5.7%
Total	53	100.0%

(v) Propósito

Los propósitos que persiguen cada uno de los artículos encontrados son diferentes y cada uno se enmarca en una de las temáticas descritas en el apartado anterior; sin embargo, la mayoría se centra en revisar y analizar a través de un marco conceptual o revisión literaria los desafíos, conceptos, características aplicaciones e implementación de la Industria 4.0 en los sistemas de fabricación inteligentes; sin embargo, es importante destacar que ningún trabajo previo presenta el mismo objetivo de este trabajo de investigación

Dimensiones propuestas

Las dimensiones bajo las cuales se desarrolla cada artículo muestran una gran variedad de propuestas que tratan alcanzar los objetivos planteados. En los artículos analizados, existen diferentes marcos conceptuales, y cada uno de ellos hace referencia a diferentes dimensiones; sin embargo, los que mayor aporte desarrollan para este trabajo de investigación, son los siguientes: Valencia et al., (2019) desarrolla un marco conceptual que aborda cuatro dimensiones que se relacionan directamente con la planificación de operaciones como son: las actividad de planificación de la producción, los horizontes de planificación, las fuentes de recopilación de datos y la aplicación que tiene la I4.0 según el tamaño de la empresa. Por otro lado esta Parente et al., (2020) en su investigación realizan un análisis de las oportunidades y desafíos que la I4.0 aporta al campo de la programación de la producción, dando como resultado las siguientes áreas que las denominan críticas en la programación de la producción, como son: la descentralización y toma de decisiones autónomas, la flexibilidad de programación, la programación en tiempo real, la programación bajo incertidumbre y las nuevas interacciones colaborativas entre humanos, máquinas y productos. Las carencias observadas se encuentran en los sectores de aplicación de la Industria 4.0, ya que ningún marco conceptual desarrollado aborda este tema en sus dimensiones, de la misma manera otro aspecto que no se considera en la mayoría de los artículos son los beneficios e impacto ambiental generado por la aplicación de estas tecnologías.

Tecnologías y Funcionalidades de la Industria 4.0

En los artículos científicos analizados el uso y aplicación de las tecnologías relacionadas a la Industria 4.0 en las actividades del SPyCO.

Existe un artículo que representa el 1.9% que menciona de manera general a la Industria 4.0; el resto de los artículos mencionan de manera específica una o varias tecnologías combinadas sobre las principales contribuciones, áreas de aplicación, limitaciones, y

recomendaciones de la Industria 4.0 en el SPyCO. De esta manera se observa que las tecnologías más encontradas en los artículos analizados son: un 5.7 % la tecnología AGV (Vehículo guiado automático); 9.4 % el Blockchain; 17% la realidad virtual y aumentada; 18.9% la manufactura aditiva (MA); 37.7 % la computación en la nube; 49.1% el Big data; 50.9% el CPS; 54.7% el Internet de las cosas (IoT); y el 56.6% la Inteligencia artificial (IA), siendo estas tres últimas las más mencionadas en las revisiones literarias, las mismas que consideran al Machine Learning (ML) como parte de la IA.

A continuación, se muestran las principales funcionalidades de las tecnologías que soportan la I4.0. Ver Tabla 3.

Tabla 3. Funcionalidades de las tecnologías que soportan la I4.0

Tecnología del Internet de las Cosas (IoT)

Referencias: Shrouf et al., 2014; Boza et al., 2016; Nobre y Tavares, 2017; Zhang et al., 2018; Morariu et al., 2020

Proporciona productos y servicios inteligentes
Vigila funcionamiento y mantenimiento de las fábricas
Proporciona información de CdS en tiempo real
Comunicación de objetos entre sí por medio de las TIC
Da seguimiento al ciclo de vida del producto
Las máquinas y equipos envían datos de rendimiento
Evita el mantenimiento reactivo
Modelos de planificación basados en modelos digitales
Genera optimización de las máquinas
Comunicación de procesos en tiempo real
Gestión y el control de un entorno de fabricación
Vigilancia y control inteligente a través de sensores
Control, seguimiento, e interacción en tiempo real

Inteligencia Artificial (IA)

Referencias: Priore et al., 2014; Çalis y Bulkan, 2015; Burggräf et al., 2018; Usuga Cadavid et al., 2020; Morariu et al., 2020

Máquinas con inteligencia para realizar tareas sin o con intercomunicadores humanos
Toma de decisiones inteligentes en tiempo real sobre reglas de asignación de máquinas
Reduce al mínimo la duración de los períodos de programación.
Optimización más eficiente a través de algoritmos de aprendizaje.
Control y la vigilancia de los procesos de producción en tiempo real
Capacidad de producción se adapta a eventos predichos
Minimiza el problema "makespan" a través de algoritmos genéticos.
Toma de decisiones en condiciones de incertidumbre
Redes neuronales se utilizan en la planificación y el control de procesos
La lógica difusa se utiliza en la programación

Reduce la intervención humana y recursos de control

Sistemas Ciber Físicos (CPS)

Referencias: Sikorski et al., 2017; Zhang et al., 2018; Alcácer y Cruz-Machado, 2019; Queiroz et al., 2020; Chawla et al., 2020

Vigila y monitorea lotes de producción y máquinas

Crea copias virtuales del mundo físico

Integra las TIC con componentes físicos y computacionales

Mejora de la fiabilidad de los procesos

Mejora la salud de los trabajadores, mediante la optimización del diseño ergonómico

Coordinación bidireccional entre modelos virtuales y la construcción física

Sistema de vigilancia en tiempo real

Reduce el tiempo de fabricación

Controla, da seguimiento, e interactúa en tiempo real durante el proceso de producción

Toma de decisión eficiente, en tiempo real y de forma autónoma de acuerdo con los requisitos de producción

Logra los mejores niveles de producción de las instalaciones basadas en IoT

Big Data (BD)

Referencias: Yang Lu, 2017; Zhong et al., 2017; Zheng et al., 2018; Alcácer y Cruz-Machado, 2019; Queiroz et al., 2020

Almacena, procesa y analiza una gran cantidad de datos

Los datos reflejan el estado de la producción

Refleja movimientos de materiales, pedidos y reacciones de clientes y proveedores

Permite incluir algoritmos y aplicaciones de análisis

Mejora los procesos de fabricación

Permite entender el comportamiento de las máquinas a través de diferentes períodos.

Genera transparencia y productividad de gran cantidad de datos

Transforma los servicios de fabricación

Permite la disponibilidad de herramientas informáticas inteligentes de predicción

Cloud Computing (CC)

Referencias: Shrouf et al., 2014; Weihrauch et al., 2018; Zhi Li et al, 2018; Alcácer y Cruz-Machado, 2019

Acceso a datos en tiempo real de múltiples fuentes

Acceso a registros pasados de fabricación y calidad

Proporciona aplicaciones de análisis que incluyen algoritmos

Proporciona un conjunto de servicios web con recursos optimizados

Transforma los recursos de fabricación y capacidades en la nube como servicios

Proporciona capacidades de control y gestión de servicios para gestionar los recursos de fabricación

Tecnología Manufactura Aditiva (MA)

Referencias: ((Mellor et al., 2014) Spalt & Bauernhansl, 2016 (Fera et al., 2016) (Achillas et al., 2015) (Costa et al., 2017)

Diseños de redes de producción descentralizadas

Producción de forma autónoma

Reduce el 70% en el error de dimensiones

Permite producir piezas con complejidad geométrica

Centros de producción dispersos estratégicamente cerca de clientes

Diseño y la producción rápida

Producto puede ser fabricado virtualmente en cualquier lugar siempre que haya materia prima.

Producción flexible y rentable de productos

No se necesitan maquinas-herramientas para la producción

Reduce del peso de los componentes

Tecnología Blockchain

Referencias: Sikorski et al., 2017; Angrish et al., 2018; Li et al., 2018; Baumung y Fomin, 2019; Queiroz et al., 2020

Transacciones entre pares con alto nivel de criptografía

Potencial para transformar la economía circular combinada con el IoT

Apoya las operaciones de producción y de negocio

Logra una red flexible y distribuida

La seguridad y problemas de identidad se basan en avanzados algoritmos criptográficos de datos.

Intercambio de conocimientos y servicios entre las empresas

Aumenta la calidad de toda la industria

Permite que clientes y empresas estén conectados

Permite compartir información, conocimientos y servicios

Proporciona trazabilidad, verificabilidad, privacidad y aplicabilidad

Facilita el registro y el intercambio de datos

Genera puntualidad y la garantía de los pagos, mediante contratos inteligentes

Facilita las interacciones M2M (machine to machine)

Productores publican información de producción en un flujo de datos, como una publicación instantánea

Consumidor lee las ofertas, analiza e intenta satisfacer su demanda

Órdenes de producción pueden ser enviadas de forma segura dentro de la empresa

Protege a toda la cadena de producción contra el acceso no autorizado

Conectividad y Flujo de Información

El intercambio de datos e información en tiempo real entre dispositivos es el elemento clave de las fábricas inteligentes, en esta representan el estado de la producción, movimientos de materiales, pedidos y la retroalimentación de los clientes, así como también la información de los proveedores. De acuerdo con el análisis de los artículos seleccionados se observa que el 84.9% de los autores hacen referencia en sus estudios, a la forma de adquirir los datos, el 73.58% como procesarlos y el 45.28% para que utilizarlos; sin embargo, el 7.55% no aborda este tema de estudio en sus publicaciones. De esta información se puede deducir que la forma de adquirir y transmitir los datos e información a través del uso de las tecnologías asociadas a la Industria 4.0, es la nueva tendencia a la cual las empresas deben adaptarse para la recopilación de datos, el análisis y la toma de decisiones en tiempo real, considerando los continuos cambios de la demanda del mercado.

Aspectos Estratégicos

Esta dimensión hace referencia a la toma de decisiones dentro de la gestión de operaciones, según la relación de la demanda con el proceso productivo (estrategia productiva) y según la estructura de flujo (configuración productiva).

a. Estrategia productiva

Esta decisión se relaciona con la planificación y control de la producción, resulta interesante en este trabajo de investigación, conocer cómo la localización del CODP se pude ver afectado por la Industria 4.0; en este contexto se realiza la revisión de los artículos científicos considerando esta categoría para conocer si los autores abordan este tema de estudio en su revisión sistemática de la literatura. Las características encontradas en cada artículo.

De esta información se puede deducir que haciendo referencia a la estrategia productiva bajo el contexto de Industria 4.0 existe un vacío en la investigación de la literatura ya que casi el 85% de los autores no la consideran en sus investigaciones; sin embargo, la estrategia productiva más mencionada en este estudio bajo el contexto de Industria 4.0 es la fabricación bajo pedido (MTO) y diseño bajo pedido (ETO).

b. Configuración productiva

La configuración productiva según la estructura del flujo para la obtención del producto encontradas en cada artículo. Al realizar la revisión de los artículos científicos para determinar la configuración productiva, que los autores mencionan en el sistema de fabricación bajo el contexto de la Industria 4.0, se observa que un 64.2 % no hace referencia al sistema de fabricación en su revisión sistemática de la literatura, el 3.8% se refiere al sistema de fabricación por proyectos y ningún artículo hace referencia al sistema de fabricación continua; sin embargo, en el sistema de fabricación por lotes se observa que el 24.5% menciona el sistema de taller de trabajo (Job Shop), el 13.2% al sistema de taller de trabajo flexible (Flexible Job Shop), el 7.5% al sistema de taller de

flujo híbrido (Flexible Flow Shop), el 3.7% al sistema de taller de flujo (Flow Shop). De esta información se puede deducir que haciendo referencia a la configuración productiva existe un vacío en la investigación de la literatura ya que solo una tercera parte de autores lo abordan; sin embargo, la configuración productiva más mencionada bajo el contexto de Industria 4.0 es el sistema de fabricación por lotes de taller de trabajo (Job Shop) y de taller de trabajo flexible (Flexible Job Shop), de acuerdo con esta revisión bibliográfica.

Sistema de Planificación y Control de Operaciones

En esta dimensión se aborda las aplicaciones de la Industria 4.0 en las actividades del Sistemas de Planificación y Control de Operaciones.

Al realizar la revisión de los artículos científicos para determinar el uso y aplicación de las tecnologías relacionadas a la Industria 4.0 en las actividades del SPyCO.

El 9.4% de los autores se refieren a la planificación agregada de la producción (PAP), así varias investigaciones (Shen et al., 2006; Mellor et al., 2014; Achillas et al., 2015) señalan que la planificación de la producción especifica los recursos necesarios de producción en el mediano plazo considerando la complejidad y volatilidad del mercado, de manera similar (Çalış & Bulkan, 2015; Barua et al., 2020) hacen referencia a la planificación de la producción en el mediano plazo y la utilidad de las tecnologías como la Inteligencia Artificial y especialmente el Machine Learning en el análisis del comportamiento desde la previsión de la demanda hasta la planificación de operaciones.

El 18.9% de los autores se refiere a la planificación de la producción en el corto plazo (PMP). Valencia et al. (2019) en su investigación se enfoca específicamente en demostrar la finalidad de las actividades de planificación de la producción en un contexto de I4.0 considerando el tamaño de la empresa y fuentes de recopilación de datos; este autor manifiesta que, debido al nivel de incertidumbre del entorno externo, la planificación de la producción se dirige principalmente a definir la disponibilidad de los recursos necesarios en horizontes de planificación a corto plazo. De la misma manera (Zhong, 2017; Leo Kumar, 2017; Zhang et al., 2018; Tsai & Lu, 2018; Dallasega et al., 2018; Sobottka et al., 2019; Dolgui et al., 2019; Morariu et al. 2020) señalan que el horizonte de planificación más privilegiado en el contexto de Industria 4.0 es el corto plazo cuyo nivel decisional es el operativo.

El 17% de los artículos analizados se refieren a la planificación de requerimientos de capacidad (CRP), y el 11.3% a la planificación de requerimientos de material (MRP), estas planificaciones se encuentran basadas en datos, los mismos que son procesados y analizados en tiempo real (Dallasega et al., 2018; Zhuang et al., 2018). La planificación de recursos se basa principalmente en el IoT, el cual permite la integración de la información, digitalización de los sistemas, supervisión en tiempo real de la gestión de materiales y recursos en el taller, recopilación automática de datos, y simulaciones basadas en estos para predecir los requerimientos de material y capacidad, así como

también el comportamiento de las operaciones (Lu, 2017; Weihrauch et al., 2018, Besharati-Foumani et al., 2019).

El 3.8% de los artículos se refieren a la gestión de inventarios con demanda independiente, existen dos artículos que mencionan de manera general, sin mayor detalle que ciertas tecnologías especialmente la Inteligencia Artificial y el Internet de las cosas, permiten conocer el manejo de materiales y la gestión de inventario actualizada, de tal manera que se pueda planificar la producción en base a esta información (Boza et al., 2016).

En lo que se refiere a la programación de la producción el 50.9% de los artículos hacen referencia a la temporización (scheduling), el 39,6% en la secuenciación, y el 30.2% a la carga o asignación. Priore et al. (2014) realiza una revisión bibliográfica de los trabajos publicados en los últimos diez años, en la cual identifica la mejor regla de asignación de máquinas para un escenario de fabricación utilizando el Machine Learning, cuando existen escenarios de fabricación cambiantes, de la misma manera Zhang et al., (2019) presenta un marco conceptual que permite resolver el problema de programación bajo en contexto de Industria 4.0, utilizando nuevas tecnologías como el IoT, Big data, Inteligencia Artificial, Computación en la nube, CPS, las mismas que permiten desarrollar nuevos modelos de programación. Otro estudio importante es el de Uhlmann y Frazzon (2018) quienes estudian el proceso de reprogramación de la producción, en entornos de fabricación dinámica, donde se producen perturbaciones inesperadas en los procesos de producción; y a través de este estudio determinan como se puede aplicar esta reprogramación en casos reales de la industria utilizando la tecnología y algoritmos de Inteligencia Artificial y Machine Learning

El 11.3% de los artículos analizados hace referencia al lanzamiento. Priore et al. (2014) señala que la mayoría de los sistemas de fabricación funcionan en entornos dinámicos por lo que los acontecimientos imprevisibles en tiempo real son inevitables y pueden provocar cambios en la programación, así como también perder su viabilidad cuando se realiza el lanzamiento de las órdenes de producción. Usuga Cadavid et al. (2020) manifiesta que la I4.0 debe dotar a los sistemas de producción los datos procedentes del proceso de fabricación para aprovechar de mejor manera los recursos disponibles que permitan actualizar la programación de las máquinas para conocer las operaciones y el momento en que deben efectuarse cuando se realiza el lanzamiento de pedidos urgentes. Dallasega et al. (2018) señala que el sistema de planificación de recursos empresariales basado en la web permite identificar el estado de los materiales a lo largo de la cadena de suministro asegurando que los materiales, dispositivos, herramientas e información precisos para la operación se encuentren en el puesto de trabajo.

La mayor cantidad de artículos hacen referencia al control de la producción en el contexto de Industria 4.0 y representan el 69.8% de los artículos analizados. Henao-Hernández et al. (2019) muestra una revisión literaria de las técnicas de monitoreo y control para la toma de decisiones de fabricación sostenible en la era de la Industria 4.0, en donde las tecnologías como el CPS permite la integración de las tareas de control

tanto en el lanzamiento de órdenes, secuenciación y control de capacidad. Zhuang et al. (2018) propone un marco conceptual para la gestión y control de la producción en una planta de ensamble inteligente, de la misma manera Rojas y Rauch (2019) investigan los facilitadores del CPPS (sistemas de producción ciber físico) para definir los retos futuros y destacar la importancia de los sistemas de control y su interacción con el IoT en un sistema de fabricación en la cual manifiesta que la tecnología del IoT permite el monitoreo y trazabilidad en tiempo real del estado de las máquinas y del procesamiento de los productos.

Existe un 11.3% de artículos que no hacen referencia específica a las funciones o actividades del SPyCO; sin embargo, abordan algunas de las tecnologías de la I4.0 y explican de manera general su aplicación en este ámbito (Fera et al., 2016, Costa et al., 2017, Sikorski et al., 2017; Filho et al., 2017; Li et al., 2018).

Sector y campo de aplicación

La mayor aplicación de la Industria 4.0 que se observa, es en la manufactura con un 23%, la misma que agrupa para este estudio a la industria de la cerámica, juguetes, herramientas, neumáticos, alimentos y madera. La automoción, medicina & farmacia, así como también los servicios abarcan un 17%, dentro de los servicios se encuentran la logística, transporte y mantenimiento. El sector aeroespacial representa el 14% y el sector de la electrónica el 7%. Esta distribución en la industria está de acuerdo con los artículos analizados que mencionan la aplicación de las tecnologías de la Industria 4.0.

De acuerdo con las categorías del marco conceptual propuesto se observa que el 64% se refiere al sector secundario (aeroespacial, automoción, manufactura, química, electrónica, construcción), el 34% al sector terciario prestación de servicios (logística, transporte, mantenimiento, medicina & farmacia) y el 2% al sector primario (agricultura, minería).

Beneficios e impacto

La empresa enfrenta retos por el cambio en los procesos productivos, en la cual existen áreas que necesitan desarrollarse para la automatización inteligente de sus procesos de producción. La Tabla 4 muestra los principales impactos y beneficios desde el punto de vista funcional/decisional, económico, social y medioambiental que manifiestan varios autores.

Tabla 4. Beneficio/Impacto de la I4.0

Funcional/Decisional

Referencia: Mellor et al., 2014; Priore et al., 2014; Spalt y Bauernhansl, 2016; Fera et al., 2016; Boza et al., 2016; Leo Kumar, 2017; Tsai y Lu, 2018; Zhang et al., 2018; Weihrauch et al., 2018; Sobottka et al., 2019; Alcácer y Cruz-Machado, 2019; Inkermann et al., 2019; Valencia et al., 2019; Zhang et al., 2019; Baumung

y Fomin, 2019; Usuga Cadavid et al., 2020; Morariu et al., 2020; Parente et al., 2020

Flexibilidad de la combinación de productos, volumen, e introducción de nuevos productos

Menor tiempo de respuesta a los clientes

Productos altamente personalizados.

Sistema de fabricación autónomo, descentralizado y flexible

Tomar decisiones inteligentes en tiempo real

Predice problemas de producción (prevención y detección de fallas en los recursos)

Capacidad de producción se adapta a eventos predichos

Planificación predictiva de la producción (capacidad de predicción en tiempo real)

Mejora la eficiencia de la industria manufacturera

Controla, da seguimiento, e interactúa en tiempo real durante el proceso de producción

Integra los sistemas ERP y MES

Integración del cliente en el diseño del producto

Identificar rápidamente las deficiencias de calidad

Da a conocer la fecha exacta de entrega de pedidos

Representación virtual del proceso de fabricación

Se reduce el horizonte de planificación (semanas-horas).

Aumenta la productividad y reduce riesgos a la salud

Respuesta inmediata a los cambios del mercado (planificar en base a información)

Sistema de vigilancia y control de las interrupciones en la producción (proceso de monitoreo en línea)

Optimización del espacio de fabricación y de las instalaciones

Producción autónoma 24/7 sin parar

Horizonte de planificación más privilegiado es corto plazo (operativa)

La disponibilidad de los recursos necesarios se planifica principalmente a corto y mediano plazo

Genera contratos inteligentes y comprueba su cumplimiento

Proteger a toda la cadena de producción contra el acceso no autorizado

Intercambio de datos de producción para la utilización eficiente de las capacidades en la red

Económico

Referencia: Mellor et al., 2014; Shrouf et al., 2014; Achillas et al., 2015; Leo Kumar, 2017; Weihrauch et al., 2018; Zheng et al., 2018; Phuyal et al., 2020; Ghobakhloo, 2020; Beier et al., 2020; Queiroz et al., 2020; Usuga Cadavid et al., 2020

Produce lotes económicos
Menores niveles de existencias.
Se reducen los plazos de entrega
Disminución de stock de seguridad
Disminución de costos de operación, mantenimiento inventario y logística
Permite reducir tiempo y los gastos de producción
Requieren de importantes inversiones de capital
Optimización de recursos
Acelera el proceso de modernización económica

Social

Referencia: Beier et al., 2020; Shrouf et al., 2014; Mellor et al., 2014; Burggräf et al., 2018; Rojas & Rauch, 2019; Ghobakhloo, 2020)

Minimiza la participación de personas en la fabricación
Impacto de condiciones y posibilidades de trabajo en el futuro (mujeres, jóvenes, o personas con discapacidad)
Nuevas formas de crear servicios y valores para los clientes antes y después de la compra
Requiere de diseñadores e ingenieros calificados
Máquinas inteligentes proyectan un escenario futuro de fábricas desiertas y personas en desempleo.
Privacidad de las personas es un desafío en el desarrollo futuro del análisis de datos.
Los países en desarrollo y comunidades con un acceso limitado a la educación están en desventaja a medida que avance la Industria 4.0

Medio Ambiental

Referencia: Mellor et al., 2014; Shrouf et al., 2014; Achillas et al., 2015; Fera et al., 2016; Leo Kumar, 2017 (Tsai & Lu, 2018; Henao-Hernández et al., 2019; Sobottka et al., 2019; Ghobakhloo, 2020; Beier et al., 2020; Queiroz et al., 2020

Minimiza el reciclaje y la eliminación de residuos
Reducción significativa de las emisiones de carbono
Minimización del total de la energía consumida por todos los recursos utilizados
Contribuye positivamente al desarrollo de la economía circular
Reducción del desperdicio
Monitoreo y predicción del consumo de energía (Sensores Wireless)

DISCUSIÓN

Al analizar los artículos investigados desde la perspectiva del Sistema de Planificación y Control de Operaciones (SPyCO), considerando que este término involucra la gestión del funcionamiento y mejora del sistema de producción dentro de las empresas, para apoyar a la toma de decisiones al gestionar los productos

y/o servicios, considerando los recursos de materiales y capacidades que permiten satisfacer las necesidades del cliente, se puede mencionar lo siguiente:

Se observa un gran crecimiento de artículos desarrollados entre los años 2018 y 2020, este periodo muestra una tendencia reciente de la transformación digital aplicada a la manufactura, que ha desembocado en la cuarta revolución industrial ya que muchas empresas han iniciado la digitalización de sus cadenas de valor, generando la implementación de nuevos modelos de gestión. Considerando la zona geográfica se observa una gran variedad de países que han contribuido al tema de estudio con un predominio de autores de Alemania, Estados Unidos y China.

Existen diferentes marcos conceptuales, cuya relación con los sistemas de planificación y control de operaciones son abordados de manera general. Los resultados muestran que la aplicación y funcionalidades de la Industria 4.0 en las actividades del SPyCO más investigadas son la programación y control de la producción vinculadas al corto plazo

Las tecnologías de la Industria 4.0 se encuentran relacionadas y combinadas unas con otras, siendo las más citadas según esta revisión bibliográfica: la Inteligencia Artificial (IA), Internet de las Cosas (IoT), los Sistemas Ciber Físicos (CPS), el Big data (BD) y la Computación en la nube. Estas tecnologías se encuentran integradas dentro de los sistemas de producción inteligente, con aplicación y funcionalidad directa en la planificación, programación y control de las operaciones dentro de la empresa, permitiendo incrementar la flexibilidad y la rentabilidad a través de la reducción de tiempos y costos de producción.

La forma de adquirir y transmitir los datos e información a través del uso de las tecnologías asociadas a la Industria 4.0, es la nueva tendencia a la cual las empresas deben adaptarse para la recopilación de datos, el análisis y la toma de decisiones, considerando los continuos cambios de la demanda del mercado. La información es utilizada y aplicada a los recursos de fabricación en la planificación, programación y control de operaciones, así como también en el diseño del sistema productivo

Existe un vacío en la literatura referente a la toma de decisiones, según la estrategia productiva para el cumplimiento de pedidos, ya que la mayoría de los autores (84.91 %), no consideran en su análisis esta dimensión; sin embargo, de los pocos artículos que la mencionan destacan el MTO (Make-to-order) y ETO (Engineer-to-order). Esta revisión bibliográfica muestra la afectación a la previsión de la demanda, la cual se vuelve compleja e inexacta, por la tendencia de la Industria 4.0 en donde los productos satisfacen los requerimientos particulares de los clientes, desde el diseño y personalización generando productos únicos.

Existe un vacío en la investigación de la literatura con respecto a la toma de decisiones según la estructura de flujo (configuración productiva) ya que solo una tercera parte de autores lo abordan; sin embargo, de acuerdo con esta revisión bibliográfica la configuración productiva más mencionada bajo el contexto de

Industria 4.0 es el sistema de fabricación de taller de trabajo (Job Shop) y de taller de trabajo flexible (Flexible Job Shop).

Las aplicaciones y funcionalidades proporcionadas por la Industria 4.0 en el contexto de planificación agregada, plan maestro de producción, planificación y gestión de inventario, están poco exploradas; sin embargo la mayoría de autores hace referencia al horizonte de planificación, en el cual, debido al nivel de incertidumbre del entorno externo, y a los cambios repentinos de la demanda, la planificación de la producción se dirige principalmente a definir la disponibilidad de los recursos necesarios en horizontes de planificación a corto plazo, cuyo periodo puede ser semanas, días, inclusive horas.

Las empresas en el contexto de I4.0 están apostando por los procesos de planificación de operaciones en contextos colaborativos para la toma de decisiones, en donde gracias a los avances tecnológicos se permite la comunicación y el intercambio de información digital, automatizada y en tiempo real entre los eslabones de la cadena de suministro, así como también entre los procesos de negocio de la empresa, permitiendo reducir costes e incrementar eficiencia, calidad, y agilidad de las operaciones.

El beneficio e impacto que genera uso de nueva tecnología en los procesos productivos ha generado una nueva forma de producción, organización y realidad industrial, en donde se está evidenciando un cambio de los sistemas de producción que son autónomos, descentralizados y flexibles permitiendo el incremento de la producción, toma de decisiones en tiempo real, menor tiempo de respuesta a los clientes, mejora de la eficiencia, monitoreo, control y optimización del proceso de producción

En el ámbito económico la aplicación de las tecnologías de la I4.0 genera, uso efectivo de los recursos, disminución de costes de operación, inventario y logística. En el ámbito social, genera, un cambio en la empleabilidad, la forma de vida y trabajo ya que se minimiza la participación de personas en la fabricación y se requiere mayor cualificación del personal. En el ámbito medioambiental, genera, la minimización del consumo de energía, el reciclaje, las emisiones de carbono y desperdicio.

Limitaciones

Este trabajo de investigación se centra en el sistema de planificación y control de la producción basado en la empresa, sin embargo, el estudio podría incrementar su alcance a la planificación de operaciones en la cadena de suministro.

El estudio no aborda la aplicación de las tecnologías de la Industria 4.0 a los pronósticos o previsiones, debido a la gran variedad de métodos y modelos de pronósticos cuantitativos existentes.

Los artículos analizados hacen referencia a las aplicaciones de tecnologías de la I4.0 específicas en la programación, y control de las operaciones. Existe una mínima cantidad de documentos relacionados a la gestión de inventarios de artículos con demanda independiente bajo el contexto de Industria 4.0, en su mayoría existen apartados dentro de los artículos que hacen referencia a la optimización de la planificación operativa de materiales (MRP) y capacidad (CRP).

Futuras líneas de Investigación

Se han identificado algunas líneas de investigación que pueden contribuir al estudio de la gestión de operaciones en el contexto de Industria 4.0. A continuación se mencionan algunas de ellas:

Centrar el estudio en la búsqueda de métodos y modelos matemáticos de programación basados en las tecnologías de la Industria 4.0 que optimicen la producción, planificación y gestión de operaciones.

Realizar un estudio del proceso productivo bajo el contexto de Industria 4.0 por sectores industriales debido a la problemática e incertidumbre inherente asociada cada uno.

Estudiar en casos reales a la pequeña y mediana empresa, para conocer si disponen o están experimentando una transición tecnológica en la automatización de los procesos de fabricación, transporte y almacenamiento a través del uso de las tecnologías de la Industria 4.0.

Realizar el estudio del impacto de la Industria 4.0 en la gestión de la cadena de suministro, que permita evaluar el uso de la tecnología y la capacidad de resiliencia en su gestión

Estudiar los impactos de la Industria 4.0 en el ciclo de vida de los productos y servicios, así como también en su diseño tanto del producto como del proceso.

Estudiar las amenazas, el impacto y condiciones en la capacitación y posibilidades de empleo debido a la innovación en la fabricación digital.

Analizar el desarrollo de la Industria 4.0 y sus implicaciones en la triple sostenibilidad (económica, social y medio ambiental)

Estudiar los principales riesgos potenciales del ciberataque en los sistemas de producción que utilizan tecnologías de la Industria 4.0 que permita desarrollar estrategias para minimizar la exposición al riesgo.

REFERENCIAS

- Jian, L., Junbin, Y., Jianhua, P., & Xiaoqiang, W. (2007, November). A study of the Method of Capacity Requirements Planning. In 2007 IEEE International Conference on Grey Systems and Intelligent Services (pp. 1363-1369). IEEE.
- Xu, X. (2012). From cloud computing to cloud manufacturing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 28(1), 1–10.

- Computer-Integrated Manufacturing.*
<https://doi.org/10.1016/j.rcim.2011.07.002>
- Yoo, M., Won, Y., Yoo, M., y Won, Y. (2018). A Study on the Transparent Price Tracing System in Supply Chain Management Based on Blockchain. *Sustainability*, 10(11), 4037. <https://doi.org/10.3390/su10114037>
- Zhang, J., Ding, G., Zou, Y., Qin, S., & Fu, J. (2019). Review of job shop scheduling research and its new perspectives under Industry 4.0. *Journal of Intelligent Manufacturing*. <https://doi.org/10.1007/s10845-017-1350-2>
- Zhang, Y., Guo, Z., Lv, J., & Liu, Y. (2018). A Framework for Smart Production-Logistics Systems Based on CPS and Industrial IoT. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. <https://doi.org/10.1109/TII.2018.2845683>
- Zheng, P., Wang, H., Sang, Z., Zhong, R. Y., Liu, Y., Liu, C., Mubarok, K., Yu, S., & Xu, X. (2018). Smart manufacturing systems for Industry 4.0: Conceptual framework, scenarios, and future perspectives. In *Frontiers of Mechanical Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s11465-018-0499-5>
- Zhong, R. Y., Xu, X., Klotz, E., & Newman, S. T. (2017). Intelligent Manufacturing in the Context of Industry 4.0: A Review. *Engineering*. <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2017.05.015>
- Zhuang, C., Liu, J., & Xiong, H. (2018). Digital twin-based smart production management and control framework for the complex product assembly shop-floor. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-1617-6>